

POLITECHNIKA KRAKOWSKA

ANDRZEJ GARBACIK, KAZIMIERZ SZEWCZYK

**Pomiary i diagnostyka  
maszyn roboczych ciężkich**

Aparatura i metody pomiarowe

SKRYPT DLA STUDENTÓW WYŻSZYCH SZKÓŁ TECHNICZNYCH

Kraków 1974

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000334617



POLITECHNIKA KRAKOWSKA

ANDRZEJ GARBACIK, KAZIMIERZ SZEWCZYK

**Pomiary i diagnostyka  
maszyn roboczych ciężkich**

Aparatura i metody pomiarowe

SKRYPT DLA STUDENTÓW WYŻSZYCH SZKÓŁ TECHNICZNYCH

Kraków 1974

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTW POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Roman Ciesielski

Z-CA PRZEWODNICZĄCEGO

Tadeusz Środulski

KIEROWNIK SEKCJI SKRYPTÓW

Zbigniew Pieniątek

REDAKTOR SERII "M"

Zbigniew Polański

SEKRETARZ SEKCJI

Ewa Małochleb

RECENZENT

Marian Pieczarka

ADRES REDAKCJI

Kraków, ul. Warszawska 24



A-717

Wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Krakowskiej w Krakowie.  
Nakład 500+25 egz. Ark.wyd. 15,0. Ark.druk. 15,0. Papier offsetowy  
kl.V. 70 g. 70x100. Oddano do druku 15.X.1974 r. Podpisano do druku  
11.III.1975 r. Druk ukończono w kwietniu 1975 r.

Zam.543/74

S-67-1540

Cena zł 19,-

BPK-A-30/2021



## S p i s   t r e ś c i

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Wstęp .....                                                                | 7  |
| Rozdział I. Podstawowe wiadomości o pomiarach .....                        | 9  |
| 1. Pojęcia podstawowe - określenia i definicje .....                       | 9  |
| 2. Wprowadzenie w problematykę miernictwa wielkości nieelektrycznych ..... | 11 |
| 3. Metody i główne układy pomiarowe .....                                  | 16 |
| 3.1. Metody pomiarowe .....                                                | 16 |
| 3.2. Układy pomiarowe .....                                                | 17 |
| 3.2.1. Układy o obwodzie otwartym .....                                    | 18 |
| 3.2.2. Układy o obwodzie zamkniętym /układy śledzące/ ..                   | 18 |
| 4. Podstawowe właściwości metrologiczne .....                              | 21 |
| 4.1. Właściwości statyczne .....                                           | 22 |
| 4.1.1. Zakresy pomiarowe .....                                             | 22 |
| 4.1.2. Czujność .....                                                      | 22 |
| 4.1.3. Impedancja oraz moce wejściowe i wyjściowe .....                    | 23 |
| 4.2. Błędy pomiarowe .....                                                 | 26 |
| 4.2.1. Błędy przyrządów pomiarowych .....                                  | 27 |
| 4.2.2. Elementy rachunku błędów .....                                      | 31 |
| 4.3. Właściwości dynamiczne .....                                          | 35 |
| 4.3.1. Charakterystyki dynamiczne - błędy dynamiczne ..                    | 38 |
| Rozdział II. Czujniki pomiarowe - przetworniki .....                       | 40 |
| 1. Czujniki rezystancyjne .....                                            | 42 |
| 1.1. Czujniki potencjometryczne .....                                      | 42 |
| 1.2. Czujniki tensometryczne .....                                         | 45 |
| 1.2.1. Zasada działania .....                                              | 45 |
| 1.2.2. Typy tensometrów .....                                              | 46 |
| 1.2.3. Układ podstawowy i metoda pomiaru .....                             | 49 |
| 1.2.4. Wpływ różnych czynników na dokładność pomiaru ..                    | 52 |
| 1.2.5. Wybrane uwagi dotyczące przygotowania pomiaru ..                    | 57 |
| 2. Czujniki indukcyjne .....                                               | 58 |
| 2.1. Czujniki o zmiennej szczelinie powietrznej /dławikowe/ ..             | 59 |
| 2.2. Czujniki solenoidalne z ruchomym rdzeniem .....                       | 61 |
| 2.3. Czujniki diamagnetyczne .....                                         | 62 |
| 2.4. Czujniki transformatorowe .....                                       | 63 |
| 2.5. Selsyny .....                                                         | 66 |
| 2.6. Tachoprądnice, asynchroniczne .....                                   | 69 |
| 2.7. Zalety i wady indukcyjnych czujników parametrycznych ..               | 70 |



|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| 3. Czujniki magnetoindukcyjne .....                          | 70  |
| 3.1. Czujniki elektrodynamiczne .....                        | 71  |
| 3.2. Czujniki reluktancyjne .....                            | 72  |
| 4. Czujniki magnetosprężyste .....                           | 74  |
| 4.1. Czujniki dławikowe .....                                | 74  |
| 4.2. Czujniki transformatorowe .....                         | 75  |
| 4.3. Zalety i wady czujników magnetosprężystych .....        | 77  |
| 5. Czujniki pojemnościowe .....                              | 78  |
| 5.1. Czujniki o zmiennej odległości między okładkami .....   | 79  |
| 5.2. Zalety i wady czujników pojemnościowych .....           | 81  |
| 6. Czujniki piezoelektryczne .....                           | 81  |
| 6.1. Zalety i wady czujników piezoelektrycznych .....        | 86  |
| 7. Czujniki fotoelektryczne .....                            | 86  |
| 7.1. Czujniki z zewnętrznym zjawiskiem fotoelektrycznym ...  | 87  |
| 7.2. Czujniki z wewnętrznym zjawiskiem fotoelektrycznym ...  | 88  |
| 7.3. Charakterystyka elementów fotoelektrycznych .....       | 90  |
| Rozdział III. Aparatura pomiarowa .....                      | 93  |
| 1. Uniwersalna aparatura wzmacniająca .....                  | 95  |
| 1.1. Aparatura wzmacniająca produkcji krajowej .....         | 96  |
| 1.2. Aparatura wzmacniająca Firmy Hottinger /NRF/ .....      | 99  |
| 1.3. Aparatura tensometryczna Firmy Brüel - Kjaer /Dania/ .. | 100 |
| 1.4. Aparatura produkcji czechosłowackiej .....              | 101 |
| 1.5. Aparatura Firmy RET VEB Messelelektronik Dresden /NRD/  | 102 |
| 2. Aparatura do pomiaru drgań .....                          | 104 |
| 3. Przyrządy wskazujące i rejestrujące .....                 | 107 |
| 3.1. Mierniki wskazujące .....                               | 108 |
| 3.2. Przyrządy rejestrujące .....                            | 109 |
| 3.2.1. Pisaki elektromagnetyczne .....                       | 109 |
| 3.2.2. Oscylografy pętlicowe .....                           | 110 |
| 3.2.3. Oscyloskopy .....                                     | 114 |
| Rozdział IV. Pomiar wybranych parametrów pracy maszyn .....  | 118 |
| 1. Pomiar przemieszczeń liniowych i kątowych .....           | 118 |
| 1.1. Pomiar mikroprzemieszczeń .....                         | 120 |
| 1.2. Pomiar małych przemieszczeń .....                       | 120 |
| 1.3. Pomiar dużych przemieszczeń .....                       | 124 |
| 1.4. Pomiar przemieszczeń kątowych .....                     | 126 |



|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2. Pomiar prędkości liniowej i kątowej .....                                  | 128 |
| 2.1. Pomiar prędkości liniowej przy małych przemieszczeniach .....            | 129 |
| 2.2. Pomiar prędkości liniowej przy dużych przemieszczeniach .....            | 130 |
| 2.3. Pomiar prędkości kątowej /obrotowej/ .....                               | 131 |
| 3. Pomiar naprężeń .....                                                      | 136 |
| 3.1. Metodyka pomiarów naprężeń przy użyciu tensometrów rezystancyjnych ..... | 138 |
| 3.1.1. Określenie wielkości i kierunków naprężeń głównych .....               | 138 |
| 3.1.2. Pomiary "czystych" naprężeń .....                                      | 142 |
| 3.1.3. Pomiar naprężeń w przypadku skręcania .....                            | 143 |
| 4. Pomiar sił .....                                                           | 149 |
| 4.1. Dynamometry mechaniczne .....                                            | 149 |
| 4.2. Dynamometry hydrauliczne .....                                           | 150 |
| 4.3. Dynamometry elektryczne .....                                            | 151 |
| 4.3.1. Dynamometry tensometryczne .....                                       | 151 |
| 4.3.2. Dynamometry magnetosprężyste .....                                     | 157 |
| 5. Pomiar momentu obrotowego /skręcającego/ .....                             | 158 |
| 5.1. Momentomierze tensometryczne .....                                       | 159 |
| 5.2. Momentomierze indukcyjne .....                                           | 163 |
| 6. Pomiar drgań mechanicznych .....                                           | 166 |
| 6.1. Wielkości charakterystyczne .....                                        | 167 |
| 6.2. Model dynamiczny inercyjnych czujników drgań .....                       | 168 |
| 6.3. Pomiar i analiza drgań złożonych .....                                   | 176 |
| 6.4. Sposoby przeprowadzania pomiaru drgań i dobór czujników .....            | 182 |
| 7. Pomiar ciśnienia .....                                                     | 185 |
| 7.1. Manometry sprężynowe .....                                               | 188 |
| 7.1.1. Manometry przeponowe .....                                             | 189 |
| 7.1.2. Manometry rurkowe /Bourdona/ .....                                     | 190 |
| 7.2. Manometry tłokowe .....                                                  | 192 |
| 7.3. Manometry elektryczne .....                                              | 194 |
| 7.3.1. Manometry tensometryczne .....                                         | 194 |
| 7.3.2. Manometry piezoelektryczne .....                                       | 197 |
| 7.3.3. Manometry pojemnościowe .....                                          | 198 |
| 7.3.4. Manometry indukcyjne .....                                             | 199 |
| 7.4. Manometry różnicowe .....                                                | 200 |
| 7.5. Wyposażenie dodatkowe manometrów .....                                   | 202 |



|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8. Pomiar temperatury .....                                             | 204 |
| 8.1. Szklane termometry cieczowe .....                                  | 206 |
| 8.2. Termometry manometryczne .....                                     | 207 |
| 8.3. Termometry termoelektryczne .....                                  | 209 |
| 8.3.1. Zasada działania .....                                           | 209 |
| 8.3.2. Czujniki termoelektryczne /termopary/ .....                      | 210 |
| 8.3.3. Kompensacja wpływu temperatury wolnych końców<br>termopary ..... | 213 |
| 8.3.4. Układy pomiarowe .....                                           | 215 |
| 8.4. Termometry oporowe .....                                           | 217 |
| 8.4.1. Czujniki metalowe .....                                          | 218 |
| 8.4.2. Czujniki półprzewodnikowe /termistory/ .....                     | 221 |
| 8.4.3. Przyczyny powstawania błędów pomiarowych .....                   | 221 |
| 9. Pomiar przepływu .....                                               | 222 |
| 9.1. Przepływomierze komorowe /objętościowe/ .....                      | 225 |
| 9.2. Przepływomierze prędkościowe - wirnikowe .....                     | 228 |
| 9.3. Przepływomierze tensometryczne - naporowe .....                    | 231 |
| 9.4. Przepływomierze ultradźwiękowe .....                               | 232 |
| Katalogi .....                                                          | 234 |
| Literatura .....                                                        | 235 |



## W s t ę p

Badania doświadczalne odgrywają w naukach technicznych istotną rolę tak w zagadnieniach teoretyczno-naukowych, jak i w praktyce inżynierskiej. Stwierdzenie rzeczywistych cech danej konstrukcji lub maszyny i informacje o zachowaniu się jej w różnych złożonych warunkach można uzyskać jedynie w badaniach eksperymentalnych prowadzonych według odpowiednich metod badawczych. Współczesne badania obejmują zarówno elementy, jak i całe maszyny w rzeczywistych warunkach pracy, a także modele laboratoryjne lub konstrukcje unikalne i prototypowe.

Wzrost roli badań eksperymentalnych i zwiększenie potrzeb weryfikacji doświadczalnej w grupie maszyn roboczych ciężkich /maszyny budowlane, dźwigowe, drogowe, do robót ziemnych/ narzucają konieczność kształcenia jednostek i rozwijania specjalistycznych zespołów badawczych posługujących się nowoczesną aparaturą naukowo-badawczą.

Duży postęp w miernictwie wielkości elektrycznych i nieelektrycznych stawia przed prowadzącymi badania konieczność wyboru takich metod pomiarowych, które są optymalnie dostosowane do pomiarów określonych wielkości. Istotne jest ponadto, aby wybrana metoda pomiaru gwarantowała przeprowadzenie badań w sposób szybki, kompleksowy, dokładny i bezpośredni.

W badaniach konstrukcji maszyn najczęściej dokonuje się pomiarów wielkości: mechanicznych, elektrycznych, termicznych oraz innych wielkości fizycznych. Opracowanie niniejsze ze względu na ograniczoną objętość obejmuje jedynie wybrane zagadnienia z pomiarów wielkości fizycznych, termicznych i mechanicznych, najbardziej reprezentatywnych w badaniach i diagnostyce maszyn roboczych ciężkich. Ujęcie tych zagadnień pomiarowych od podstawowych wiadomości o pomiarach aż do układów stosowanych w miernictwie poszczególnych parametrów pracy maszyn roboczych ciężkich umożliwia korzystanie z tego opracowania Czytelnikom niekoniecznie posiadającym specjalne przygotowanie kierunkowe.

Skrypt stanowi również pomoc dla słuchaczy studiów podyplomowych i doktoranckich dla kierunku mechanika, jak również dla pracowników naukowo-badawczych, zajmujących się problematyką badań maszyn i urządzeń mechanicznych.

Autorzy







## Rozdział I

### PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O POMIARACH

#### 1. Pojęcia podstawowe - określenia i definicje

W celu wprowadzenia czytelnika w nazewnictwo z dziedziny metrologii na wstępie podane zostaną określenia podstawowe i definicje. Przy ich formułowaniu oparto się na normie PN/N - 02050 "Metrologia. Nazwy i określenia" oraz na pozycjach [41], [72].

Pomiar nazywa się doświadczalne wyznaczenie z określoną dokładnością miary danej wielkości, przy czym:

- miarą wielkości nazywa się wartość wielkości wyrażoną iloczynem liczby i jednostki miary,
- jednostką miary nazywa się wartość danej wielkości umownie przyjętą jako mającą wartość liczbową równą jedności.

Wynikiem pomiaru nazywa się miarę wielkości mierzonej, uzyskaną po uwzględnieniu poprawek i podaniu granic błędów przypadkowych.

Metoda pomiaru jest to zasada porównywania zastosowana przy pomiarze.

Sposobem pomiaru nazywa się przebieg czynności niezbędnych do wykonania pomiaru.

Sprzętem pomiarowym nazywa się środki techniczne służące do wykonania pomiarów, obejmujące aparaturę, przyrządy, wzorce i przybory pomiarowe.

Wzorzec miary jest to ciało fizyczne odtwarzające miarę danej wielkości z określoną dokładnością.

Przyrząd pomiarowy jest to przyrząd służący do bezpośredniego wykonywania pomiarów.

Miernik jest to przyrząd pomiarowy, w którym miarę wielkości określa jedno wskazanie ustalone.



**Wskaznik** jest to przyrząd lub ciało fizyczne służące do stwierdzenia czy określone zjawisko lub określona wartość wielkości mierzonej występują czy nie występują.

**Aparatura pomiarowa** jest to zespół środków technicznych pozwalający na wykonanie określonego zadania pomiarowego.

**Czujnik - przetwornik pomiarowy** jest to element pomiarowy przeznaczony do zamiany mierzonej wielkości fizycznej na inną wielkość, przy czym wartości tych wielkości tworzą zbiory równej mocy /dwa zbiory są równej mocy, jeżeli istnieje wzajemne jednoznaczne odwzorowanie jednego zbioru w drugi/.

**Element przetwarzający** jest to część czujnika pomiarowego, w której bezpośrednio ma miejsce zamiana jednej wielkości fizycznej w drugą.

**Sygnał pomiarowy** jest to wielkość fizyczna występująca w procesie pomiaru, będąca wielkością mierzoną lub inną wielkością jednoznacznie od niej zależną.

**Sygnał wejściowy** jest to sygnał pomiarowy bądź inna wielkość fizyczna, występująca w procesie pomiaru, podawana na wejście przyrządu lub układu pomiarowego. Sygnał wejściowy nosi również nazwę wielkości wejściowej.

**Sygnał wyjściowy** jest to wielkość fizyczna podana na wyjście przyrządu lub układu pomiarowego, zwana inaczej wielkością wyjściową.

**Układ pomiarowy** jest to zestaw sprzętu pomiarowego, którego elementy /człony/ są wzajemnie połączone w sposób umożliwiający wykonanie pomiaru.

Elementy układu pomiarowego dzielą się na:

**wejściowe**, tj. te, na które podawany jest sygnał wejściowy układu pomiarowego /elementy wejściowe - **w e j ś c i a u k ł a d u**/,

**wyjściowe**, tj. te, na których otrzymywana jest wartość wielkości mierzonej /przy pomiarach bezpośrednich/ lub otrzymywane są wartości innych wielkości wyznaczających wartość wielkości mierzonej /przy pomiarach pośrednich/, czyli sygnał wyjściowy o znanej wartości /elementy wyjściowe - **w y j ś c i a u k ł a d u**/,

**pośredniczące**, tj. pozostałe elementy układu.



Parametry wejściowe przyrządu lub układu pomiarowego są to wartości charakterystycznych dlań wielkości fizycznych, mierzone na jego wejściu, np. impedancja wejściowa.

Parametry wyjściowe przyrządu lub układu pomiarowego są to wartości charakterystycznych dlań wielkości fizycznych, mierzone na jego wyjściu, np. impedancja wyjściowa.

## 2. Wprowadzenie w problematykę miernictwa wielkości nieelektrycznych

Ze względu na coraz to większe znaczenie weryfikacji doświadczalnej nowych konstrukcji i kontroli parametrów współczesnych maszyn i urządzeń zadania pomiarowe uległy znacznemu rozszerzeniu. W szczególności coraz częściej zachodzi konieczność rejestracji i analizy przebiegów szybkozmiennych uderowych oraz dokonywania pomiarów prowadzonych zdalnie.

Oparcie pomiarów na elektrycznych układach pomiarowych rozwiązało, dzięki zastosowaniu nowoczesnej elektroniki, szereg problemów pomiarowych. W wyniku tego wyodrębniła się niejako nowa dyscyplina "pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi".

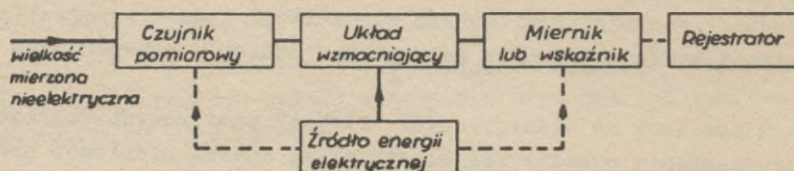
Pomiary wielkości nieelektrycznych prowadzone przy zastosowaniu metod elektrycznych mają szereg zalet, do których zaliczyć należy:

- możliwość przetworzenia prawie każdej wielkości fizycznej na odpowiadające jej zmiany prądu lub napięcia,
- możliwość rejestracji nawet bardzo małych zmian wielkości mierzonej,
- łatwość przesyłania wyników na odległość /telemetria/ jak również możliwość prowadzenia pomiarów zdalnie, tzn. bez kontaktu z obiektem badanym,
- możliwość równoczesnego rejestrowania na jednym przyrządzie wielokanałowym różnych parametrów danego urządzenia lub przebiegu, co pozwala na określenie wzajemnych korelacji tych parametrów,
- możliwość równoczesnego pomiaru jednego parametru w wielu punktach obiektu badanego, co stwarza warunki do określenia rozkładu danego parametru,
- możliwość przedstawienia wyników pomiaru w postaci cyfrowej z równoczesną możliwością zapamiętywania i przeliczania tych wyników zgodnie z ustalonym programem,
- możliwość pomiarów różnych wielkości mechanicznych przy użyciu zlikwidowanej aparatury.



Pomiar może być realizowany przy zastosowaniu różnych metod pomiarowych oraz przy użyciu różnego sprzętu pomiarowego, przy czym przez pomiar rozumie się doświadczalne wyznaczanie z określoną dokładnością wartości wielkości fizycznej przy porównywaniu jej z pewną wartością przyjętą za jednostkę. Dobór odpowiedniej metody pomiarowej i wybór typu przyrządu lub układu pomiarowego uzależniony jest od rodzaju mierzonej wielkości fizycznej, potrzeb odnośnie do dokładności, warunków w których pomiar musi być wykonywany oraz wymaganego stopnia niezawodności działania i kosztów pomiaru.

Złożone układy lub przyrządy pomiarowe przedstawia się najczęściej w postaci łańcuchów działania jako schematy blokowe dające łatwość w śledzeniu systemu przetwarzania sygnału pomiarowego. Schemat prostego blokowego układu pomiarowego został zilustrowany na rys.I-1.



Rys.I-1. Schemat blokowy podstawowego układu pomiarowego

Jednym z głównych elementów układu pomiarowego jest czujnik. Zapewnia on jednoznaczny związek między wielkością mierzoną  $X$  a sygnałem pomiarowym  $Y$ . Związek ten określa zależność:

$$Y = f(X) \quad (1)$$

zwana funkcją przenoszenia, której wykres stanowi charakterystykę statyczną czujnika. Pod słowem czujnik należy zatem rozumieć skrót w znaczeniu czujnik wraz z przetwornikiem, ponieważ reaguje on nie tylko na zmianę wielkości mierzonej /jak np. prędkość, przyspieszenie, ciśnienie, siła, odkształcenie itp./, lecz jednocześnie przekształca ją na inną wielkość np. elektryczną. Pierwotny sygnał pomiarowy emitowany z czujnika rzadko może być bezpośrednio wykorzystywany ze względu na małą moc, dlatego często konieczne jest jego formowanie i wzmacnianie w dalszych elementach /blokach/ układu pomiarowego.

Prawidłowo zestawiony układ pomiarowy powinien zapewniać:

- jednoznaczność zależności między wielkością mierzoną a sygnałem pomiarowym,
- dogodną postać tego sygnału, łatwą do dalszego formowania,



- dopasowanie sygnału do właściwości przyrządu wyjściowego, którego celem jest zamiana sygnału pomiarowego na efekt wizualny, akustyczny lub inny możliwy do odebrania przez obserwatora.

Ponadto w przypadku pomiarów zdalnych istnieje konieczność dopasowania sygnału pomiarowego do warunków dobrego przekazywania go na odległość.

W celu podniesienia m.in. właściwości transmisyjnych układów stosowany jest często sygnał elektryczny modulowany jako łatwy do wzmocnienia, przetworzenia i przekazania na odległość.

W procesie zwanym modulacją używa się pomocniczego przebiegu /tzw. nośnego/, który kształtowany jest przez przebieg pomiarowy. W wyniku ścisłego związania tych sygnałów otrzymywany jest przebieg wypadkowy - modulowany, którego jeden z parametrów, np. amplituda, faza lub częstotliwość, staje się pewną funkcją sygnału pomiarowego. Stąd w miernictwie stosowane są trzy rodzaje modulacji: modulacja amplitudy, modulacja częstotliwości i modulacja fazy.

**M o d u l a c j a   a m p l i t u d y.** Jeżeli do układu zasilanego przykładowo zmiennym napięciem nośnym  $U_n$  wprowadzony zostanie sygnał pomiarowy w postaci napięcia sterującego  $U_s = f / X /$ , przy czym:

$$U_n = U_{no} \cdot \cos \omega t / \quad (2)$$

$$U_s = U_{so} \cdot \cos \Omega t / = f / X / \quad (3)$$

gdzie  $\omega$  i  $\Omega$  przedstawiają częstotliwości przebiegów oraz  $\omega \gg \Omega$ , to na wyjściu po spełnieniu właściwych warunków otrzymuje się sygnał /napięcie/ modulowany  $U_m$ , którego częstotliwość będzie równa częstotliwości sygnału nośnego, a amplituda będzie się zmieniać w takt zmian sygnału pomiarowego /patrz rys. I-2/ wg zależności:

$$U_m = [U_{no} (1 + m \cdot \cos \Omega t)] \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

gdzie:  $U_{no}$  - amplituda przebiegu nośnego,

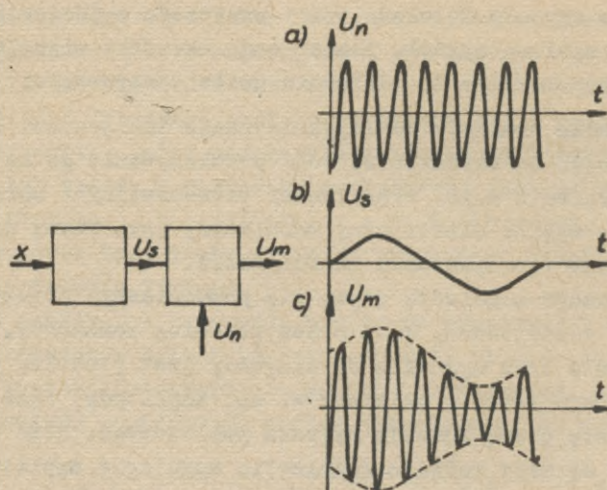
$U_{so}$  - amplituda sygnału pomiarowego,

$m = k \frac{U_s}{U_n}$  - głębokość modulacji,

$k$  - stała modulacji,

$U_{no}(1 + m \cdot \cos \Omega t)$  - amplituda przebiegu modulowanego.





Rys. I-2. Modulacja amplitudy: a/ napięcie nośne, b/ sygnał pomiarowy, c/ sygnał po modulacji

- M o d u l a c j a c z ę s t o t l i w o ś c i. Istotą tej modulacji polega na zmianie częstotliwości przebiegu nośnego pod wpływem chwilowej wartości sygnału pomiarowego. Modulację częstotliwości używa się w generatorach drgań /zwanych modulatorami częstotliwości/, w których zmienia się pod wpływem sygnału pomiarowego jeden z parametrów obwodu rezonansowego; np. pojemność o  $\Delta C$  względnie indukcyjność o  $\Delta L$ . Zmianom tym odpowiadają określone zmiany częstotliwości drgań wyrażone wzorami:

$$f = \frac{-\Delta L}{2L_0} \cdot f_0 \quad (5)$$

$$f = \frac{-\Delta C}{2C_0} \cdot f_0 \quad (6)$$

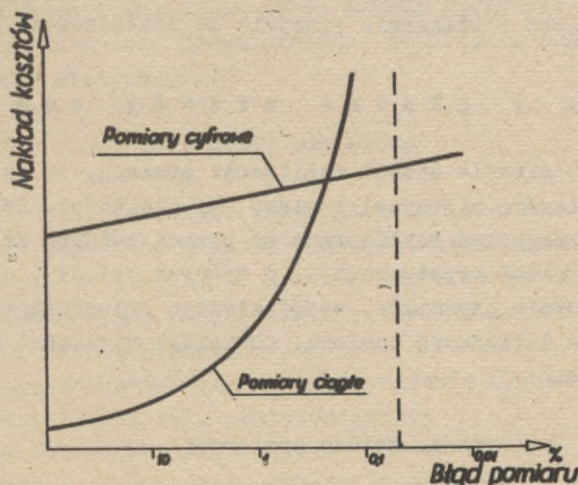
- M o d u l a c j a f a z y. Ten rodzaj modulacji dotyczy dwóch przebiegów okresowych o tych samych częstotliwościach i amplitudach, lecz różnych fazach. Wprowadzenie tych przebiegów do urządzenia sumującego /sumatora/ pozwala uzyskać na jego wyjściu sygnał obrazujący wzajemne



przesunięcie fazowe tych przebiegów. Należy jednak dodać, że układy pomiarowe z sygnałem modulowanym są układami o znacznym stopniu skomplikowania, między innymi ze względu na to, że ujawnianie wyników pomiaru wymaga zwykle demodulacji.

Wielkości mierzone są na ogół wielkościami ciągłwartościowymi /analogowymi/, tzn. mogą przyjmować dowolną wartość z pewnego przedziału. Układ pomiarowy odwzorowuje wówczas wielkość mierzoną jako pewien sygnał, przy czym każdej wartości zostaje przyporządkowana jedna i tylko jedna wartość sygnału.

Wielkości analogowe mogą być mierzone w sposób ciągły lub tylko w wybranych przedziałach czasu. W związku z tym rozróżnia się sygnały ciągłe i impulsowe [51]. Nowoczesne tendencje pomiarowe zmierzają do coraz powszechniejszego stosowania wyjściowego sygnału w postaci impulsowej, co jest związane z zastosowaniem cyfrowych metod pomiaru. Uzasadnieniem stosowania cyfrowych metod pomiaru poza dostosowaniem do potrzeb maszyn cyfrowych mogą być względy np. metrologiczne. Na podkreślenie zasługuje tu fakt, że metody ciągłe pomiaru mają ograniczoną dokładność /0,1 %/, a uzyskanie wysokiej dokładności przy tych metodach wymaga dużego nakładu kosztów. Zależność nakładu kosztów od uzyskanej dokładności pomiaru pokazano na rys. I-3.



Rys. I-3. Porównanie nakładów kosztów na realizację pomiarów ciągłych i cyfrowych



Działanie przyrządów cyfrowych polega na zliczaniu elementów zwanych kwantami /lub ziarnami/, charakteryzujących w sposób bezpośredni lub pośredni wielkość mierzoną.

Jeżeli wielkość mierzona jest ze swej natury nieciągła, czyli ma charakter dyskretny lub kwantowy, to jej pomiar sprowadza się do prostego zliczania kwantów w określonym przedziale czasu [77]. Taką typową wielkością jest częstotliwość, stąd częstotliwościomierze cyfrowe są najprostszymi przyrządami cyfrowymi.

W przypadku, gdy wielkość mierzona ma charakter ciągły /np. napięcie stałe/, chcąc zastosować pomiar cyfrowy należy przetworzyć wartość ciągłą na nieciągłą czyli skwantowaną. Proces kwantowania może być przeprowadzany w rozmaity sposób i jest dokonywany w urządzeniach elektronicznych, które noszą nazwę przetworników analogowo-cyfrowych lub konwerterów.

Zagadnieniem doboru wartości i formy sygnału elektrycznego, dostosowaniem tego sygnału do warunków pomiarowych, jak również określeniem metody jego zmierzenia zajmuje się teoria obwodów elektrycznych i miernictwo elektryczne [19], [27], [32], [51], [61], [68]. W opracowaniu tym wydaje się celowe zwrócenie uwagi na zagadnienia elektrycznych układów pomiarowych, które nabierają szczególnego znaczenia przy pomiarach wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, takie jak:

- ogólna struktura i zasada działania układu pomiarowego,
- warunki pomiaru i wymagania odnośnie do dokładności.

### 3. Metody i główne układy pomiarowe

Metoda pomiaru określa sposób realizacji pomiaru, to znaczy sposób porównywania wielkości mierzonej z miarą tej wielkości. Poszczególne metody pomiarowe mogą być realizowane za pomocą różnych układów pomiarowych i różnych zasad przetwarzania. O wyborze metody i układu pomiarowego decyduje wiele czynników, wśród których najważniejsze czynniki to: wymagana dokładność pomiaru, charakter wielkości mierzonej, warunki otoczenia.

#### 3.1. Metody pomiarowe

Z punktu widzenia sposobu otrzymywania wyników pomiaru, metody pomiarowe można podzielić na:

- bezpośrednie, tj. takie, przy których wynik pomiaru jest równoznaczny z odczytanymi wskazaniem mierników wyjściowych,



- p o ś r e d n i e, tj. takie, przy których wynik pomiaru otrzymuje się po wykonaniu określonych działań matematycznych na wartościach otrzymanych z mierników wyjściowych.

Biorąc natomiast pod uwagę sposób postępowania, przy porównywaniu mierzonej wielkości do miary tej wielkości wyróżnia się trzy metody:

- m e t o d ę w y c h y ł o w ą, polegającą na określeniu mierzonej wielkości przez odczyt na mierniku wyjściowym, który /wraz z całym układem pomiarowym/ został wyskalowany w jednostkach wielkości mierzonej,

- m e t o d ę r ó ż n i c o w ą, polegającą na pomiarze różnicy między wartością wielkości mierzonej a znaną wartością odniesienia /porównawczą/ - pomiar tej różnicy realizowany jest metodą wychyłową,

- m e t o d ę z e r o w ą, polegającą na takim doborze wielkości wzorcowej, by równoważyła ona /kompensowała/ wielkość mierzoną; pomiar realizowany jest w tym przypadku poprzez ujawnianie wartości wielkości wzorcowej.

Największą dokładność uzyskać można stosując metodę zerową. Wynika to między innymi z faktu pracy układu pomiarowego w stanie bezobciążeniowym. Biorąc pod uwagę charakter zmian wielkości mierzonej można stwierdzić, że metoda zerowa jest stosowana wyłącznie przy pomiarach parametrów statycznych i wolnozmiennych. Metody wychyłowe stosowane są do pomiarów szybkozmiennych /dynamicznych/, aczkolwiek mogą być użyte również w pomiarach statycznych.

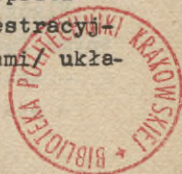
### 3.2. Układy pomiarowe

Układ pomiarowy jest to zestaw przyrządów pomiarowych, których elementy są wzajemnie połączone w sposób umożliwiający wykonanie pomiaru. W zależności od sposobu realizacji zadania pomiarowego istnieje szereg odmian układów pomiarowych, różniących się zarówno sposobem przetwarzania sygnału, jak i metodą pomiaru.

Biorąc pod uwagę schematy blokowe przetwarzania sygnałów, układy pomiarowe można podzielić na dwie odmienne grupy:

- układy o obwodzie otwartym,
- układy o obwodzie zamkniętym /układy śledzące/.

W przypadku pierwszym są to układy nie zrównoważone /niekompensowane/. Sygnał pomiarowy przechodzi kolejno od czujnika pomiarowego przez przetworniki i wzmacniacze do przyrządu wskaźnikowego lub rejestracyjnego. Brak jest tu sprzężeń zwrotnych między elementami /blokami/ układu [59].

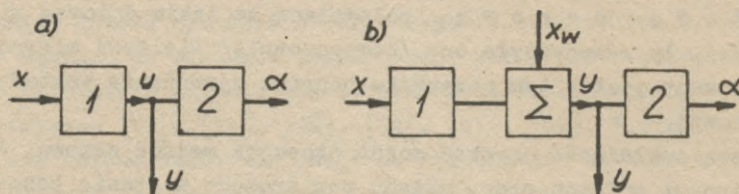




W drugim przypadku istotną częścią układu jest przynajmniej jedno ujemne sprzężenie zwrotne. Działanie układu pomiarowego zamkniętego /zwanego również zrównoważonym lub kompensacyjnym/ polega na automatycznym równoważeniu wielkości wyjściowej. Zasada pracy pomiarowych układów zamkniętych jest podobna jak przy układach regulacyjnych.

### 3.2.1. Układy o obwodzie otwartym

Schemat blokowy prostego układu o obwodzie otwartym został przedstawiony na rys.I-4a. Zasada pracy tego układu jest następująca: w czujniku /1/ wielkość mierzona  $X$  przetwarzana jest na sygnał  $Y$ , który może być przekazany do dalszego wykorzystania lub wprowadzony do członu /2/ miernika lub rejestratora w celu ujawnienia w postaci odczytu.



Rys.I-4. Schematy blokowe układów o obwodzie otwartym: a/ wychyłowy prosty, b/ różnicowy

Odmianą jego jest pomiarowy układ różnicowy, rys.I-4b. W układzie tym dokonuje się dodatkowego porównywania z wielkością wzorcową  $x_w$  w członie sumującym. Zaletą układu różnicowego jest znaczne odciążenie członów wyjściowych.

Sygnał pomiarowy układów otwartych może mieć postać sygnału pneumatycznego, hydraulicznego lub elektrycznego i może być, jak wspomniano, przekazywany w formie analogowej lub jako sygnał impulsowy czy okresowo zmienny modulowany. Dobór rodzaju sygnału zależy w głównej mierze od natury mierzonego parametru, warunków pomiaru oraz wymaganej dokładności.

### 3.2.2. Układy o obwodzie zamkniętym /układy śledzące/

W układach zamkniętych stosowany jest głównie sygnał analogowy w postaci elektrycznej lub pneumatycznej.

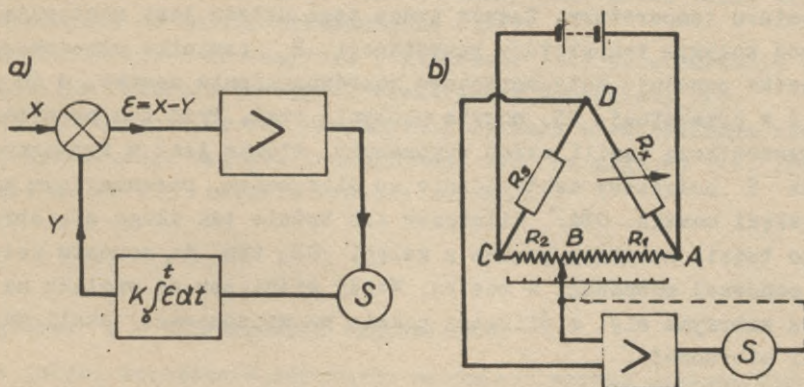
Śledzące układy zamknięte są to układy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Podzielić je można na dwie grupy:

- astatyczne,
- statyczne.



Pierwsze są układami kompensacyjnymi, czyli pomiar polega na ciągłym automatycznym przestrajaniu wielkości wzorcowej w celu utrzymywania równowagi z wielkością mierzoną.

Drugie, tzn. statyczne, działają na zasadzie równoważenia z równoczesnym przetwarzaniem wielkości mierzonej na sygnał do niej proporcjonalny. Obarczone są zatem statycznym błędem przetwarzania, nie są więc kompensatorami w całym tego słowa znaczeniu.



Rys.1-5. Astatyczny układ śledzący: a/ schemat blokowy, b/ schemat połączeń astatycznego kompensatora do pomiaru temperatury

Działanie astatycznego układu śledzącego zostało wyjaśnione za pomocą schematu blokowego, podanego na rys.1-5a. Widzimy, że ustawienie wielkości wzorcowej do takiej wartości, by równoważyła wielkość mierzoną  $X$ , realizowane jest za pośrednictwem całkującego elementu sprzężenia zwrotnego, którego sygnał wyjściowy  $Y$  jest proporcjonalny do całki po czasie z rozrównoważenia  $\epsilon$ , elementem całkującym może być np. silnik elektryczny.

Zatem

$$Y = C \int_0^t \epsilon dt \quad (7)$$

po zrózniczkowaniu

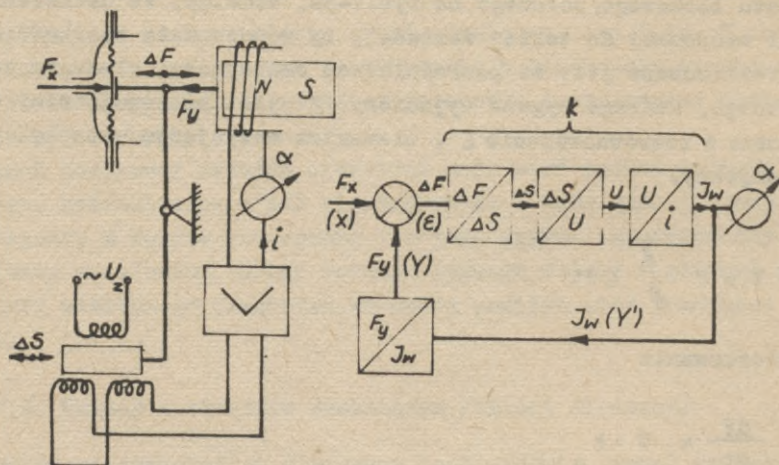
$$\frac{dY}{dt} = C \cdot \epsilon \quad (8)$$



Z ostatniego wzoru wynika ważna właściwość układów kompensacyjnych mianowicie dążą one do równowagi z prędkością proporcjonalną do rozrównoważenia. Ponadto cechą szczególną tych układów jest dokonywanie pomiaru mierzonej wielkości w stanie bezobciążeniowym, więc wynik pomiaru jest w znacznym stopniu niezależny od impedancji obwodu pomiarowego, co ma duży wpływ na dokładność pomiaru.

Na rys.I-5b został pokazany przykład układu astatycznego kompensatora do pomiaru temperatury. Zasada pracy tego układu jest następująca: zmiana pod wpływem temperatury rezystancji  $R_x$  czujnika włączonego w gałąź mostka powoduje natychmiastowe rozrównoważenie mostka, a co zatem idzie w przekątnej DB mostka popłynie prąd. Prąd ten po wzmocnieniu we wzmacniaczu zasili człon wykonawczy, którym jest w tym przypadku silniczek S połączony mechanicznie ze ślizgaczem, poruszającym się wzdłuż gałęzi mostka CBA. Silniczek ten będzie tak długo się obracał, jak długo będzie zasilany prądem z gałęzi DB, tzn. do momentu ustalenia się ponownej równowagi w mostku. Wtedy silniczek ze względu na brak zasilenia zatrzyma się, a ślizgacz pokaże na wycechowanej skali wartość wielkości mierzonej.

- Statyczne układy śledzące działają, jak już wspomniano, na zasadzie równoważenia z równoczesnym przetwarzaniem sygnału na wielkość pomiarową o innej naturze fizycznej. Zasadę działania tego układu zwanego "transmiterem" [59] wyjaśnia przykład pokazany na rys.I-6.



Rys.I-6. Zasada działania statycznego układu śledzącego do pomiaru siły



Kolejne elementy układu spełniają tu następujące funkcje:

- w węźle sumacyjnym porównywane są siły występujące po obu stronach membrany zgodnie z zależnością:

$$F_x - F_y = \Delta F \quad \text{lub} \quad X - Y = \varepsilon \quad (9)$$

- sygnał rozrównoważenia  $\varepsilon$  przetwarzany jest przez belkę wagi na odpowiadającą mu zmianę przesunięcia  $\Delta s$ ,
- w przetworniku indukcyjnym realizowane jest przetworzenie przesunięcia  $\Delta s$  rdzenia na sygnał elektryczny napięciowy  $\Delta U$ ,
- we wzmacniaczu, oprócz wzmocnienia sygnału elektrycznego, następuje przetworzenie sygnału napięciowego  $\Delta U$  na prądowy  $\Delta I$ . Przetworzenie  $\varepsilon$  na  $\Delta I$  określa liniowa zależność

$$\Delta I = k \cdot \varepsilon \quad (10)$$

gdzie:  $k$  - współczynnik wzmocnienia,

- w gałęzi sprzężenia zwrotnego natomiast sygnał prądowy wywołuje w cewce siłę elektrodynamiczną  $F_y$  oddziaływającą na belkę.

Prąd  $I$  zmieniać się będzie tak długo, aż siła  $F_y$  nie zrównoważy siły  $F_x$ . Wartość prądu  $I$  w stanie równowagi jest zatem miarą wielkości wejściowej czyli siły  $F_x$ .

Omówiony przykład statycznego układu pomiarowego /zwany także wagą prądową/ jest układem regulacyjnym z sygnałem kontrolnym. Układ ten może także stanowić element bardziej rozbudowanego systemu pomiarowego, w którym zachodzi potrzeba utrzymania jakiegoś parametru na określonym poziomie [25].

#### 4. Podstawowe właściwości metrologiczne

Układy i przyrządy pomiarowe charakteryzują metrologiczne właściwości statyczne i dynamiczne.

Do właściwości statycznych zalicza się takie podstawowe właściwości metrologiczne, jak: zakres pomiarowy, czułość, charakter funkcji przenoszenia oraz błędy pomiarowe /te ostatnie omówione zostały odrębnie w p. 4.2/.

Właściwości dynamiczne są niezależne od statycznych i mają znaczenie przy pomiarach szybkozmiennych, stanowiąc o chwilowej poprawności pomiaru.



Przy doborze sprzętu pomiarowego nie można pominąć ponadto takich właściwości, jak np. moc sygnału, czy impedancja wejściowa lub wyjściowa, które decydują także o przydatności danego układu lub przyrządu do przeprowadzenia konkretnego zadania pomiarowego [34], [46], [59].

#### 4.1. Właściwości statyczne

##### 4.1.1. Zakresy pomiarowe

Aparatura pomiarowa budowana jest dla różnych zakresów pomiarowych, przy czym górną wartość zakresu pomiarowego ograniczają zwykle właściwości fizyczne czujnika, natomiast najniższy zakres pomiarowy ogranicza szum.

Źródłem szumów są przede wszystkim zjawiska magnetyczne i elektromagnetyczne zachodzące w czujniku i całym układzie pomiarowym, jak również zjawiska cieplne występujące w przewodach metalowych.

##### 4.1.2. Czulość

Czulością  $k$  urządzenia pomiarowego określa się różniczkę sygnału wyjściowego  $Y$  odniesioną do sygnału wejściowego  $X$

$$k = \frac{dY}{dX} \quad (11)$$

W praktyce z wystarczającą dokładnością można przyjmować za czulość stosunek skończonych przyrostów wielkości wyjściowej  $\Delta Y$  i wejściowych  $\Delta X$ , a zatem:

$$k \approx \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (12)$$

Dla przyrządów pomiarowych określa się często stałą  $C$ , która jest odwrotnością czulości

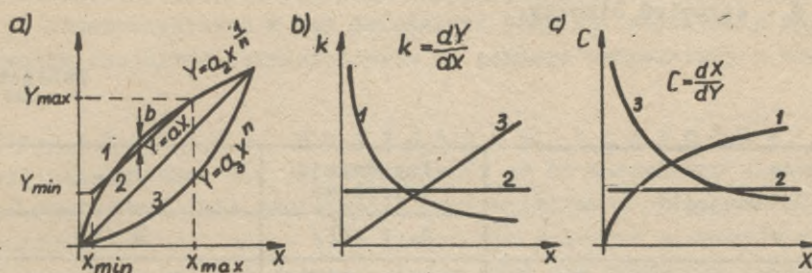
$$C = \frac{1}{k} = \frac{dX}{dY} \quad (13)$$

przy czym stałą  $C$  podaje się zwykle w odniesieniu do działki elementarnej przyrządu lub jednostki wielkości wyjściowej, np.  $[^{\circ}\text{C}/\text{dz}]$  lub  $[^{\circ}\text{C}/\text{mV}]$ .



W przypadku, gdy funkcja przenoszenia  $Y = f(X)$  jest liniowa, to czułość jest stała /wobec  $\frac{dY}{dX} = \text{const}/$ , co jest właściwością bardzo pożądaną tak w odniesieniu do przyrządów, jak i całych układów pomiarowych. Często jednak spełnienie warunków stałej czułości w całym zakresie pomiarowym jest trudne do zrealizowania. W tych przypadkach dopuszcza się pewne nieliniowości, których miarą jest odchylenie od optymalnej aproksymacji liniowej /rys.I-7/, określone wzorem

$$\gamma = \frac{b}{Y_{\max} - Y_{\min}} \cdot 100 \% \quad (14)$$



Rys.I-7. Funkcje przenoszenia, czułość i stałe przyrządów pomiarowych

W przypadkach, gdy liniowa zależność  $Y = cx$  jest niezbędna, np. dla całkowania lub przedstawienia pomiaru w postaci cyfrowej, stosuje się specjalne układy linearyzujące [41].

#### 4.1.3. Impedancja oraz moce wyjściowe i wejściowe

Pojęcie impedancji elektrycznej /oporu pozornego/ określone zależnością:

$$Z = \frac{U}{I} \quad (15)$$

gdzie:  $U$  - wartość skuteczna napięcia,

$I$  - wartość skuteczna natężenia prądu,

można uogólnić przez rozszerzenie na inne wielkości fizyczne, np. impedancja pneumatyczna:



$$Z_p = \frac{p}{Q} \quad (16)$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie,

$Q$  - natężenie przepływu,

czy impedancja cieplna

$$Z_Q = \frac{\Delta t}{\phi} \quad (17)$$

gdzie:  $\Delta t$  - różnica temperatur,

$\phi$  - strumień cieplny.

Tablica I

| Czujniki                         | Impedancja<br>wyjściowa    | Moc                             |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
|                                  | $R, Z \text{ } / \Omega /$ | $N \text{ } / W /$              |
| Rezystancyjne - potencjometrycz. | $50 \div 10^5$             | $0,1 \cdot 10^{-3} \div 1$      |
| Rezystancyjne - tensometryczne   | $/0,1 \div 5/ \cdot 10^3$  | $/0,01 \div 10/ \cdot 10^{-6}$  |
| Rezystancyjne - termoelektrycz.  | $50 \div 500$              | $0,01 \cdot 10^{-3} \div 1$     |
| Indukcyjne i magneto-elastycz.   | $50 \div 1000$             | $0,1 \cdot 10^{-3} \div 1$      |
| Pojemnościowe                    | $/1 \div 100/ \cdot 10^3$  | $/0,01 \div 10/ \cdot 10^{-6}$  |
| Piezoelektryczne                 | $/1 \div 100/ \cdot 10^6$  | $/0,5 \div 100/ \cdot 10^{-12}$ |
| Fotoelektryczne                  | $/1 \div 10/ \cdot 10^6$   | $/0,01 \div 10/ \cdot 10^{-6}$  |



- Impedancja wejściowa czujnika, jako elementu stykającego się bezpośrednio z obiektem badanym, charakteryzuje oddziaływanie czujnika na obiekt czyli określa stopień wprowadzane- go przez niego zakłócenia mierzonej wielkości. Zwykle wpływ ten bywa pomijalny ze względu na to, że obiekty pomiarowe są źródłem dużej ilo- ści energii. Wtedy, gdy wpływu tego nie da się pominąć, przy doborze czujnika konieczne jest uwzględnienie jego impedancji wejściowej. Przy- kładowo: źle dobrany przepływomierz może dławić przepływ, termometr mo- że zakłócić rozkład temperatur, małosztywny element do pomiaru siły mo- że zmienić charakter mierzonej siły, itp.

Zatem impedancja wejściowa czujnika zależy od jego fizycznych wła- ściwości i rozwiązania konstrukcyjnego. Często miniaturyzacja czujnika pozwala na znaczne zwiększenie jego impedancji wejściowej. Przykładem osiągnięć konstrukcyjnych w tej dziedzinie jest np. stosowanie zminia- turyzowanych czujników termistorowych do pomiaru temperatury o średni- cy 0,5 mm.

- Impedancja wyjściowa czujnika po- winna być tak dobrana, aby po przyłączeniu go do następnego elementu /członu/ pomiarowego nie zmniejszała mocy wyjściowej całego układu.

Analogiczny warunek można sprecyzować dla dalszych elementów ukła- du, które powinny być tak dobrane między sobą, aby spełniały kryterium maksymalnej sprawności. W przypadku szeregowego połączenia dwu elemen- tów pomiarowych maksymalną moc uzyskuje się, gdy impedancja wejściowa elementu II równa się impedancji wyjściowej elementu I. Warunek ten w "teorii układów" nosi nazwę "dopasowania" i można go zapisać wzorem:

$$Z_{n\text{wyj}} = Z_{n+1\text{wej}} \quad (19)$$

gdzie:  $Z_n$  - impedancja kolejnego elementu.

Jest on nieistotny jedynie wtedy, gdy kolejny element pomiarowy nie pobiera mocy, tj. gdy zachodzi przypadek sterowania bezprądowego, np. sterowania siatki w lampie elektronowej [41], [49].

Bardzo ważne kryterium dopasowania elementów pomiarowych pod wzglę- dem ich impedancji bywa niekiedy w sprzeczności z innymi właściwościami układu pomiarowego. Charakterystycznym przykładem jest pomiar tem- peratury za pomocą czujników termooporowych i miliwoltomierza. Z kry- terium maksymalnej sprawności wynikałaby konieczność dopasowania impe- dancji wyjściowej czujnika do impedancji wejściowej miliwoltomierza, jednakże celowo rezygnuje się z tego dopasowania na korzyść ważniejsze-



go kryterium, jakim jest w tym przypadku minimalizacja błędów. W tym celu dobiera się wysokoomowe mierniki, by ograniczyć wpływ zmian impedancji obwodu zewnętrznego. Z przykładu tego widać, że przy doborze elementów układu pomiarowego należy kompleksowo uwzględniać wiele czynników.

Moc sygnału wyjściowego czujników jest na ogół zbyt mała, by mogła pokryć zapotrzebowanie przyrządów wskazujących, dlatego też konieczne staje się stosowanie członów wzmacniających. Ma ono jeszcze jedną zaletę, pozwala mianowicie na uzyskanie na wyjściu sygnału w zakresach znormalizowanych. Umożliwia to unifikację przyrządów wyjściowych, jak również zastosowanie ich do dowolnych układów pomiarowych.

W tablicy I podano zestawione wartości impedancji wyjściowych i mocy czujników w celu przedstawienia zakresu możliwości w dziedzinie doboru tych elementów [59].

#### 4.2. Błędy pomiarowe

Wartość otrzymana w wyniku pomiaru różni się od rzeczywistej /idealnej/ wartości mierzonej. Wartość zmierzona jest jedynie przybliżeniem wartości rzeczywistej. Maksymalna różnica  $\Delta$  w stanie ustalonym pomiędzy tymi wartościami nazywa się **b ł ę d e m s t a t y c z n y m** lub błędem bezwzględnym pomiaru

$$\Delta = Y - Y_{rz} \quad (20)$$

gdzie:  $Y$  - wartość zmierzona,

$Y_{rz}$  - wartość rzeczywista /idealna/.

Wartość tego błędu odniesiona do wartości rzeczywistej nosi nazwę błędu względnego i określona jest wzorem:

$$\delta = \frac{\Delta Y}{Y_{rz}} \cdot 100 \% = \frac{Y - Y_{rz}}{Y_{rz}} \cdot 100 \% \quad (21)$$

Błędy występujące przy pomiarach w zależności od przyczyn ich wstawiania można podzielić na błędy systematyczne, błędy przypadkowe, błędy grube /pomyłki/.



- Błędy systematyczne są wywołane przez wpływ otoczenia, użycie niewłaściwej metody pomiaru, niedoskonałe wzorcowanie, niestałość zera /płynięcie zera/, itp. Ogólnie biorąc, błędy te są znane mierzącemu i istnieje możliwość określenia ich teoretycznie lub doświadczalnie. Poprzez wprowadzenie do wyniku pomiaru poprawki istnieje możliwość ich wyeliminowania lub zmniejszenia.

- Błędy przypadkowe występują nieregularnie i mogą przyjmować w różnych chwilach różne wartości. Wynikają z niedoskonałości przyrządów pomiarowych, działania zmiennych czynników zewnętrznych, niedoskonałości odczytu itp., nie mogą zatem być ujęte ścisłą zależnością matematyczną bądź wyznaczone doświadczalnie. Możliwe jest jedynie /na podstawie odchyień od średniej wartości wyników/ wyznaczenie granic, których /z pewnym prawdopodobieństwem/ błędy te nieprzekroczą. Wpływ tych błędów na wynik pomiaru można zatem tylko szacować za pomocą rachunku prawdopodobieństwa i metod statystyki matematycznej /co jest przedmiotem "teorii błędów"/.

- Błędy grube, zwane także pomyłkami, powstają wskutek nieuwagi eksperymentatora, niewłaściwego zakresu pomiarowego, odczytu na niewłaściwej podziałce, itp. Wyniki pomiarów obciążone błędami grubymi należy eliminować. Nie następuje to w większości przypadków dużych trudności, ponieważ w zestawieniach wyniki pomiarów obciążone błędami grubymi najczęściej znacznie odbiegają od średniej wartości. W przypadkach wątpliwych stosuje się metodę "weryfikacji hipotez statycznych" stanowiącą dział matematyki statystycznej [41].

Ponadto w przypadku, gdy mierzona wielkość ulega zmianom w czasie, należy liczyć się z wystąpieniem tzw. błędów dynamicznych. Błędy dynamiczne wynikają z bezwładności układu pomiarowego i dodają się do błędów statycznych, tj. występujących w stanie ustalonym. Dynamiczne właściwości układów pomiarowych zostaną bliżej określone w p. 4.3 tego rozdziału.

#### 4.2.1. Błędy przyrządów pomiarowych

Aby móc jednoznacznie porównać ze sobą przyrządy pomiarowe pod względem dokładności został zdefiniowany błąd podstawowy.

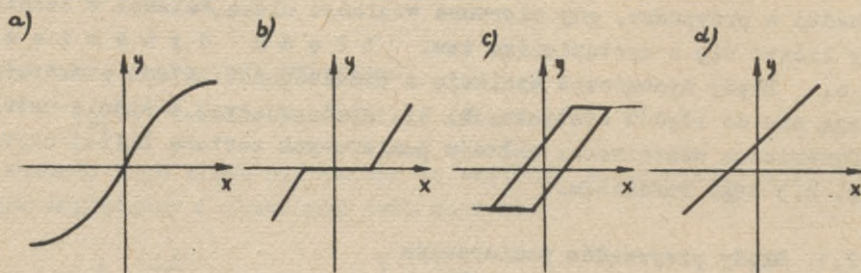
- Błąd podstawowy jest to ta część błędu statycznego, która występuje wówczas, gdy parametry otoczenia zmieniają się w granicach przyjętych warunków określonych jako normalne: tj. m.in. temperatury, wilgotności, ciśnienia, braku pól magnetycznych i elektromagnetycznych i braku drgań. Błąd podstawowy odniesiony do zakresu



zmian mierzonej wielkości lub zakresu pomiarowego przyrządu nosi nazwę błędu podstawowego zredukowanego.

- Błąd podstawowy zredukowany jest najważniejszą wielkością opisującą jakość przyrządu i określającą jego klasę dokładności. Normy polskie przewidują dla elektrycznych przyrządów pomiarowych następujące klasy dokładności: 0,1 0,2 0,5 1,0 1,5 2,5, natomiast dla manometrycznych przyrządów pomiarowych: 0,4 0,6 1,0 1,5 2,5 4,0. Liczba oznaczająca klasę dokładności określa zatem w procentach największą możliwą wielkość błędu podstawowego - zredukowanego. Zawiera ona w sobie wszystkie wpływy zakłócające idealną zależność między wielkością wyjściową a wejściową w warunkach normalnych a w szczególności:

- systematyczne odchylenie od wymaganej charakterystyki statycznej, uwarunkowane wyborem rozwiązania konstrukcyjnego przyrządu - rys. I-8a,
- nieczułość /strefa martwa/, najczęściej spowodowana przez tarcie części mechanicznych lub luzy - rys. I-8b,
- niejednoznaczność, wywołana przez tarcie lub przez zjawisko histerezy magnetycznej - rys. I-8c,
- płynięcie zera, wywołane starzeniem się i wpływami otoczenia - rys. I-8d,
- niepełną powtarzalność, tzw. niestałość charakterystyk statycznych w czasie.



Rys. I-8. Przyczyny błędu statycznego: a/ nieliniowość, b/ nieczułość /strefa martwa/, c/ niejednoznaczność /histereza/, d/ płynięcie punktu zerowego

Przy pomiarach, w warunkach odmiennych od warunków przyjętych za normalne, wskazania przyrządów obarczone są dodatkowymi błędami.



Wprowadzenie pojęcia błędu podstawowego zredukowanego /klasy dokładności/ pozwala w prosty sposób określić maksymalny błąd przyrządu. Zatem wyznacza granicę niepewności pomiaru w przypadku użycia konkretnego przyrządu w jego normalnych warunkach eksploatacyjnych. Wartość błędu wylicza się na podstawie wzoru:

$$\Delta = \frac{Y_{zn} \cdot kl_p}{100} \quad (22)$$

gdzie:  $Y_{zn}$  - maksymalna znamionowa wartość sygnału na danym zakresie pomiarowym,

$kl_p$  - klasa dokładności przyrządu w procentach.

Zdarza się, że mierzona wielkość sygnału  $Y$  jest trudna do bezpośredniego zmierzenia /lub niemożliwa/, znana jest natomiast funkcja:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (23)$$

przy czym:  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  - są wielkościami mierzonymi bezpośrednio za pomocą różnych przyrządów, wówczas przez określenie wartości pochodnych cząstkowych  $Y$  względem  $x_i$  /gdzie:  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ / możliwe jest określenie wpływu poszczególnych błędów  $\Delta x_i$  na wynik pomiaru złożonego /pośredniego/:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{\partial Y}{\partial x_i} \Delta x_i \quad (24)$$

Wyrażenie to znane pod nazwą prawa zwielokrotnienia błędu daje niejednokrotnie w praktyce zbyt duże wartości błędu. Wynika to stąd, że poszczególne błędy nie zawsze dodają się.

Gdy znany jest rozkład prawdopodobieństw poszczególnych błędów, wówczas pożyteczne przybliżenie otrzymuje się przy założeniu, że  $\Delta x_i$  są wartościami średnimi i odpowiadają rozkładowi Gaussa. Prawo zwielokrotnienia błędu można wtedy zapisać w następującej postaci:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (25)$$



Założenie to nie zawsze jest spełnione. Pozwala ono jednak na uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do rzeczywistości niż równanie (23), które daje maksymalny oczekiwany błąd.

#### Przykład I

Obliczyć błąd pomiaru napięcia, mierzonego woltomierzem klasy 1,5, o zakresie znamionowym  $U_{zn} = 400 [V]$ , jeżeli wartość zmierzona wynosiła  $U = 300 [V]$ .

$$\Delta = \frac{400 \cdot 1,5}{100} = 6 [V]$$

zatem  $U_p = 300 \pm 6 [V]$ .

#### Przykład II

Obliczyć błąd pomiaru rezystancji, jeżeli pomiaru dokonano wg metody technicznej, za pomocą miliamperomierza klasy 1 o zakresie znamionowym  $I_{zn} = 15 [mA]$  i woltomierza kl.1 o zakresie znamionowym  $U_{zn} = 15 [V]$ , przy czym wskazania mierników wynosiły:  $I = 10 [mA]$  oraz  $U = 10 [V]$ .

Mając na uwadze, że  $R = \frac{U}{I}$

$$\Delta_R = \left| \frac{\partial R}{\partial U} \Delta_U \right| + \left| \frac{\partial R}{\partial I} \Delta_I \right| = \frac{1}{I} \Delta_U + \frac{U}{I^2} \Delta_I$$

Błędy poszczególnych mierników  $\Delta_U$  i  $\Delta_I$  wynoszą

$$\Delta_U = \frac{15 \cdot 1}{100} = 0,15 [V] \quad \text{oraz} \quad \Delta_I = \frac{0,015 \cdot 1}{100} = 0,15 \cdot 10^{-3} [A]$$

zatem

$$\Delta_R = \frac{1}{0,01} \cdot 0,15 + \frac{10}{0,01^2} \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 30 [\Omega]$$

ponieważ

$$R = \frac{U}{I} = \frac{10}{0,01} = 1\,000 [\Omega]$$

$$R_p = 1\,000 \pm 30 [\Omega]$$



#### 4.2.2. Elementy rachunku błędów

Określenie błędu pomiaru poprzez błąd podstawowy zredukowany, czyli klasę przyrządu, nie daje pełnego rozeznania o dokładności pomiaru. Wynika to między innymi z faktu, że klasa przyrządu wyraża wszystkie wpływy zakłócające, a więc i błąd przypadkowy, który jest zmienną losową. Do precyzyjnego wyznaczenia wartości wielkości mierzonej, poza informacją, w jakim przedziale może się ona znajdować, niezbędna jest także znajomość prawdopodobieństwa /poziomu ufności/ znalezienia jej w tym przedziale.

Rozpatrzmy dla przykładu tok postępowania przy opracowaniu wyników dla pomiarów wykonywanych metodą bezpośrednią.

Z teorii błędów wiadomo, że w przypadku małej ilości analizowanych wyników pomiaru znajduje zastosowanie tzw. "rozkład Studenta" /w praktyce pomiarowej przyjmuje się, że "rozkład Studenta" może być stosowany z zadowalającą dokładnością od ilości wyników  $n = 5$ /.

Na podstawie tego rozkładu /dla przyjętego poziomu ufności  $(1 - \alpha)$ / można wyznaczyć przedział, w którym znajduje się prawdziwa wartość  $m$  mierzonego parametru

$$P(x - D \leq m \leq x + G) = 1 - \alpha \quad (26)$$

$$\text{gdzie: dolna granica } D = x - \frac{s \cdot t_{\alpha}}{\sqrt{n - 1}} \quad (27)$$

$$\text{górną granicą } G = x + \frac{s \cdot t_{\alpha}}{\sqrt{n - 1}} \quad (28)$$

$s$  - odchylenie średnie kwadratowe obliczone ze wzoru:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{śr}})^2} \quad (29)$$

$$x_{\text{śr}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (30)$$

$t_{\alpha}$  - parametr związany z rozkładem Studenta.

W tablicy II podano rozkład parametru  $t_{\alpha}$  w zależności od ilości pomiarów  $n$  oraz poziomu ufności  $(1 - \alpha)$ .







Należy także zwrócić uwagę na eliminację błędu grubego, tzw. "wyników odstających". W celu sprawdzenia, że jakiś wynik jest "odstający" czyli znacznie większy lub znacznie mniejszy, należy:

1/ uporządkować wyniki w kolejności nie malejącej

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$$

2/ obliczyć wartość średnią wg wzoru

$$\bar{x}_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

3/ obliczyć odchylenie średnie wg wzoru

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_{sr})^2}$$

4/ ustalić poziom istotności  $\alpha$ . Parametry zależności między poziomem istotności  $\alpha$  i liczbą wyników /liczbą zdarzeń/ są opracowane w formie tabelarycznej najczęściej dla  $\alpha = 1; 2,5; 5; 10\%$ . Praktycznie oznacza to, że zdarzenie nieprawdopodobne może zaistnieć odpowiednio 1; 2,5; 5; 10 razy na 100 zdarzeń;

5/ obliczyć wyrażenie

$$k = \frac{\bar{x}_{sr} - x_n}{s} \quad \text{lub} \quad k = \frac{x_n - \bar{x}_{sr}}{s} \quad (31)$$

w zależności od tego czy wynik odstający jest mniejszy, czy większy;

6/ z tablicy III dla danej ilości pomiarów  $n$  i wybranego poziomu istotności  $\alpha$ , wyznacza się  $k_{\alpha, n}$  i porównuje się z wielkością obliczoną  $k$ . Jeżeli  $k > k_{\alpha, n}$ , to rozpatrywany wynik należy uznać za obarczony błędem grubym i odrzucić /po sprawdzeniu czy rozpatrywany wynik nie wynika z innych warunków eksperymentu/.

#### Przykład

W wyniku pomiaru przyspieszeń kabiny dźwigu osobowego w czasie hamowania zarejestrowano następujące wartości wyrażone w wielkości przyspieszenia ziemskiego "g";

$$x_1 = 1,7 \quad x_2 = 1,6 \quad x_3 = 1,7 \quad x_4 = 1,9 \quad x_5 = 3,5 \quad x_6 = 1,8 \quad x_7 = 1,8$$



Wynik  $x_5 = 3,5$  budzi poważne wątpliwości, dlatego przed przystąpieniem do opracowania wyników pomiaru należy sprawdzić czy jest to wynik odstający. Po uporządkowaniu wyników oraz obliczeniu  $x_{sr}$ ,  $s$ ,  $k$  z poprzednio podanych wzorów otrzymuje się

$$x_{sr} = 14 : 7 = 2 \quad s = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 (x_i - 2)^2} = 0,62$$

$$k = \frac{3,5 - 2,0}{0,62} = 2,41$$

Tablica III

| n  | $k_{n,\alpha}$  |                   |                 |                  |
|----|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|
|    | $\alpha = 1 \%$ | $\alpha = 2,5 \%$ | $\alpha = 5 \%$ | $\alpha = 10 \%$ |
| 3  | 1,414           | 1,414             | 1,412           | 1,406            |
| 4  | 1,723           | 1,710             | 1,689           | 1,645            |
| 5  | 1,955           | 1,917             | 1,869           | 1,791            |
| 6  | 2,130           | 2,067             | 1,996           | 1,894            |
| 7  | 2,265           | 2,182             | 2,093           | 1,974            |
| 8  | 2,374           | 2,273             | 2,172           | 2,041            |
| 9  | 2,464           | 2,349             | 2,237           | 2,097            |
| 10 | 2,540           | 2,414             | 2,294           | 2,146            |
| 11 | 2,606           | 2,470             | 2,343           | 2,190            |
| 12 | 2,663           | 2,519             | 2,387           | 2,229            |
| 13 | 2,714           | 2,562             | 2,426           | 2,264            |
| 14 | 2,759           | 2,602             | 2,461           | 2,297            |
| 15 | 2,800           | 2,638             | 2,493           | 2,326            |
| 16 | 2,837           | 2,670             | 2,523           | 2,354            |
| 17 | 2,871           | 2,701             | 2,551           | 2,380            |
| 18 | 2,903           | 2,728             | 2,577           | 2,404            |
| 19 | 2,932           | 2,754             | 2,600           | 2,426            |
| 20 | 2,959           | 2,778             | 2,623           | 2,447            |
| 21 | 2,984           | 2,801             | 2,644           | 2,467            |
| 22 | 3,008           | 2,823             | 2,664           | 2,486            |
| 23 | 3,030           | 2,843             | 2,683           | 2,504            |
| 24 | 3,051           | 2,862             | 2,701           | 2,520            |
| 25 | 3,071           | 2,880             | 2,717           | 2,537            |



Z tablicy III dla  $n = 7$   $\alpha = 1\%$ ,  $k_{\alpha,n} = 2,093$ . Czyli, jeżeli z analizy technicznej wynika, że jest to wynik gruby, należy go odrzucić.

W celu określenia "poziomu ufności" należy obliczyć wyrażenie  $\frac{s \cdot t_{\alpha}}{\sqrt{n-1}}$ , dla przyjętego  $(1 - \alpha) = 0,95$  z tablicy II;  $t_{\alpha} = 2,571$ ; stąd

$$\frac{2,571 \cdot 0,0096}{\sqrt{5}} = 0,11,$$

w wyniku czego przedział ufności przedstawić można następująco:

$$1,75 - 0,11 \leq m \leq 1,75 + 0,11$$

Tak więc na poziomie ufności 0,95 wyznaczony przedział zawiera nieznaną wartość poszukiwanego rzeczywistego przyspieszenia dświgu.

#### 4.3. Właściwości dynamiczne

Przy pomiarach wielkości zmiennych w czasie zarówno wielkości mierzone, jak i odpowiadające im wielkości wyjściowe układu pomiarowego są w ogólnym przypadku funkcjami czasu

$$X = X/t/ \quad \text{oraz} \quad Y = Y(t) \quad (32)$$

Przebiegi obu funkcji nie są równoczesne. Istnieją zawsze opóźnienia pomiaru. Oprócz przesunięcia w czasie także kształt funkcji wyjściowej nie w pełni odwzorowuje wyjściową funkcję mierzoną. Zjawiska te noszą nazwę błędów dynamicznych i częstokroć są znacznie większe od statycznych błędów pomiaru.

Analiza właściwości dynamicznych ma na celu określenie i skompensowanie błędów dynamicznych układu pomiarowego. Analiza ta może być prowadzona za pomocą metod teorii automatyki [68], [74]; wtedy przebiegi wielkości mierzonej w czasie oraz wielkości wyjściowej traktowane są jako sygnały wejściowe i wyjściowe układu, w którym występuje tzw. stan nieustalony /przejściowy/.

Stanem nieustalonym elementu lub układu pomiarowego nazywa się całość zjawisk zachodzących w nim od chwili wytrącenia go z jednego stanu równowagi ustalonej do chwili przyjęcia przezeń nowego stanu równowagi.



Zależność między sygnałem wejściowym a wyjściowym dla stanów nieustalonych określana jest /dla liniowego elementu układu pomiarowego/ równaniem różniczkowym

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_m \frac{d^m X}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dX}{dt} + b_0 X \quad (33)$$

W przypadku szczególnym, lecz częściej występującym w praktyce, równanie to sprowadza się do postaci

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = F(t)$$

gdzie:  $F(t)$  - wymuszenie przyłożone do wejścia.

Korzystając z transformacji Laplace'a - Carsona, równanie (33) można przedstawić w postaci operatorowej /przy założeniu zerowych warunków początkowych/

$$(a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0) Y(p) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) X(p) \quad (35)$$

Pozwala to wyznaczyć:

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0} = K(p) \quad (36)$$

Iloraz sygnałów wyjściowego i wejściowego oznaczony symbolem  $K(p)$  nosi nazwę operatorowej funkcji przejścia - transmitancji [62], [74]. W wyrażeniu tym operator  $p$  reprezentuje częstotliwość w postaci zespolonej, a stałe  $a_n$  i  $b_m$  fizyczne właściwości przyrządu pomiarowego. Transmitancja opisuje w pełni właściwości dynamiczne przyrządu /elementu/ pomiarowego i można ją określić jako czułość przejścia lub dynamiczną czułość zespoloną przez analogię do definicji statycznej czułości urządzenia pomiarowego. Dla wszystkich urządzeń pomiarowych, gdy  $X/t = \text{const.}$ , to  $p = 0$  i obie czułości są sobie równe.

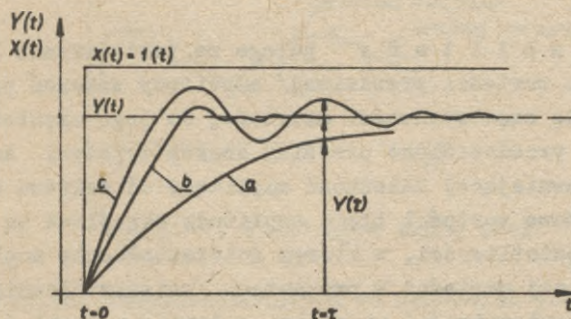
W celu analitycznego lub doświadczalnego określenia transmitancji wprowadza się na wejście urządzenia pomiarowego zdeterminowany sygnał i poddaje analizie odpowiedź na wyjściu. Najczęściej stosuje się sygnał jednostkowy skokowy lub sinusoidalnie-zmienny.



Jeżeli na wejście wprowadzony zostanie sygnał w postaci funkcji jednostkowej skokowej, określonej wzorem

$$X(t) = \begin{cases} X = 0 & \text{dla } t < 0 \\ X = 1 & \text{dla } t > 0 \end{cases}$$

to odpowiedź otrzymana na wyjściu /zwana odpowiedzią skokową/ będzie aperiodyczna lub oscylacyjna - rys.I-9. Wymuszenie jednostkowe stosuje się ze względu na stosunkowo proste związki teoretyczne i łatwość fizycznej realizacji /zwłaszcza dla wielkości nieelektrycznych/.



Rys.I-9. Przykłady odpowiedzi wyjściowych na wejściową funkcję skokową: a/ aperiodyczny, b,c/ oscylacyjny tłumiony

Wymuszenie sinusoidalne ma natomiast szczególne znaczenie ze względu na przebiegi okresowe często spotykane w praktyce. Dla sinusoidalnego przebiegu sygnału wejściowego o jednostkowej amplitudzie  $X_{wej} = \sin \omega t$  sygnał wyjściowy  $Y_{wyj}$  będzie również sygnałem sinusoidalnie zmiennym o tej samej częstotliwości  $\omega$ , lecz innej amplitudzie  $B$  i określonym przesunięciu fazowym  $\varphi$  względem sygnału wejściowego, co można zapisać równaniem:

$$Y_{wyj} = B(\sin \omega t + \varphi) \quad (37)$$

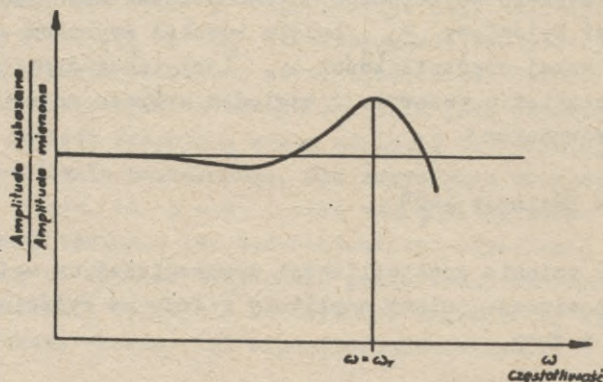
Innymi słowy zmianie częstotliwości wymuszającej na wejściu układu pomiarowego odpowiadają zmiany amplitudy i fazy na wyjściu, zwane błędami amplitudy i fazy.



#### 4.3.1. Charakterystyki dynamiczne - błędy dynamiczne

Wierność odtwarzania przez układ pomiarowy przebiegów dynamicznych określa się za pomocą charakterystyk dynamicznych. Charakterystyki te podawane są w postaci transmitancji względnie stałej przenoszenia w funkcji częstotliwości, częściej jako charakterystyki widmowe lub odpowiedzi na funkcję jednostkową. Nie wchodząc we współzależność między tymi rodzajami charakterystyk można stwierdzić, że służą one do określenia błędów dynamicznych układu pomiarowego /przyrządu/. Błędy te ujawniają się, jak już wspomniano, w postaci zniekształceń amplitudy i fazy mierzonego przebiegu.

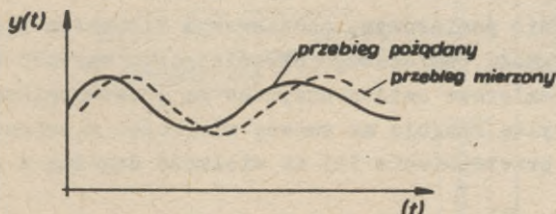
- Błąd amplitudy polega na zmniejszeniu lub zwiększeniu /w stosunku do wartości prawdziwej/ amplitudy wskazań przyrządu, w miarę zbliżania się częstotliwości mierzonej do jego częstotliwości własnej. Na rys.I-10 przedstawiono przebieg charakterystyki amplituda - częstotliwość, ujawniającej zależność amplitudy od zakresu zmian częstotliwości. Liczbowe wartości błędu amplitudy określane są przez podanie przedziału częstotliwości, w którym zniekształcenie amplitudy nie przekracza określonej wartości w procentach /zniekształcenia amplitudy w zależności od częstotliwości są często podawane w skali decybelowej/.



Rys.I.10. Ilustracja zmiany błędu amplitudy w funkcji częstotliwości mierzonej



- Błąd fazy polega na równoległym przesunięciu w czasie przebiegu rejestrowanego w stosunku do przebiegu rzeczywistego. Zjawisko to zostało przedstawione na rys. I-11. Błąd fazy, podobnie jak błąd amplitudy, uzależniony jest od stosunku częstotliwości mierzonej do częstotliwości własnej przyrządu pomiarowego. Błąd ten jest podawany w danych technicznych przyrządu niezmiernie rzadko. Wynika to m.in. z faktu, że jego uwzględnienie jest konieczne jedynie przy pomiarze kilku parametrów równocześnie.



Rys. I-11. Ilustracja błędu fazy

Dokładna analiza zasygnalizowanych tu zagadnień jest problemem bardzo trudnym i złożonym, jest przedmiotem badań teorii automatycznej regulacji i przekracza ramy tego opracowania. Zainteresowanym poleca się pozycje [46], [62], [68], [74], [75], [76] załączonego wykazu literatury.



## Rozdział II

## CZUJNIKI POMIAROWE - PRZETWORNIKI

W każdym układzie pomiarowym, podstawowym elementem jest czujnik stanowiący źródło sygnału pomiarowego, określającego wartość badanego parametru. Czujniki pomiarowe często nazywane są przetwornikami z tego względu, że nie tylko reagują na zmianę wielkości mierzonej, lecz jednocześnie powodują przetwarzanie jej na wielkość dogodną w procesie pomiarowym.

Czujniki pomiarowe można podzielić na dwie zasadnicze grupy: czujniki elektryczne i nieelektryczne. W grupie czujników elektrycznych wyróżnia się dwie odmiany:

- czujniki parametryczne /bierne/, w których wielkość mierzona powoduje zmianę wartości wielkości elektrycznej, takiej jak rezystancja, indukcyjność, pojemność. Czujniki te wymagają zasilania;
- czujniki generacyjne /czynne/, w których wielkość mierzona powoduje powstanie siły elektromotorycznej, czyli czujniki te są źródłami prądu elektrycznego.

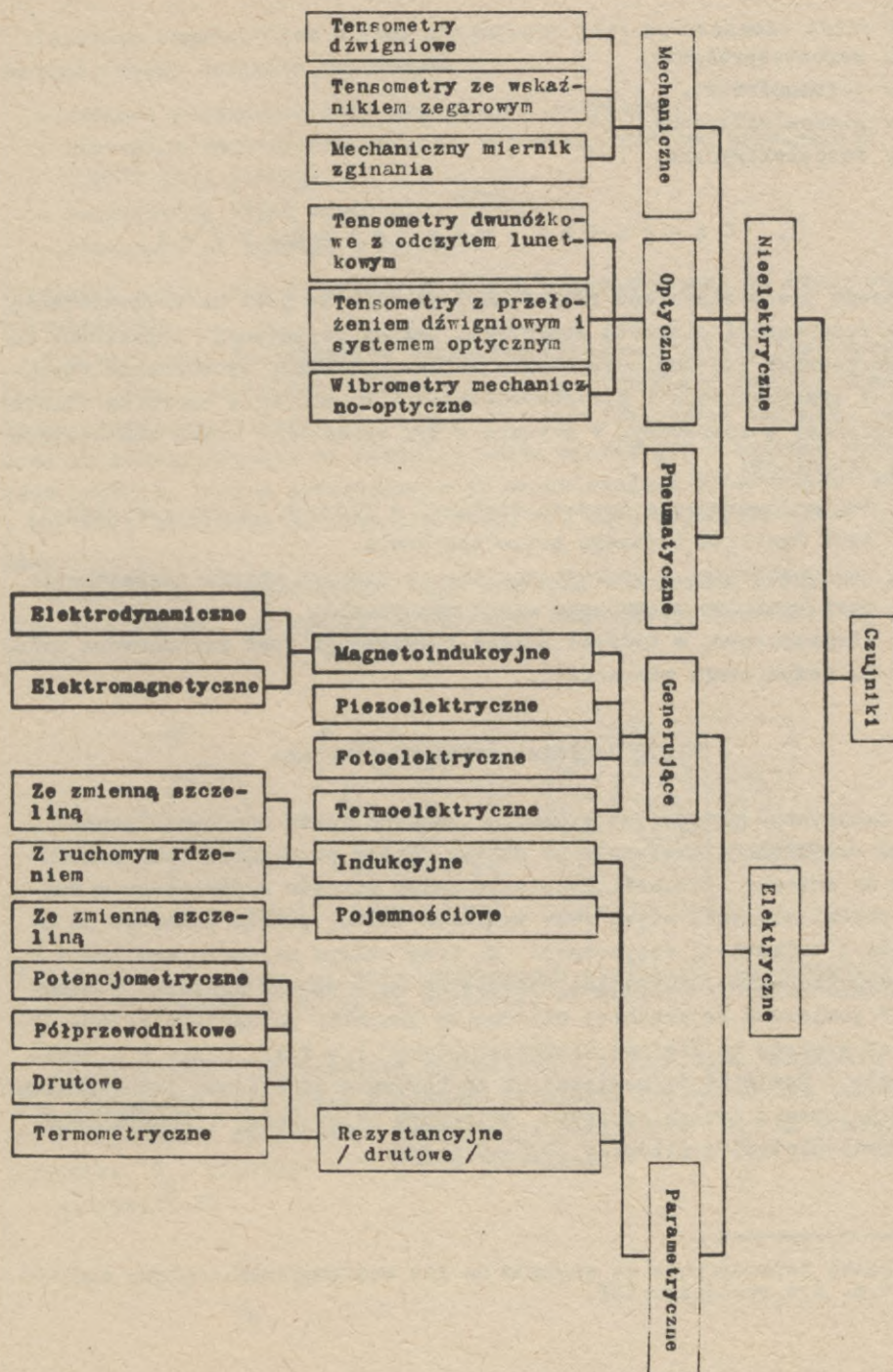
W grupie czujników nieelektrycznych można wyróżnić trzy odmiany: czujniki mechaniczne, optyczne i pneumatyczne. W tablicy IV zestawiono główne typy czujników pomiarowych wg podanego podziału.

W miernictwie parametrów mechanicznych maszyn i urządzeń najpowszechniejsze zastosowanie znalazły układy pomiarowe oparte na elektrycznym systemie przetwarzania przy wykorzystaniu czujników elektrycznych. Aktualnie istnieje duża różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych tych czujników, różniących się tak pod względem zasady działania, jak i zastosowania do pomiaru danych parametrów w określonych warunkach z zadowalającą dokładnością.

Zakres niniejszego opracowania narzucił konieczność omówienia tylko wybranych czujników elektrycznych, mających zastosowanie w pomiarach technicznych i laboratoryjnych maszyn roboczych; są to czujniki:

- 1/ rezystancyjne,
- 2/ indukcyjne,
- 3/ magnetoindukcyjne,







- 4/ magnetosprężyste,
- 5/ pojemnościowe,
- 6/ piezoelektryczne,
- 7/ fotoelektryczne.

## 1. C z u j n i k i   r e z y s t a n c y j n e

Zasada pracy czujników rezystancyjnych oparta jest na wykorzystaniu zmian rezystancji elementu oporowego. Zmiany rezystancji uzyskiwane mogą być poprzez przesunięcie styków wzdłuż opornika, wytworzenie naprężenia w przewodnikach i półprzewodnikach, albo poddanie opornika działaniu zmiennej temperatury. W związku z tym wyodrębnić można następujące grupy czujników:

1. Potencjometryczne oporowo-stykowe, w których zmiana rezystancji jest wynikiem badanego przemieszczenia.
2. Tensometryczne i oporowo-węglowe, w których zmiana rezystancji jest wynikiem mierzonego stanu naprężenia.
3. Termooporowe, w których zmiana rezystancji jest spowodowana zmianą temperatury mierzonej\*.

### 1.1. Czujniki potencjometryczne

W czujnikach potencjometrycznych, zwanych także oporowo-stykowymi, zmiana rezystancji następuje na skutek zmiany położenia styku przesuwanego na ścieżce oporowej. Powstanie zatem sygnału wyjściowego w funkcji przemieszczenia styku jest wynikiem zmiany punktu podziału na oporniku o całkowitej rezystancji  $R_c$  przy stałym napięciu zasilania  $U_z$ .

Czujniki potencjometryczne wykonywane są w wersji drutowej i masowej. W pomiarach najczęściej używane są czujniki potencjometryczne drutowe ze względu na liniową charakterystykę  $R = f/x$ ; gdzie  $x$  - przesunięcie. Czujniki te nawijane są na karkasie profilowym jednowarstwowo patentowanym drutem oporowym, wykonanym najczęściej z konstantanu lub irydo-platyny o średnicy (0,05-0,5) [mm].

---

\* Czujniki termooporowe ze względu na ich zastosowania zostaną omówione w p. 8,4 rozdziału III.



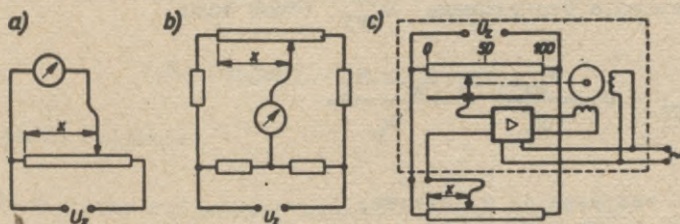
Istotnym zagadnieniem w tych czujnikach jest rozwiązanie styku ślizgowego, który powinien zapewniać:

- pewność połączenia przy drganiach i wstrząsach,
- minimalną wartość siły tarcia, która nie powinna przekraczać  $5 \cdot 10^{-2}$  [N]; ( $\sim 5$  [G]),
- rezystancję styku rzędu 0,01 [ $\Omega$ ],
- odporność na korozję i zużycie.

W związku z tym jako materiały na styki wykorzystywane są stopy metali szlachetnych.

W odniesieniu do czujników potencjometrycznych celowe jest wprowadzenie pojęcia zdolności rozdzielczej jako minimalnej różnicy między dwoma przemieszczeniami, które mogą być przejęte przez czujnik. Zdolność ta zależy głównie od średnicy drutu oporowego, z którego wykonany jest czujnik, bowiem przemieszczenia odpowiadające przesunięciu suwaka o wartości mniejszej od średnicy drutu nie są przejmowane przez czujnik.

Czujniki potencjometryczne mogą pracować w układach dzielnika napięcia lub mostka, jak również w układach śledzących; ilustruje to rys. II-1.



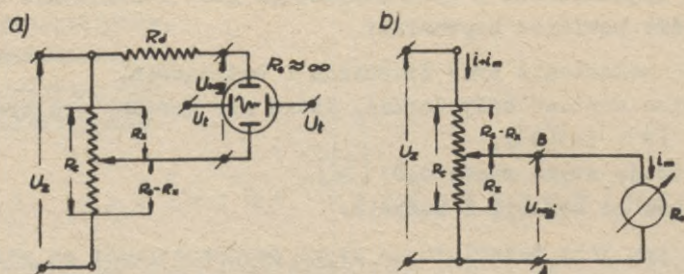
Rys.II-1. Przykłady układów pomiarowych czujników potencjometrycznych: a/ dzielnik napięcia, b/ mostek, c/ układ śledzący

Najprostszym i najczęściej stosowanym dla tego typu czujników układem pomiarowym jest układ oporowego dzielnika napięcia. Dla tego układu w zależności od stosunku rezystancji obciążenia  $R_o$  do rezystancji czujnika  $R_c$  rozważyć należy dwa przypadki:

a/ rys.II-2a

$$\text{przy } \frac{R_o}{R_c} \gg 1 \quad (1)$$





Rys.II-2. Schematy pomiarowe czujników potencjometrycznych, pracujących w układzie dzielnika napięcia: a/ dla  $\frac{R_0}{R_c} \gg 1$ , pomiar przy użyciu oscyloskopu katodowego, b/ dla  $\frac{R_0}{R_c} \gg 1$ , pomiar przy użyciu przyrządu wychyłowego

rezystancja wyjściowa  $R_{wyj}$  między zaciskami wyjściowymi czujnika jest funkcją przesunięcia  $x$  styku ślizgacza;

$$R_{wyj} = R_d + R_x \quad (2)$$

a wartość napięcia wyjściowego  $U_{wyj}$  równa się:

$$U_{wyj} = U_z \frac{R_{wyj}}{R_c} = \frac{R_x + R_d}{R_c} \quad (3)$$

gdzie:  $R_d$  - rezystancja dodatkowa;

b/ rys.II-2b

$$\text{przy } \frac{R_0}{R_c} \gg 1 \quad (4)$$

rezystancja wyjściowa  $R_{wyj}$  wyraża się wzorem:

$$\frac{1}{R_{wyj}} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_x} \quad (5)$$

a rezystancja zastępcza:

$$R_z = (R_c - R_x) + \frac{R_x \cdot R_0}{R_x + R_0} \quad (6)$$



Wartość napięcia wyjściowego  $U_{wyj}$  wynosi:

$$U_{wyj.} = U_z \frac{R_x}{\frac{(R_c - R_x)(R_x + R_o)}{R_o} + R_x} \quad (7)$$

Można wykazać, że dla  $R_o \gg R_c$  powyższa zależność po rozpisaniu sprowadzi się do postaci pokazanej we wzorze (3). Wartości rezystancji  $R_c$  czujników potencjometrycznych są różne i w zależności od konstrukcji wynoszą od  $5[\Omega]$  do  $1[k\Omega]$ , natomiast wartość rezystancji obciążenia  $R_o$  zależy od typu zastosowanego do pomiaru przyrządu wyjściowego i waha się od  $1[k\Omega]$  dla typowego woltomierza do  $10[M\Omega]$  dla oscyloskopu katodowego.

Czujniki potencjometryczne stosowane są do przetwarzania wielkości mechanicznych na sygnał elektryczny, w warunkach pomiarów statycznych lub wolnozmiennych /poniżej  $3[Hz]$ /. Ze względu na prostą budowę, tanią i znaczną niezawodność działania czujniki te stosuje się powszechnie w układach pomiarowych /gdzie nie jest wymagana duża dokładność/ oraz w układach automatyki przemysłowej.

## 1.2. Czujniki tensometryczne

### 1.2.1. Zasada działania

W czujnikach tensometrycznych wykorzystywana jest znana zależność:

$$R = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \quad (8)$$

gdzie:  $R$  - rezystancja,

$l, S, \rho$  - odpowiednio: długość, pole przekroju poprzecznego i rezystywność drutu.

Poddając drut rozciąganiu lub ściskaniu, jego długość i przekrój poprzeczny zmieniają się, zmianie ulega także rezystywność materiału drutu, co w efekcie powoduje zmianę rezystancji. Zmianę rezystancji  $R$  można przedstawić jako różniczkę zupełną:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial S} dS + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \quad (9)$$



Rozwiązując powyższe równanie oraz korzystając z podstawowych zależności wytrzymałościowych, po szeregu przekształceń otrzymuje się:

$$\frac{dR}{R} = \left(1 + 2\nu + \frac{d\varrho}{\varrho \cdot \varepsilon}\right) \cdot \varepsilon \quad (10)$$

gdzie:  $\nu$  - stała Poissona

$\varepsilon$  - wydłużenie względne.

$$\text{Oznaczając: } 1 + 2\nu + \frac{d\varrho}{\varrho \cdot \varepsilon} = k \quad (11)$$

oraz przyjmując  $dR \approx \Delta R$ , otrzyma się ostatecznie związek:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (12)$$

Zatem względny przyrost rezystancji  $\frac{\Delta R}{R}$  jest wprost proporcjonalny do wydłużenia względnego  $\varepsilon$ , a współczynnikiem proporcjonalności jest stała  $k$ .

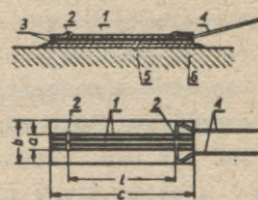
Zależność (12) stanowi podstawowe równanie tensometrii, wiążąc mechaniczne i elektryczne parametry. Jednakże będzie ono miało taki sens dopiero wtedy, gdy czujnik tensometryczny pomyślany jako drut oporowy /patrz p. 1.2.2. tego rozdz./ zapewni jednoznaczne przeniesienie odkształceń badanej powierzchni na jego własne odkształcenie. Warunek ten może być zrealizowany np. poprzez naklejenie elementu pomiarowego, zwanego tensometrem, na badaną powierzchnię za pomocą specjalnego kleju. Występującą w równaniach (11), (12) stałą  $k$  nazywa się współczynnikiem czułości odkształceniowej lub krótko stałą tensometru, i jak widać ze wzoru (11) jest ona wielkością zależną głównie od rodzaju materiału, z którego wykonany jest czujnik. Dla czujników tensometrycznych metalowych zawarta jest ona w granicach od 1,2 do 3,0.

### 1.2.2. Typy tensometrów

Stosowanie tensometrii rezystancyjnej nie tylko do badań wytrzymałościowych, lecz wykorzystywanie jej również w innych dziedzinach pomiarów, a w szczególności przy pomiarach takich wielkości mechanicznych, jak siła, ciśnienie, drgania itd., spowodowało powstanie szeregu typów i odmian tensometrów.



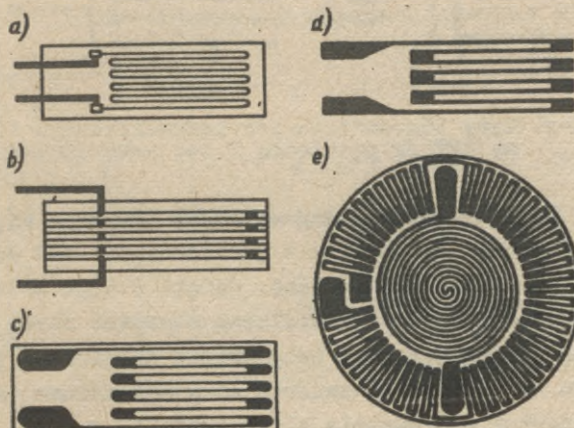
Do najpowszechniej stosowanych należą czujniki tensometryczne drutowe w wersji kratkowej - rys.II-3. Wykonane są one z szeregu równoległych drucików konstantanowych lub niklowych (1) o średnicy  $(10 \div 50) [\mu\text{m}]$  połączonych w odpowiedni sposób znacznie grubszymi odcinkami taśmy miedzianej (2). Ukształtowana w ten sposób siatka oporowa, wraz z drucikami doprowadzającymi (4), stanowi obwód elektryczny tensometru, a odległość  $l$  między przeciwległymi taśmami wyznacza jego bazę pomiarową. Cała siatka oporowa wklejona jest między dwie warstwy folii ze sztucznego tworzywa lub papieru (3) przy użyciu specjalnego kleju. Tensometry drutowe wykonuje się również w wersji wężykowej /rys.II-4a/ lub zygzakowej. Odmiany te są jednak coraz rzadziej stosowane ze względu na to, iż w odróżnieniu od kratkowych wykazują czułość ukształtzeniową w kierunku prostopadłym do kierunku drucików.



Rys.II-3. Przykład budowy czujnika tensometrycznego typu kratkowego: 1/ druciki oporowe, 2/ odcinki taśmy miedzianej, 3/ nakładka i podkładka, 4/ druty o przewodzeniowe, 5/ warstwa kleju, 6/ obiekt badany

Najczęściej spotykane wymiary tensometrów drutowych mieszczą się w trzech grupach długości baz: małej  $(2 \div 7) [\text{mm}]$ , średniej  $(10 \div 30) [\text{mm}]$  i dużej  $(30 \div 150) [\text{mm}]$ . Rezystancje tensometrów dla tych trzech grup są zawarte odpowiednio w granicach  $(50 \div 100) [\Omega]$ ,  $(100 \div 400) [\Omega]$  oraz powyżej  $400 [\Omega]$ . Dopuszczalna wartość prądu płynącego przez tensometr nie przekracza zwykle  $(10 \div 50) [\text{mA}]$ , a dopuszczalna temperatura pracy dla wykonan normalnych waha się od  $-40 [^{\circ}\text{C}]$  do  $+80 [^{\circ}\text{C}]$ .

Odmienne typy stanowią tensometry foliowe - rys.II-4c,d,e, w których zamiast siatki z drutu znajduje się folia oporowa, wykonana najczęściej



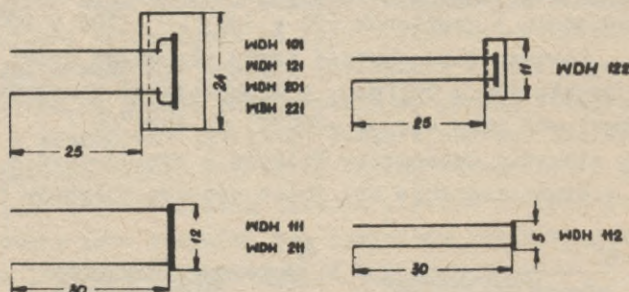
Rys.II-4. Rodzaje tensometrów rezystancyjnych metalowych: a/ wężykowy, b/ kratkowy, c,d/ foliowy, e/ membranowy



z konstantanu o grubości  $(5 \div 10)[\mu\text{m}]$ . Kształtowanie ścieżki oporowo-labiryntowej odbywa się w tym przypadku przy użyciu technologii zbliżonej do produkcji obwodów drukowanych /techniką fotograficzną/.

Zarówno tensometry drutowe, jak i foliowe charakteryzują się w czasie pomiaru stałą wartością współczynnika czułości odkształceniowej  $k$  i jak już wspomniano, wartość ta dla różnych tensometrów może być różna i zawiera się w granicach od 1,2 do 3,0. Dużą zaletą tensometrów foliowych jest możliwość zaprojektowania i wykonania czujników specjalnych pod kątem optymalnej pracy w pewnych nietypowych zagadnieniach pomiarowych /czujniki membranowe/, jak również możliwość produkcji czujników subminiaturowych.

Do najnowszych rozwiązań w dziedzinie tensometrii rezystancyjnej zaliczyć należy tensometry półprzewodnikowe, wykonane na bazie germanu lub krzemu/rys. II-5/. Działanie czujnika tensometrycznego półprzewodnikowego opiera się na odkrytym przez Smitha efekcie zmiany konduktancji /przewodności elektrycznej/ w kryształach pod wpływem naprężenia wywołanego wzdłuż jednej z osi krystalizacji. Wielkość efektu tensometrycznego uzależniona jest głównie od rodzaju kryształu i kierunku krystalizacji. Tensometry półprzewodnikowe pozwalają na poszerzenie możliwości doświadczalnej analizy naprężeń o pomiar nieosiągalnie małych /ze względu na próg czułości/ naprężeń. Podstawowymi bowiem ich własnościami



Rys.II-5. Typy tensometrów półprzewodnikowych firmy RFT /z podkładką i bez podkładki nośnej/

mi odróżniającymi je od tensometrów drutowych czy foliowych są: bardzo wysoka czułość odkształceniowa  $k$  zawarta w granicach od -100 do +200 oraz miniaturowe wymiary. Są to właściwości, dzięki którym istnieje możliwość dokładnego pomiaru bardzo niewielkich naprężeń rzędu kilku  $\left[\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}\right]$ . Powszechne jednak stosowanie tych tensometrów utrudnione jest między innymi ze względu na to, że ich czułość odkształceniowa  $k$  zależy od stanu naprężeń w elemencie półprzewodnikowym.



Dalszy postęp w dziedzinie tensometrii stanowią elementy cienkowarstwowe, powstałe przez napylenie metalu, np. na czyste podłoże izolacyjne. Element taki mierzy odkształcenie podłoża bez udziału materiałów pośredniczących /kleju/, co stanowi ich wielką zaletę. W chwili obecnej brak jest bliższych danych o właściwościach tych elementów, ponieważ znajdują się one na etapie opracowań laboratoryjnych.

### 1.2.3. Układ podstawowy i metoda pomiaru

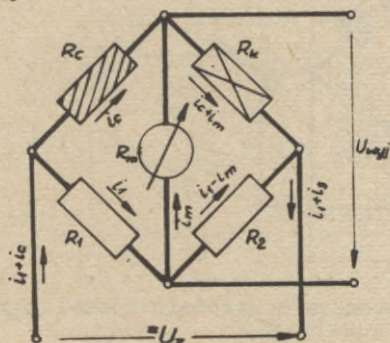
W pomiarach tensometrycznych wykorzystuje się podstawową zależność wiążącą parametry mechaniczne i elektryczne w postaci:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon = k \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (13)$$

Dla przykładu: przyjmując czujnik tensometryczny o rezystancji  $R = 100[\Omega]$ , stałej  $k = 2$ , wielkości odkształcenia  $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$  /co odpowiada naprężeniu dla stali  $\sigma \approx 10 \left[ \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \right]$ ;  $\left( 100 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \right)$  niewielką zmianę rezystancji;

$$\Delta R = k \cdot \varepsilon \cdot R = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 100 = 0,1[\Omega]$$

Oczywiście, aby możliwy był pomiar w tym zakresie, układ pomiarowy musi praktycznie wykrywać zmiany jeszcze mniejsze - rzędu setnych części oma. Konieczność dokładnego pomiaru tak niewielkich zmian rezystancji debyduje o tym, że podstawowym układem pomiarowym jest układ mostka Wheatstone'a /zasilany prądem stałym lub zmiennym/. Układ ten bowiem pozwala na łatwe skompensowanie wpływów zewnętrznych /w tym głównie wpływu temperatury/, które decydują w znacznej mierze o dokładności pomiaru.



$$\begin{aligned} 1) & i_1 R_1 + (i_1 - i_m) R_2 = U \\ 2) & i_1 R_1 + i_m R_m - i_2 R_3 = 0 \\ 3) & i_m R_m + (i_2 + i_m) R_4 - (i_1 - i_m) R_2 = 0 \end{aligned}$$

$$i_m = U \cdot \frac{R_3 R_4 - R_1 R_2}{R_m (R_2 + R_4) (R_1 + R_3) + R_3 R_4 (R_1 + R_2) + R_1 R_2 (R_3 + R_4)}$$

$$i_m = 0 \text{ dla } R_3 R_2 - R_1 R_4 = 0$$

Rys.II-6. Schemat mostka Wheatstone'a



Na rys. II-6 przedstawiono schemat elektryczny mostka Wheatstone'a wraz z podaniem równań dla poszczególnych jego gałęzi. Jak łatwo zauważyć, warunkiem równowagi mostka jest równość iloczynów rezystancji w jego gałęziach przeciwległych:

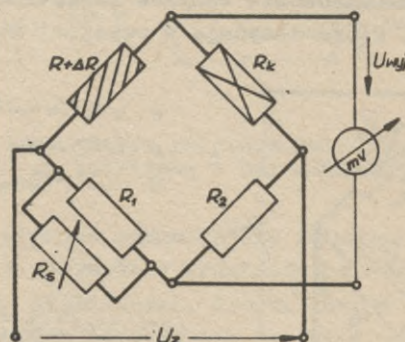
$$R_c \cdot R_2 = R_k \cdot R_1 \quad (14)$$

Jeżeli nastąpi zmiana rezystancji któregośkolwiek z oporników, galwanometr włączony w przekątną pomiarowej wskaże przepływ prądu o wartości proporcjonalnej do tej zmiany. Podobnie, jeżeli w gałąź mostka włączony zostanie czujnik tensometryczny, czyli element o zmiennej rezystancji zależnej od odkształcenia, a układ mostka zostanie sprowadzony wstępnie do równowagi /na galwanometrze odczyt zero/, to po odkształceniu tensometru zmieni się wartość iloczynu  $R_c \cdot R_2$  a, co za tym idzie, przez galwanometr popłynie prąd, którego wartość będzie proporcjonalna do odkształcenia.

Sygnały pomiarowe pojawiające się na mostku Wheatstone'a /ze względu na małe wartości napięć rzędu kilku miliwoltów i natężeń prądu rzędu mikroamperów/ wymagają zawsze odpowiedniego wzmocnienia. W tym celu stosuje się wzmacniacze lampowe lub tranzystorowe, których zadaniem jest wzmocnienie sygnału przed podaniem go na przyrząd wskazujący lub rejestrujący.

W pomiarach tensometrycznych wartość sygnału wyjściowego może być określana metodą zerową lub metodą wychyłową.

- Metoda zerowa polega na skompensowaniu rozrównoważenia mostka, powstałego w wyniku zmiany rezystancji tensometru. Może to być realizowane w układzie jak na rys. II-7, poprzez zmianę rezystancji  $R_g$  doda-



Rys. II-7. Równoważenie mostka Wheatstone'a w układzie równoległym

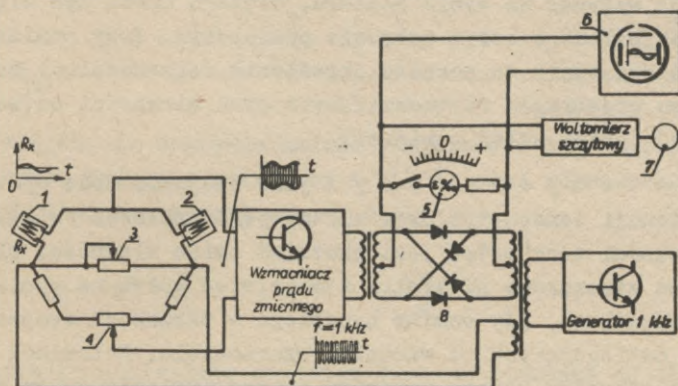


tkowego opornika aż do momentu uzyskania stanu równowagi mostka. Dzięki temu, że opornik  $R_g$  jest skalowany w jednostkach odkształcenia, mierzona wartość rozrównoważenia mostka  $\Delta R_g$  stanowi bezpośrednio miarę mierzonego odkształcenia  $\varepsilon$  tensometru. Ze względu na wymaganą dużą dokładność /ustawienia/ opornik  $R_g$  włączany jest równolegle z opornikiem  $R_1$  przy równoczesnym spełnieniu warunku  $R_g \gg R_1$ .

- Metoda wychyłowa natomiast polega na pomiarze rezystancji  $\Delta R$  tensometru na podstawie określenia wielkości prądu płynącego przez galwanometr.

Porównując te dwie metody można stwierdzić, iż większą dokładność uzyskać można przy metodzie zerowej ze względu na to, że rezultat pomiaru nie jest zależny od przypadkowych zmian czułości lub nieliniowości miernika.

Stosowanie metody zerowej możliwe jest jednak tylko w przypadkach pomiarów statycznych, tzn. takich, w których stan naprężenia czy odkształcenia pozostaje stały w pewnym znacznym przedziale czasu. Wady tej nie posiada metoda wychyłowa, pozwalająca na ciągłą obserwację lub rejestrację zarówno przebiegów statycznych jak i przebiegów dynamicznych /szybkochylnych/. Sygnały pomiarowe pojawiające się na wyjściu mostka, przy tej metodzie, po wzmocnieniu kierowane są do urządzenia rejestrującego lub wskazującego, które musi nadążyć za zmianami wielkości mierzonej - rys.II-8. Najczęściej stosuje się różnego rodzaju rejestratory piszące, mechaniczne lub elektrooptyczne /oscylografy pętlicowe/.



Rys.II-8. Układ blokowy mostka tensometrycznego, zasilanego napięciem zmiennym: 1 - tensometr pomiarowy, 2 - tensometr kompensacyjny, 3 - nastawienie czułości, 4 - wstępne zerowanie mostka, 5 - miernik wyskalowany w  $10^{-6}$  odkształcenia względne  $\varepsilon$ , 6 - oscyloskop, 7 - miernik wyskalowany w wartościach odkształcenia względnego  $\varepsilon$ , 8 - detektor



Główną trudność stanowi tu fakt obarczenia wyników pomiarów błędem, wynikającym z obciążenia wyjścia wzmacniacza rezystancją wejściową rejestratora oraz błędem samego urządzenia rejestrującego.

Wzmacniacz pomiarowy wraz z zasilaczem oraz układem do kalibracji i kompensacji nosi nazwę "mostka tensometrycznego". Typ stosowanego mostka tensometrycznego zależy w głównej mierze od rodzaju prowadzonych pomiarów: statycznych czy dynamicznych. Wymienić tu należy, jako zasadnicze, dwie grupy przyrządów:

- mostki tensometryczne do pomiarów statycznych, na ogół przystosowane do pomiarów wielopunktowych, z wbudowanym przyrządem /wskaźnikiem/ wychyłowym,
- wielokanałowe mostki tensometryczne do pomiarów statycznych i dynamicznych, przystosowane do równoczesnego pomiaru w kilku punktach pomiarowych, przeznaczone do współpracy z osobnym urządzeniem rejestrującym /np. oscyloskop katodowy, oscylograf pętlicowy, przyrząd cyfrowy/.

#### 1.2.4. Wpływ różnych czynników na dokładność pomiaru

Sygnał pomiarowy z czujnika tensometrycznego może być obciążony pewnymi błędami, które wynikać mogą zarówno z jego budowy, jak również z czynników zewnętrznych. Jako najważniejsze czynniki wymienić tu należy: wpływ temperatury, wilgotności, peźzania kleju, rezystancji i pojemności linii przesyłowej, oraz różnice rezystancji i stałych  $k$  poszczególnych tensometrów, ich obciążenie prądowe itp. Czynniki te mogą w znaczny sposób wpłynąć na wynik pomiaru, dlatego muszą być eliminowane bądź ściśle określone w całym zakresie pomiarowym. Przy pomiarach dynamicznych duże znaczenie ma ponadto określenie dopuszczalnej częstotliwości i wpływu przebiegów szybkozmiennych oraz wierności odtwarzania tych przebiegów przez układ pomiarowy.

W p ł y w t e m p e r a t u r y jest dwojaki, może spowodować zmianę rezystancji tensometru oraz zmianę jego czułości /stałej  $k$ /

Zmiana czułości tensometru jest skutkiem zmian własności kleju, jednakże jest ona stosunkowo niewielka i może mieć wpływ na wynik pomiaru jedynie w przypadkach, gdy pomiar przebiega w warunkach temperaturowych diametralnie odbiegających od warunków wzorcowania. Natomiast zmiana rezystancji tensometru, będąca wynikiem zmiany wymiarów drutu oporowego oraz jego rezystywności /oporności właściwej/, jest znaczna i musi być skompensowana w czasie pomiaru.



Wpływ temperatury na wartość rezystancji nie naklejonego tensometru określa wzór:

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_o \cdot \Delta t$$

gdzie:  $\alpha_o$  - współczynnik termicznej zmiany rezystancji, dla konstantu jest najniższy i wynosi  $\pm 2 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$ .

Korzystając ponadto ze znanej zależności (13)

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon = k \cdot \frac{\sigma}{E}$$

porównać można wpływ temperatury z wpływem naprężenia na zmianę rezystancji czujnika:

$$\alpha_o \cdot \Delta t = k \frac{\sigma}{E} \quad (16)$$

stąd

$$\sigma_t = \frac{\alpha_o \cdot \Delta t \cdot E}{k} \quad (17)$$

Jeżeli przyjąć:  $k = 2$ ;  $E = 2,1 \cdot 10^{11} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$ ;  $\left( \sim 2,1 \cdot 10^6 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \right)$   
oraz  $t = [^\circ\text{C}]$ ; to

$$\sigma_{(t)} = \frac{\pm 2 \cdot 10^6 \left[ \frac{1}{^\circ\text{C}} \right] \cdot 1 [^\circ\text{C}] \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]}{2} = 2 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Stąd wynika, że względna zmiana rezystancji nie naklejonego tensometru, w wyniku zmiany temperatury o  $1 [^\circ\text{C}]$ , jest równoważna zmianie rezystancji wynikającej z poddania go naprężeniu

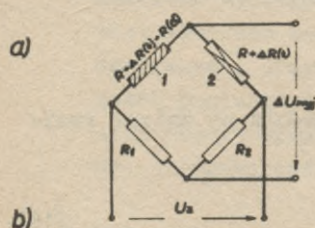
$$\sigma_t = \pm 2 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]; \quad \left( \sim \pm 2 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \right)$$

W przypadku naklejenia czujnika tensometrycznego na element badany wielkość ta stanie się źródłem błędu temperaturowego [43]. Wielkość  $\sigma_t$  nazywa się współczynnikiem równoważnego /ekwiwalentnego/ naprężenia temperaturowego; zależy ona nie tylko od rozszerzalności liniowej czujnika, lecz również od elementu badanego. Dla stali i czujnika wykona-



nego z konstantanu  $\epsilon_t$  osiągać może wartość  $\pm 8 \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]; \left( \sim \pm 8 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right] \right)$  na  $1[^\circ\text{C}]$ .

W pomiarach wpływ temperatury eliminowany jest przez stosowanie tensometrów kompensacyjnych łączonych w układ mostka Wheatstone'a z czujnikami czynnymi. Z warunku równowagi mostka wynika bowiem korzystna właściwość niereagowania układu w przypadku identycznych zmian rezystancji, występujących w przyległych gałęziach mostka. Zatem w celu eliminacji wpływu temperatury tensometr pomiarowy /czynny/ i tensometr kompensacyjny umieszcza się w przyległych gałęziach, przy zachowaniu równości ich rezystancji i czułości - rys.II-9a. Jeżeli spełnione są te warunki

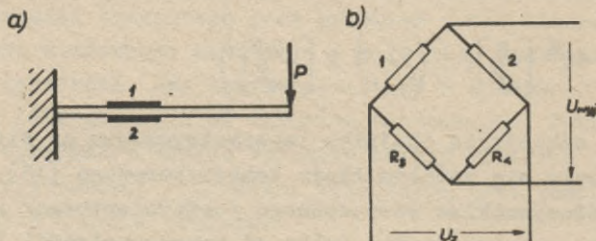


Rys.II-9. Ilustracja zasady kompensacji wpływu zmian temperatury otoczenia: a/ układ pomiarowy: 1 - tensometr czynny, 2 - tensometr kompensacyjny; b/ tensometr samokompensacyjny firmy Hottinger

oraz przebieg zmian temperaturowych jest identyczny dla obu tensometrów, układ jest nieczuły na wpływy temperatury.

W przypadku jednoosiłowego stanu naprężeń tensometr kompensacyjny naklejany jest drucikami prostopadle do kierunku naprężeń /niektóre firmy w tym celu produkują specjalne wersje tensometrów - rys.II-9b/.

Gdy stan naprężenia jest bliżej nieokreślony, tensometr kompensacyjny nakleja się na osobnej płytce /z tego samego materiału co materiał badanego przedmiotu/ umieszczonej w bezpośredniej bliskości tensometru czynnego. Zarówno w pierwszym, jak i w drugim przypadku tensometr kompensacyjny jest wolny od naprężeń pomiarowych. Ponadto w pomiarach stosowane są bardzo często tzw. układy samokompensujące, których tensometry kompensacyjne są równocześnie czynne, tj. podlegają naprężeniom pomiarowym. Ilustruje to przykład pomiaru naprężeń na belce zginanej, pokazany z układem pomiarowym na rys.II-10.



Rys.II-10. Przykład układu samokompensacyjnego w przypadku zginanej belki wysięgnikowej: a/ sposób naklejania tensometrów, b/ sposób połączenia tensometrów



W układzie tym odpowiednie przyrosty rezystancji wynoszą:

- dla tensometru  $T_1$

$$\Delta R_1 = k_1 \cdot R_1 \cdot \varepsilon_g + \Delta R_{1t} \quad (18)$$

- dla tensometru  $T_2$

$$\Delta R_2 = k_2 \cdot R_2 \cdot (-\varepsilon_g) + \Delta R_{2t} \quad (19)$$

gdzie:  $\Delta R_{1t}$ ;  $\Delta R_{2t}$  - zmiany rezystancji tensometrów  $T_1$  i  $T_2$  w wyniku zmiany temperatury,

$\varepsilon_g$  - wydłużenie względne będące wynikiem zginania.

Przy założeniu  $R_1 = R_2 = R$  oraz  $k_1 = k_2 = k$

$$\Delta R_{1t} = \Delta R_{2t}$$

Stosując układ połączeń tensometrów jak na rys.II-10 otrzymuje się:

$$\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2 = 2k \cdot R \cdot \varepsilon_g \quad (20)$$

lub

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \cdot k \cdot \varepsilon_g \quad (21)$$

Ze wzoru (21) wynika, że układ posiada podwojoną czułość i jest niezależny od wpływu temperatury. W dalszej części opracowania zostaną podane inne przykłady układów samokompensujących.

Drugim czynnikiem, który oprócz temperatury może być źródłem znacznych błędów pomiaru, jest wilgoć. Wilgoć przenikając z atmosfery do kleju powoduje pęcznienie kleju i osłabienie połączeń: klej - element badany - siatka oporowa. Jako kryterium zawilgocenia przyjmuje się zmianę rezystancji izolacji pomiędzy siatką oporową a obiektem badanym. Przy dobrze naklejonych i wysuszonych tensometrach powinna się ona zawierać w granicach od 50  $[M\Omega]$  do 200  $[M\Omega]$ . Należy jednak wspomnieć, że odporność tensometrów na zawilgocenie jest bardzo różna i zależy od typu tensometru oraz metody jego połączenia z aparaturą pomiarową. Praktycznie jednak można wykazać, że spadek rezystancji izolacji do 10  $[M\Omega]$  nie wpływa jeszcze w sposób istotny na błąd pomiaru.



Celem zabezpieczenia czujników przed wpływem wilgoci stosuje się pokrywanie czujnika i wyprowadzeń masą izolacyjną, odporną na wilgoć i absolutnie nieaktywną /wosk tensometryczny, wazelina techniczna, laki, guma ochronna/.

Pełzanie kleju powoduje pozorne lub trwałe odkształcenia, których wartość i czas powstawania zależą od temperatury i wydłużenia. Charakterystyczny jest tu proces stabilizacji po pewnym czasie. Zjawisko pełzania w wysokim stopniu zależy również od staranności przyklejenia tensometru i jakości kleju oraz czasu jego suszenia. Bezpośrednio po klejeniu, rezystancja tensometru i jego stała "k" ulegają zmianie pod wpływem procesu utwardzania kleju.

Konieczny do uwzględnienia z uwagi na dokładność pomiarów jest również wpływ rezystancji przewodów doprowadzających. Stanowią one bowiem dodatkowe oporniki rezystancyjne  $R_p$ , których wartość należy uwzględnić przy określeniu stałej k czujnika

$$\frac{\Delta R}{R + R_p} = k' \cdot \varepsilon \quad \text{gdzie} \quad k' < k \quad (22)$$

ponieważ

$$\frac{\Delta R}{\varepsilon} = k \cdot R$$

to

$$k' = k \frac{R}{R + R_p} \quad (23)$$

Jak to wynika ze wzoru (23) celowe jest stosowanie przewodów doprowadzających o jak najmniejszej rezystancji. Natomiast warunkiem koniecznym ze względu na dokładność pomiaru jest zastosowanie przy pomiarach przewodów doprowadzeniowych o tej samej rezystancji, w ramach danego punktu pomiarowego.

Wpływ przebiegów szybko-zmiennych. Charakterystycznym zjawiskiem jest w tym przypadku błąd amplitudy. Błąd ten można przedstawić jako pozorną zmianę stałej k. Przyjmując, że szybkozmiennie naprężenie rozchodzi się w postaci fali naprężeniowej o długości:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (24)$$



gdzie:  $c$  - oznacza prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku,  
 $f$  - częstotliwość fali,  
 $\lambda$  - długość fali.

nową stałą  $k''$  można wyznaczyć z zależności:

$$k'' = k \left( 1 - 0,4 \frac{1}{\lambda} \right) \quad (25)$$

gdzie:  $l$  - długość bazy czujnika tensometrycznego.

Przykładowo: dla  $l = 1$  [cm]  $f = 10$  [kHz],  $c = 5 \cdot 10^3$  [m/s] /prędkość dźwięku w stali/ oraz  $k = 2$  otrzymujemy:

$$k'' = 2 \left( 1 - 0,4 \frac{10^{-2} [\text{m}] \cdot 10^4 \left[ \frac{1}{\text{s}} \right]}{5 \cdot 10^3 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} \right) \approx 1,98.$$

#### 1.2.5. Wybrane uwagi dotyczące przygotowania pomiaru

W układzie pomiarowym, szczególnie przy pomiarze wielopunktowym /z 1.5. przełączeniem punktów pomiarowych/, należy stosować tensometry o jednakowej stałej tego samego typu i z jednej serii produkcyjnej. Dopuszczalne różnice rezystancji tensometrów dla układów połączeń: "półmostka" i "pełnego mostka" wynoszą średnio  $\pm 1\%$ , jeżeli żądana jest dokładność pomiaru  $\Delta \varepsilon = 0,005\%$ .

Dopuszczalna różnica współczynnika czułości " $k$ " tensometru jest różna i w zależności od rodzaju materiału mierzonego obiektu wynosi np.: dla miedzi  $\Delta k = 0,003$ , dla stali  $\Delta k = 0,05$ .

Klejenie i następujące po nim suszenie czujników tensometrycznych w sposób zasadniczy rzutuje na dokładność pomiarów. Wskazane jest przestrzeganie możliwie dokładnie wskazówek producenta tensometrów przy zastosowaniu klejów przez niego zalecanych. Ogólne wskazówki odnośnie do postępowania przy klejeniu tensometrów są następujące:

- a/ oczyścić dokładnie powierzchnię obiektu badanego drobnym papierem ściernym,
- b/ umyć i dobrze odtłuścić miejsce pomiarowe i jego okolicę acetonem /w żadnym przypadku nie dotykać palcami/,
- c/ nałożyć równomiernie cienką warstwę kleju a następnie wysuszyć,
- e/ d/ nałożyć taką samą warstwę kleju na tensometr i zaraz przyłożyć go na obiekt w miejscu i kierunku pomiaru,
- e/ wycisnąć bańki powietrza spod tensometru, uważając aby nie przesunąć, nie naciągnąć lub nie sfałdować tensometru,



- f/ docisnąć silnie tensometr do podłoża, np. klockiem gumowym,
- g/ suszyć minimum 6 godzin, najlepiej promiennikami podczerwieni /nie dotyczy klejów tensometrycznych szybko schnących/,
- h/ bezpośrednio po osuszeniu zabezpieczyć naklejony tensometr przed wilgocią, np. przez pokrycie go roztopionym woskiem.

Przed połączeniem naklejonych tensometrów z mostkiem należy sprawdzić ich rezystancję. Tensometry, których rezystancja wzrosła o więcej niż 2 % w stosunku do rezystancji przed klejeniem nie nadają się do pomiaru. Trzeba je usunąć i klejenie przeprowadzić ponownie. Następnie należy sprawdzić za pomocą megomierza rezystancję izolacji pomiędzy tensometrem a obiektem. Rezystancja ta powinna być większa od 10 [MΩ]. Nie zaleca się stosowania megomierzy indukcyjnych, napędzanych ręcznie.

Przewody łączące tensometr z mostkiem należy mocować do obiektu w bezpośredniej bliskości przyklejonego tensometru. Końce przewodów należy lutować do końcówek tensometrów używając do tego celu "tinolu", tj. rurki cynowo-ołowianej z rdzeniem z kalafonii. Nie wolno stosować do tego celu past lutowniczych, a tym bardziej kwasu do lutowania. Końcówki tensometru należy przed lutowaniem odpowiednio uformować.

Przewody łączące powinny być jednakowej długości o przekroju ok. 1 [mm<sup>2</sup>] w dobrej izolacji. Zaleca się wzajemne splecenie przewodów celem usunięcia wpływu obcych pól magnetycznych, zmian indukcyjności i pojemności. W przypadku obecności silnych pól konieczne okazuje się stosowanie kabli ekranowych. Kable takie wymagane są ponadto zawsze przy pomiarach dynamicznych i gdy długość linii przesyłowej przekracza 20 m. Rezystancja kabli nie powinna być większa niż 0,05 [Ω] na 1 [m].

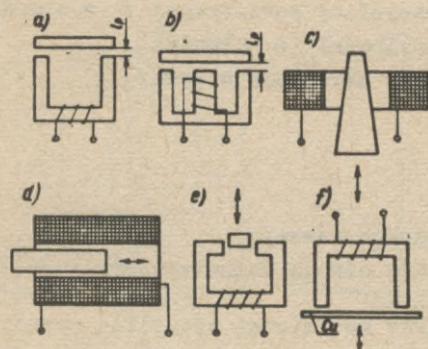
## 2. C z u j n i k i i n d u k c y j n e

Czujniki indukcyjne działają na zasadzie zmiany indukcyjności własnej  $L$  lub indukcyjności wzajemnej pod wpływem sygnału mierzonego /nieelektrycznego/ [7], [12], [29], [31], [34], [36], [37], [41]. Czujniki te wymagają zasilania napięciem zmiennym. W praktyce pomiarowej zmiana indukcyjności własnej  $L$  realizowana jest poprzez zmianę reluktancji /oporu magnetycznego/  $R_\mu$  obwodu czujnika.

W zależności od sposobu realizacji zmiany  $R_\mu$  /rys.II-11/ czujniki indukcyjne dzielą się na:

- czujniki o zmiennej szczelinie powietrznej /dławikowe/,
- czujniki solenoidalne z ruchomym rdzeniem,
- czujniki diamagnetyczne /wykorzystujące straty energetyczne w obwodzie na skutek powstania prądów wirowych/.





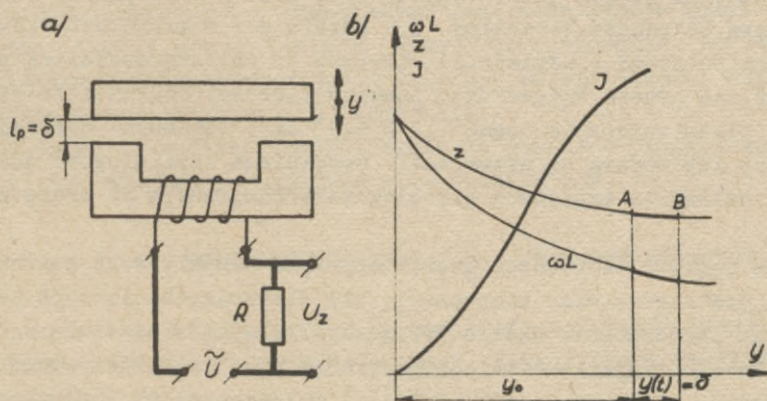
Rys. II-11. Schematy czujników indukcyjnych: a, b, e/ ze zmienną szczeliną powietrzną /dławikowe/, c, d/ z ruchomym rdzeniem /solenoidalne/, f/ z wykorzystaniem prądów wirowych w diamegnetyku

Czujniki pracujące na zasadzie zmiany indukcyjności wzajemnej dzielą się na:

- czujniki transformatorowe,
- selsyny,
- tachoprądnice asynchroniczne.

## 2.1. Czujniki o zmiennej szczelinie powietrznej /dławikowe/

Schemat najprostszego czujnika ze zmienną szczeliną powietrzną został przedstawiony na rys. II-12a. Czujnik składa się z elektromagnesu



Rys. II-12. Schemat czujnika indukcyjnego /dławikowego/ ze zmienną szczeliną powietrzną oraz jego charakterystyki: impedancji, reaktancji i prądów w funkcji przemieszczenia



oraz ruchomej zwory. Zmiana odległości między zworą a rdzeniem elektromagnesu, tj. zmiana szczeliny powietrznej  $\delta$  w obwodzie magnetycznym, powoduje zmianę indukcyjności  $L$  obwodu.

Indukcyjność  $L$  jest określona wzorem:

$$L = \frac{z^2}{R_\mu} \quad (26)$$

gdzie:  $z$  - liczba zwojów cewki,

$R_\mu$  - reluktancja obwodu magnetycznego  $\left[ \frac{1}{H} \right]$ .

W przypadku czujników ze zmienną szczeliną powietrzną reluktancja  $R_\mu$  wynosi w przybliżeniu:

$$R_\mu \approx \frac{\delta}{\mu_p \cdot S_p} \left[ \frac{1}{\Omega s} \right] \quad (27)$$

gdzie:  $\delta$ ,  $S_p$  - odpowiednio szerokość i pole przekroju szczeliny powietrznej,

$\mu_p$  - przenikalność magnetyczna szczeliny powietrznej  $[Hcm^{-1}]$ .

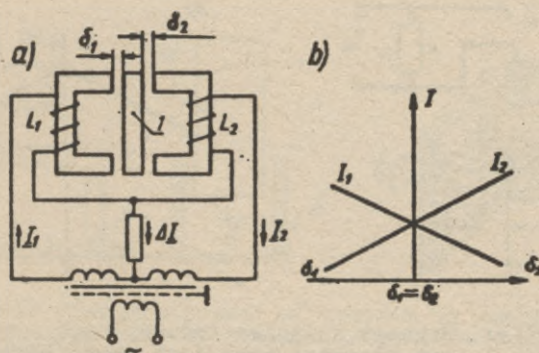
Wobec stałości w danym czujniku wielkości  $z$ ,  $\mu_p$ ,  $S_p$  z przytoczonych wzorów widoczne jest, że indukcyjność  $L$  czujnika jest funkcją jedynie szerokości szczeliny  $\delta$ .

Zależności  $L = f(\delta)$ ,  $Z = f(\delta)$  oraz  $I = f(\delta)$  przedstawiają charakterystyki pokazane na rys. II-12b. Ze względu na ich nieliniowość zakres pracy czujników dławikowych ogranicza się do niewielkiego odcinka (AB), na którym charakterystyki są praktycznie prawie liniowe, a początkową szerokość szczeliny  $\delta_0$  ustala się w granicach 0,1-0,5 [mm].

Głównymi zaletami czujników dławikowych ze zmienną szczeliną powietrzną jest ich prosta budowa oraz znaczna czułość. Czujniki te reagują bowiem na przemieszczenia rzędu 0,1 ÷ 0,5 [ $\mu m$ ]. Poważnymi niedogodnościami przy ich użyciu są natomiast: wspomniana nieliniowość charakterystyki i działanie znacznych sił elektromechanicznych na zworę czujnika.

Znaczną poprawę liniowości charakterystyki czujników ze zmienną szczeliną powietrzną oraz kompensację sił elektromechanicznych uzyskać można przez zastosowanie układu jak na rys. II-13. Przedstawia on schemat dławikowego czujnika różnicowego wraz z jego charakterystyką. Czujnik ten składa się z dwu cewek ( $L_1$ ) i ( $L_2$ ) połączonych w układzie różnicowym oraz wspólnej zwory /1/. Podczas pomiaru zwora podlega przesunięciu z położenia środkowego w lewo lub w prawo, wtedy jedna ze szczelin





Rys. II-13. Schemat czujnika indukcyjnego ze zmienną szczeliną powietrzną /dławikowego/, pracującego w układzie różnicowym  
a/ schemat, b/ charakterystyka prądowa

wzrasta, druga maleje. Tym samym zmieniają się indukcyjności i reluktancje odpowiednich cewek, co wpływa na zmiany wartości prądów  $I_1$ ,  $I_2$  płynących w ich obwodach. Dla przyjętego, jak na rys. II-13, układu połączeń czujnika ze wzrostem  $\delta_2$  prąd  $I_2$  wzrasta, natomiast  $I_1$  maleje, a przez miernik przepływa prąd o wartości:

$$\Delta I = I_1 - I_2 \quad (28)$$

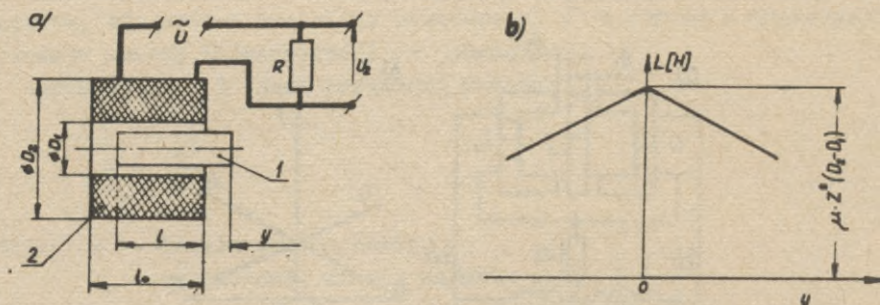
Jak to wynika z przytoczonej na rys. II-13b charakterystyki zmiany prądów pod wpływem zmiany długości szczeliny powietrznej  $\delta$  są prawie liniowe, co stanowi dużą zaletę tych czujników. Inną poważną zaletą czujników dławikowych - różnicowych jest kompensacja wpływów zewnętrznych, takich jak np. zmiana temperatury otoczenia, bowiem wpływy zewnętrzne w jednakowym stopniu działają na obie części czujnika i nie powodują zmiany różnicy ich impedancji.

Czujniki te znajdują zastosowanie do pomiarów przemieszczeń lub grubości, jak również do pomiarów sił, ciśnień itp.

## 2.2. Czujniki solenoidalne z ruchomym rdzeniem

W czujnikach tego typu wykorzystuje się zależność indukcyjności od położenia rdzenia ferromagnetycznego. Zasadę pracy czujnika przedstawiono na rys. II-14.





Rys. II-14. Schemat czujnika indukcyjnego z ruchomym rdzeniem oraz jego charakterystyka

Rdzeń (1), przesuwając się względem cewki (2) pod wpływem zmiany wielkości mierzonej, powoduje zmianę indukcyjności  $L$  obwodu cewki. Dla niewielkich przesunięć /tzn. w takim zakresie, że większa część rdzenia znajduje się wewnątrz cewki/ indukcyjność  $L$  w przybliżeniu wynosi:

$$L = \frac{z^2}{l_0} \mu (D_2 - D_1) \cdot l \quad [\text{H}] \quad (29)$$

gdzie:  $l_0, (D_2 - D_1)$  - długość i różnica średnic przekroju cewki; [cm]

$z$  - liczba zwojów cewki,

$l$  - zagłębienie rdzenia w cewkę; [cm],

$\mu$  - przenikliwość magnetyczna rdzenia; [ $\text{Hcm}^{-1}$ ].

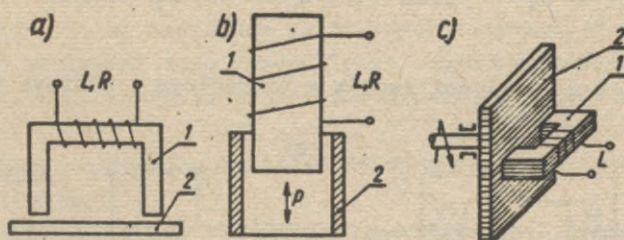
Ze względu na stałość dla danego czujnika wszystkich wielkości z wyjątkiem  $l$  indukcyjność  $L$  jest funkcją przesunięcia rdzenia. Zależność  $L = f(y)$  jest, jak to pokazuje rys. II-14b, w pewnym zakresie przesunięcia rdzenia funkcją liniową.

Czujniki tego typu służą głównie do pomiarów przesunięć. Znane są konstrukcje tych czujników, zabezpieczające pomiar w zakresie do  $\pm 100$  [mm]. Czujniki solenoidalne wykonuje się także w wersji różnicowej.

### 2.3. Czujniki diamagnetyczne

Na rys. II-15 przedstawiono przykładowo trzy wersje konstrukcyjne tych czujników. Zasada ich pracy polega na wykorzystaniu powstałych pod wpływem zmiennego pola magnetycznego prądów wirowych w materiale





Rys.II-15. Czujniki diamagnetyczne: a/ czujnik do pomiaru grubości blach diamagnetycznych, b/ czujnik do pomiaru poziomu lub wysokości, c/ czujnik do pomiaru kąta obrotu: 1 - rdzeń magnetyczny, 2 - blacha lub pierścień z diamagnetyku

diamagnetycznym. Natężenie prądów wirowych zależne jest od grubości diamagnetyku oraz od wielkości strumienia magnetycznego. Jeżeli zatem ulegnie zmianie jego grubość lub odległość od rdzenia cewki, wpłynie to na zmianę natężenia prądów wirowych i strumienia magnetycznego, powodując zmianę impedancji czujnika.

Czujniki te są stosowane do pomiarów przesunięć, grubości metali diamagnetycznych, grubości powłok galwanicznych itp.

#### 2.4. Czujniki transformatorowe

Czujniki transformatorowe należą do grupy czujników o zmiennej indukcyjności wzajemnej. Wykorzystywana jest tu zależność siły elektromotorycznej indukowanej z uzwojenia pierwotnego do wtórnego, w różnych warunkach sprzężenia obu uzwojeń.

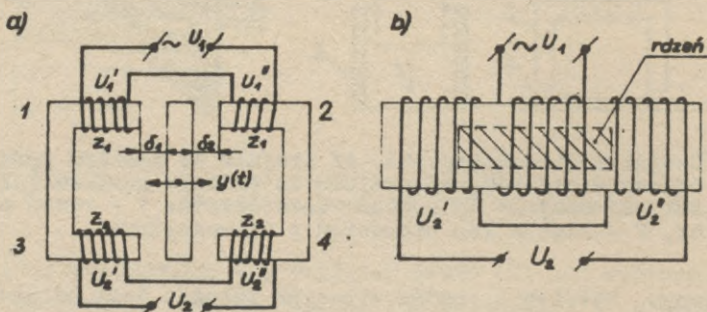
W czujnikach transformatorowych dokonuje się pomiaru SEM indukowanej w uzwojeniu wtórnym przy zasilaniu uzwojenia pierwotnego prądem zmiennym o częstotliwości  $(50 - 1000) \text{ [Hz]}$ . W czujnikach tych występuje hiperboliczna zależność między SEM a długością szczeliny  $l_p$ , podobnie jak w czujnikach dławikowych.

W pomiarach stosuje się chętniej czujniki transformatorowe w układzie różnicowym, które zapewniają liniowość charakterystyki. Przykład czujnika różnicowego transformatorowego został przedstawiony na rys. II-16a. W czujniku tym uzwojenia pierwotne połączone są szeregowo i zasilane prądem zmiennym. Uzwojenia wtórne (3), (4) połączone są przeciwnie i w uzwojeniach tych pod wpływem napięć  $U'_1$  i  $U''_1$  /uzwojeń pierwotnych/ indukują się napięcia  $U'_2$  i  $U''_2$ ;



$$U_2' = \frac{z_2}{z_1} U_1' \quad \text{oraz} \quad U_2'' = \frac{z_2}{z_1} U_1'' \quad (30)$$

przy czym:  $z_1$  i  $z_2$  - ilości zwojów w pierwotnym i wtórnym uzwojeniu.



Rys.II-16. Różnicowe czujniki transformatorowe: a/ ze zmienną szczeliną powietrzną, b/ z przesuwным rdzeniem

W czasie przemieszczeń zwory ulegają zmianie napięcia w uzwojeniach pierwotnych zgodnie ze wzorem:

$$\frac{U_1'}{U_1''} = \frac{L_1'}{L_1''} = \frac{\delta_2}{\delta_1} \quad (31)$$

gdzie:  $\delta_1, \delta_2$  - wielkości szczelin powietrznych,

$L_1', L_1''$  - indukcyjności cewek uzwojeń pierwotnych.

Ponieważ

$$U_1 = U_1' + U_1''$$

$$U_1' = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} U_1 \quad \text{oraz} \quad U_1'' = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} U_1 \quad (32)$$

Wobec przeciwnych połączeń cewek w uzwojeniu wtórnym

$$U_2 = U_2' - U_2'' \quad (33)$$

zatem

$$U_2 = \frac{z_2}{z_1} \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} U_1 \quad (34)$$



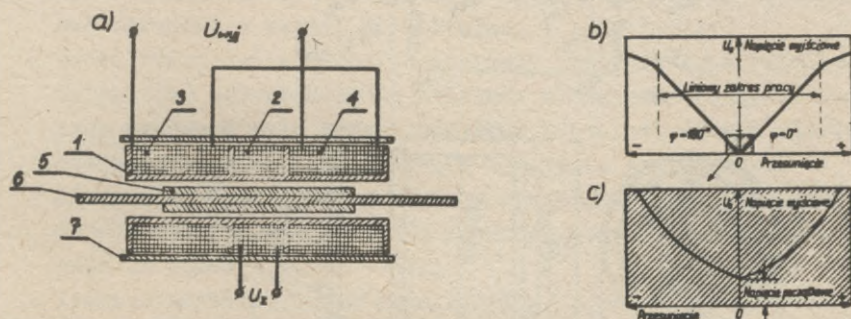
Wynika stąd, że gdy zwora znajduje się w miejscu gdzie  $\delta_1 = \delta_2$  na pięcie  $U_2 = 0$ . Przesunięcie zwory z położenia środkowego wywoła powstanie napięcia  $U_2$  na zaciskach wyjściowych czujnika, o wartości proporcjonalnej do wielkości tego przesunięcia. Podobne zależności można podać dla różnicowego czujnika transformatorowego z przesuwym rdzeniem - rys.II-16b.

Istnieje także możliwość połączenia uzwojeń nie przeciwsobnie, lecz w układzie mostkowym.

Czujniki transformatorowe - różnicowe są układami o dużej czułości, gdyż ich uzwojenia wtórne mogą być wykonywane o dużej liczbie zwojów. Przy użyciu tych czujników możliwy jest pomiar przemieszczeń rzędu dziesiątych części mikrona [34].

Ze względu na to, że siła działająca na rdzeń w położeniu środkowym jest minimalna, rzędu 0,01 [N]; ( $\sim 1$  [G]), czujniki transformatorowe - różnicowe mogą być uruchamiane prawie bez obciążenia obiektu badanego /np. wiotką membraną/.

Wspomniane zalety zadecydowały o tym, że czujniki te są obecnie bardzo szeroko stosowane. Dla przykładu na rys.II-17 pokazano charakterystykę i rozmieszczenie uzwojeń w transformatorowym czujniku przemieszczeń



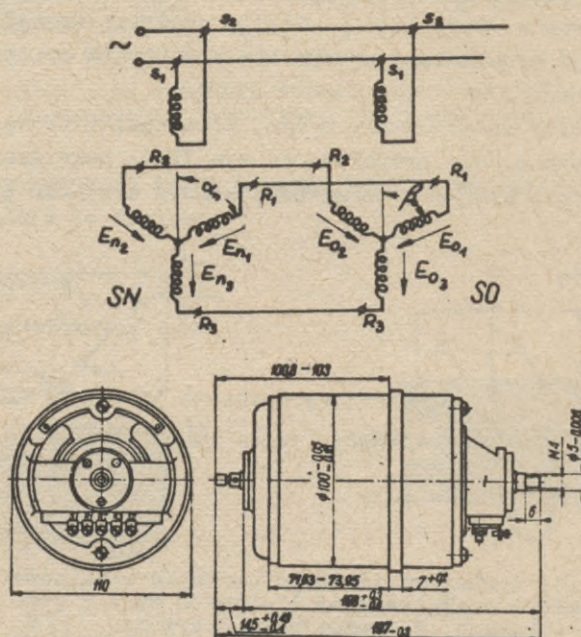
Rys.II-17. Przekrój transformatorowego czujnika różnicowego typu OT... do pomiaru przemieszczeń liniowych wraz z jego charakterystyką: 1 - karkas, 2 - uzwojenie pierwotne, 3, 4 - uzwojenia wtórne, 5 - rdzeń, 6 - popychacz, 7 - ekran

liniowych typu OT, produkowanym w zakładach Eureka /Wrocław/. Zakłady te ponadto produkują całą serię czujników OT przeznaczonych do pomiarów przemieszczeń, ciśnień i drgań w dużym asortymencie zakresów pomiarowych. Czujniki serii OT pracują przy napięciu zasilania  $(1 \div 5)$  [V], o częstotliwości 5 [kHz] i przeznaczone są do współpracy z uniwersalną aparaturą wzmacniającą N-101 lub N-105 produkcji tych samych Zakładów /patrz rozdział III p.11/.



## 2.5. Selsyny

Selsyny stanowią grupę czujników indukcyjnych parametrycznych, pracujących na zasadzie zmiany indukcji wzajemnej uzwojeń pierwotnego i wtórnego. Są to samosynchronizujące się maszyny prądu zmiennego (ang. self-synchronizing) mające jednofazowy obwód wzbudzenia /uzwojenie pierwotne/ i trójfazowy obwód synchronizacji /uzwojenie wtórne/. Selsyny mają zastosowanie przy zdalnych pomiarach kąta obrotu i służą ponadto do sterowania oraz zdalnej regulacji w układach automatyki. Para selsynów /selsyn nadawczy + selsyn odbiorczy/ stanowi łącze selsynowe i służy do sprzężenia w drodze elektrycznej dwu wałów nie sprzężonych ze sobą mechanicznie. Zasadę pracy łącza selsynowego przedstawia rys.II-18.



Rys.II-18. Schemat łącza selsynowego wskaźnikowego: /SN - selsyn nadawczy, SO - selsyn odbiorczy/ wraz ze szkicem wymiarowym selsyna nadawczego SN - 3 prod.Zakładów "Tonsil"

Wiadome jest, że jeżeli w pierwotnym uzwojeniu jednofazowym płynie prąd zmienny, np. w stojanie, to indukuje on w każdym z trzech uzwojeń wtórnych wirnika SEM o wartości zależnej od przestrzennego usytuowania uzwojeń wtórnych względem strumienia magnetycznego uzwojenia pierwotnego.



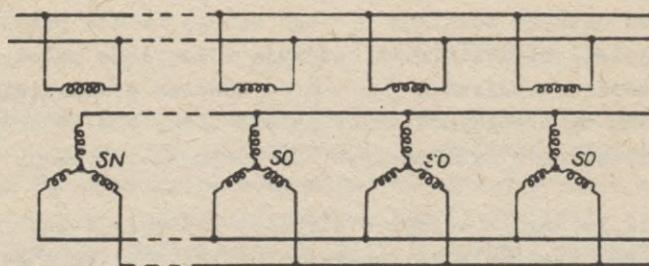
Biorąc pod uwagę dwa selsyny zasilane z tego samego źródła prądu, można stwierdzić, że jeżeli obydwa wirniki zajmują identyczne położenie względem swoich obwodów wzbudzenia /  $\alpha = \beta$  /, wówczas w odpowiadających sobie uzwojeniach tych selsynów indukują się równe SEM. W przypadku połączenia przeciwsobnego tych uzwojeń SEM odejmą się i prądy w nich nie płyną.

Jeżeli jednak wirnik jednego z selsynów obrócony zostanie o kąt  $\alpha$ , to w uzwojeniach wirników powstanie natychmiast różnica SEM, co spowoduje w nich przepływ prądów. Wzajemne zaś oddziaływanie tych prądów ze strumieniami magnetycznymi obwodów wzbudzenia wywoła powstanie momentów napędowych, tzw. synchronizacyjnych. Momenty te powstają w obu selsynach i działać będą do chwili uzyskania przez układ ponownego stanu równowagi. Jeżeli zatem /w złączu jak na rys.II-18/ pod wpływem mierzonej wielkości mechanicznej położenie wirnika selsyna nadawczego zostanie zmienione i utrzymane przez pewien czas, spowoduje to powstanie wymuszenia w selsynie odbiorczym i ustawienie się jego wirnika w takim położeniu, przy którym moment synchronizujący jest równy zeru, tj. w położeniu zgodnym z położeniem wirnika selsyna nadawczego.

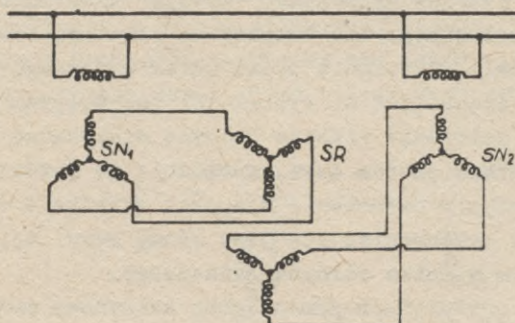
W zależności od funkcji spełnianych przez łącza selsynowe można je podzielić na następujące rodzaje:

- łącza wskaźnikowe - służą do zdalnego pomiaru kąta obrotu. Mogą być wykonane w wersji wielokrotnej - rys.II-19a;
- łącza różnicowe - służą do zdalnego przekazywania różnicy lub sumy położzeń katowych dwóch selsynów nadawczych /rys.II-19b/. Dwa selsyny nadawcze mają budowę normalną, natomiast selsyn różnicowy posiada na wirniku i na stojanie uzwojenia trójfazowe;
- łącza mocy - są przeznaczone do synchronicznego przekazywania w drodze elektrycznej momentu /wartość momentu ograniczona jest sztywnością łącza - rys.II-19c/;
- łącza transformatorowe /rys.II-19d/ - przekazują w drodze elektrycznej położenie wału sterującego przy obciążeniu wyjścia łącza dowolnym momentem obciążającym. Łącza te składają się z selsyna nadawczego /SN/, selsyna transformatorowego /ST/, oraz silnika wykonawczego /SW/, sterowanego za pośrednictwem wzmacniacza. Napięcie wyjściowe  $U_z$  selsyna /ST/ jest proporcjonalne do różnicy położzeń wału selsyna /SN/ i /ST/. Napięcie to steruje silnikiem wykonawczym sprzężonym przez przekładnię mechaniczną z wałem selsyna /ST/. Silnik wykonawczy sprowadza wał selsyna /ST/ do położenia zgodnego z położeniem wału selsyna /SN/, wytwarzając przy tym moment o wartości zależnej od zastosowanego silnika.

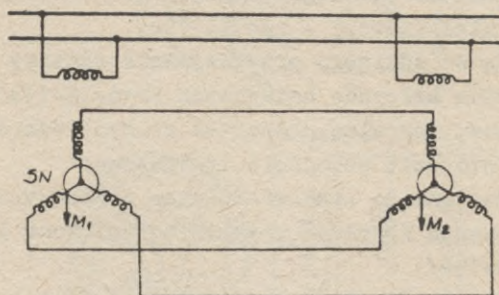




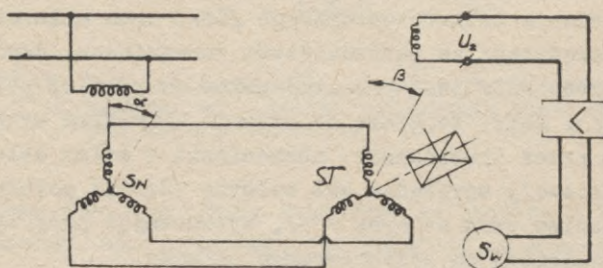
a) łącze wskaźnikowe wielokrotne



b) łącze różnicowe



c) łącze mocy



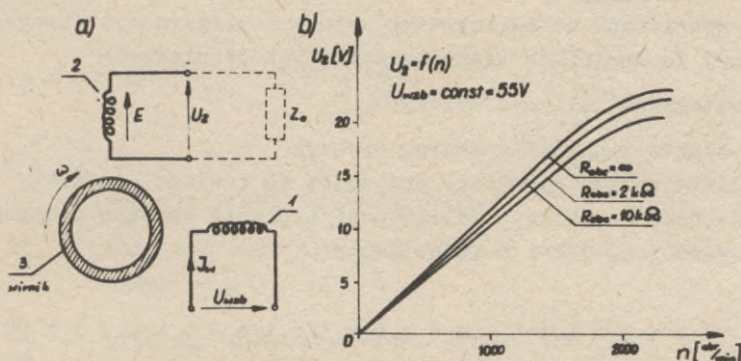
d) łącze transformatorowe

Rys. II-19. Schematy łącz selsynowych: a/ łącze wskaźnikowe wielokrotne, b/ łącze różnicowe, c/ łącze mocy, d/ łącze transformatorowe



## 2.6. Tachoprądnice asynchroniczne

Tachoprądnica asynchroniczna z wirnikiem zwartym - klatkowym /zwana również prądnicą dwufazową/ należy do grupy czujników indukcyjnych pracujących na zasadzie zmiany indukcyjności wzajemnej. Budowę tego typu prądnicy wyjaśnisz schemat pokazany na rys.II-20a.



Rys.II-20. Zasada działania asynchronicznej prądnicy tachometrycznej oraz jej charakterystyka

Na stojanie znajdują się dwa uzwojenia umieszczone względem siebie ortogonalnie. Uzwojenie /1/ zasilane jest napięciem zmiennym, np. sieciowym, o częstotliwości 50 Hz.

Przy nieruchomym wirniku uzwojenie /2/ nie jest skojarzone magnetycznie z uzwojeniem /1/ /ze względu na ortogonalność tych uzwojeń/, zatem w uzwojeniu /2/ nie indukuje się SEM.

Jeżeli wirnik obraca się, pojawiają się w nim prądy wirowe rotacji. Prądy te wywołują strumień magnetyczny pulsujący, zawierający składową poprzeczną do pola wzbudzenia w uzwojeniu /2/. W uzwojeniu tym powstanie wtedy SEM, będąca w szerokim zakresie liniową funkcją prędkości obrotowej zgodnie z rys.II-20b. Częstotliwość indukowanej SEM jest równa częstotliwości napięcia zasilającego  $U_{wzb}$  i jest niezależna od prędkości obrotowej, co ma duże znaczenie praktyczne.

Prądnice tego typu stosowane są powszechnie do pomiaru prędkości obrotowej przy wykorzystaniu jako miernika SEM odpowiednio wyskalowanego woltomierza. Dużą zaletą tych prądnic jest to, że wirnik, wykonany w postaci lekkiego kubka aluminiowego, nie obciąża praktycznie obiektu badanego.



## 2.7. Zalety i wady indukcyjnych czujników parametrycznych

Do głównych zalet tych czujników należą:

- a/ duża czułość,
- b/ uniwersalność pozwalająca na pomiar zarówno procesów statycznych jak i dynamicznych,
- c/ mała wrażliwość na zmiany temperatury i wilgotności /szczególnie dotyczy to czujników transformatorowych różnicowych/.

Do wad natomiast zaliczyć należy:

- a/ mały zakres liniowości charakterystyk,
- b/ szkodliwy wpływ pojemności przewodów na czułość czujnika,
- c/ konieczność dokładnej stabilizacji napięcia zarówno pod względem jego wartości, jak i częstotliwości.

## 3. C z u j n i k i m a g n e t o i n d u k c y j n e

W odróżnieniu do czujników indukcyjnych omawianych w poprzednim punkcie czujniki magnetoindukcyjne należą do grupy czujników generacyjnych. Zasada ich pracy opiera się na zjawisku indukowania się SEM w obwodzie elektrycznym pod wpływem zmian strumienia magnetycznego sprzężonego z tym obwodem [7], [13], [15], [27], [34], [41], [49].

Wielkość SEM - "E" indukowanej w obwodzie cewki o ilości zwojów z jest zatem proporcjonalna do prędkości zmian strumienia magnetycznego i wyraża się wzorem:

$$E = -z \frac{d\Phi}{dt} \quad (35)$$

gdzie:  $\frac{d\Phi}{dt}$  różniczka po czasie strumienia magnetycznego.

Czujniki pracujące wg tej zasady dzielą się na dwie podstawowe odmiany:

- czujniki elektrodynamiczne,
- czujniki reluktancyjne.



### 3.1. Czujniki elektrodynamiczne

Zasadę działania czujników elektrodynamicznych ilustruje rys.II-21. Względny ruch magnesu i cewki powoduje w jej obwodzie, ortogonalnym do linii strumienia magnetycznego /magnesu stałego/ powstanie SEM o wartości  $E$  równej:

$$E = z \cdot \pi \cdot d_{sr} \cdot B_p \cdot \left[ \frac{dy}{dt} \right] \quad (36)$$

gdzie:  $z$  - ilość zwojów,

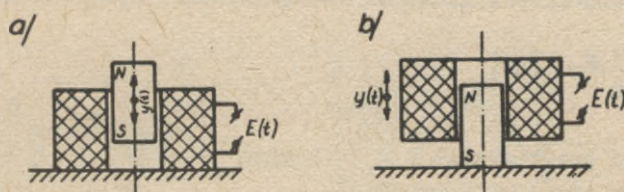
$d_{sr}$  - średnia średnica cewki [m],

$B_p$  - indukcja szczeliny powietrznej w miejscu umieszczenia cewki [T],

$\frac{dy}{dt}$  - prędkość przemieszczania cewki [ $ms^{-1}$ ].

Wobec stałości dla danego czujnika parametrów:  $z$ ,  $d_{sr}$ ,  $B_p$  siła elektromotoryczna mierzona na wyjściu cewki jest proporcjonalna do prędkości  $\frac{dy}{dt}$ .

Czujniki elektrodynamiczne pracujące wg zasady zilustrowanej na rys. II-21 stosowane są głównie do pomiaru prędkości drgań mechanicznych.

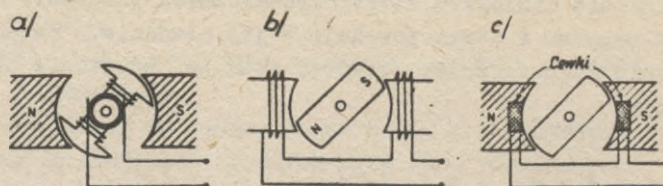


Rys.II-21. Schemat działania czujnika elektrodynamicznego: a/ czujnik z ruchomym magnesem, b/ czujnik z ruchomą cewką

Zmianę strumienia obejmującego obwód cewki można uzyskać także w układzie cewki obrotowej - rys.II-22. Łatwo zauważyć, że czujnik taki będzie wtedy tachoprądnica prądu zmiennego lub stałego.

Podstawowym wymogiem stawianym prądnicom tachometrycznym /odróżniającym je od zwykłych prądnic/ jest konieczność uzyskiwania na jej wyjściu SEM o wartości proporcjonalnej do prędkości wirowania elementu obrotowego.





Rys.II-22. Schemat działania prądnic tachometrycznych: a/ prądu stałego, b/ prądu zmiennego, c/ reluktancyjnej

W przypadku tachoprądnicy prądu stałego - rys.II-22a obraca się uzwojenie, a zatem istnieje konieczność zastosowania komutatora ze szczotkami /wprowadzać on może znaczne zakłócenia/.

Tachoprądnice prądu zmiennego - rys.II-22b wykonane są z uzwojeniem nieruchomym, a wirującym magnesem. Uniknąć w ten sposób można przepływu prądu przez elementy ślizgowe, a zatem możliwe jest dzięki temu zwiększenie dokładności i niezawodności pracy. W przypadku tachoprądnicy prądu zmiennego pomiar prędkości dokonywany może być przez pomiar SEM lub częstotliwości  $f$  prądu wyjściowego. Jako korzystniejszy należy uznać pomiar za pośrednictwem określenia częstotliwości  $f$ , gdyż gwarantuje on wyższą dokładność przy pomiarze.

Zależność prędkości mierzonej od częstotliwości wyraża się wzorem:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (37)$$

gdzie:  $p$  - liczba par biegunów,

$n$  - liczba obrotów, [obr./min].

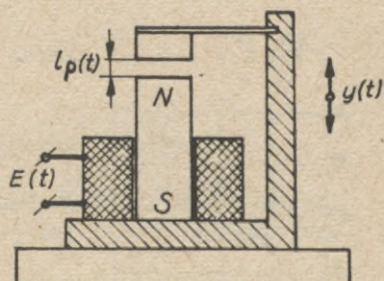
### 3.2. Czujniki reluktancyjne

Czujniki te działają na zasadzie zmiany strumienia magnetycznego, realizowanej poprzez zmianę wartości reluktancji /oporności magnetycznej  $R_\mu$ /.



Zmiana reluktancji w zależności od konstrukcyjnego rozwiązania czujnika odbywa się albo na skutek zmiany szczeliny powietrznej w obwodzie magnetycznym, albo poprzez zmianę położenia ekranu magnetycznego. Przykład reluktancyjnego czujnika inercyjnego przedstawia rys.II-23.

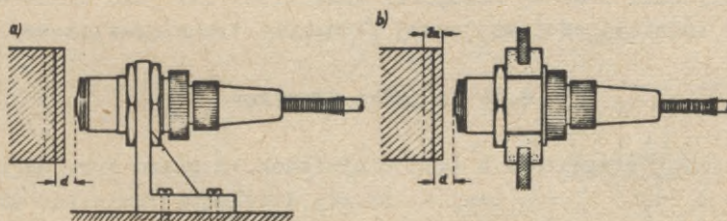
Ruchy podwieszonego sprężystości ferromagnetycznego elementu /zwory/, względem magnesu stałego, powodują zmianę długości szczeliny powietrznej  $l_p(t)$ , a zatem zmieniają reluktancję obwodu magnetycznego. Zmienia się także wielkość strumienia magnetycznego obejmującego cewkę i w jej uzwojeniach indukuje się SEM proporcjonalna do prędkości zmian  $\frac{dy}{dt}$ .



Rys.II-23. Zasada działania reluktancyjnego czujnika inercyjnego

Czujniki tego typu stosowane są do badań drgań mechanicznych, lecz ze względu na ich małą dokładność zastosowanie ich ogranicza się raczej do wykrywania drgań i badań jakościowych.

W tej grupie czujników na szczególne wyróżnienie zasługują czujniki zbliżeniowe, tzn. takie, w których rolę zwory spełnia sam obiekt badany. Na rys.II-24 pokazano przykładowo czujnik zbliżeniowy typu PR-9262 firmy Philips. Jest on szczególnie przydatny przy badaniu drgań szybko wirujących wałów oraz ugięć membran, płaskich sprężyn itp.

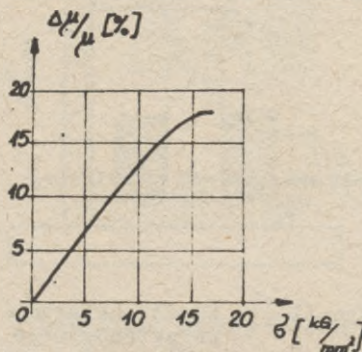


Rys.II-24. Sposób pomiaru czujnikiem zbliżeniowym, typu PR 9262 firmy Philips



#### 4. Czujniki magneto sprężyste

Działanie czujników magneto sprężystych oparte jest na znanej właściwości materiałów ferromagnetycznych, polegającej na zmianie przenikalności magnetycznej  $\mu$  pod wpływem naprężenia spowodowanego działaniem siły zewnętrznej.



Rys. II-25. Względny przyrost przenikalności magnetycznej w funkcji naprężenia

Zależność naprężenia od względnej zmiany przenikalności magnetycznej dla stopu żelaza i niklu /permalaju/ o zawartości 8,5% Ni pokazano na rys. II-25.

Jako parametr charakteryzujący pracę czujnika magneto sprężystego, przez analogię do czujników tensometrycznych, można uznać współczynnik czułości odkształceniowej  $k_\epsilon$  lub naprężeniowej  $k_\sigma$ . Współczynniki te wyrażają się wzorami:

$$k_\epsilon = \frac{\frac{\Delta\mu}{\mu}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad k_\sigma = \frac{\frac{\Delta\mu}{\mu}}{\sigma} \quad (38), (39)$$

Współczynnik  $k_\epsilon$  może osiągać wartość 200 ÷ 300, a więc jest około 100 razy większy niż stała  $k$  tensometrów metalowych.

Czujniki magneto sprężyste mogą pracować jako cewki indukcyjne o zmiennej indukcyjności własnej /czujniki dławikowe/ lub jako transformatory o zmiennej indukcyjności wzajemnej /czujniki transformatorowe/.

##### 4.1. Czujniki dławikowe

Zasadniczymi elementami w tych czujnikach są rdzeń ferromagnetyczny oraz cewka o dużej ilości zwojów. Zasadę działania czujników dławikowych ilustruje rys. II-26a. Na skutek wywołanego w czujniku naprężenia  $\sigma$  rdzeń zmienia swoją przenikalność magnetyczną  $\mu$ , co jest równoważne zmianie indukcyjności  $L$  cewki. W ten sposób drogą pośrednią pod wpływem naprężenia uzyskiwana jest zmiana indukcyjności  $L$  czujnika, a zatem i zmiana jego impedancji  $Z$ . Jeżeli założymy ponadto, że rezystancja cewki jest pomijalnie mała wobec jej reaktancji indukcyjnej, to przyrost impedancji  $\Delta Z$  czujnika wyrazi się wzorem:



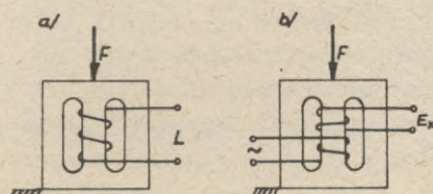
$$\Delta Z \approx \omega L = \omega \frac{z^2 S}{1} \Delta \mu \quad (40)$$

gdzie:  $\Delta Z$  - przyrost impedancji czujnika,  
 $\omega = 2\pi f$  - pulsacja napięcia zasilającego,  
 $S$  i  $l$  - przekrój poprzeczny i długość cewki,  
 $z$  - liczba zwojów,  
 $\Delta \mu$  - przyrost przenikalności magnetycznej rdzenia.

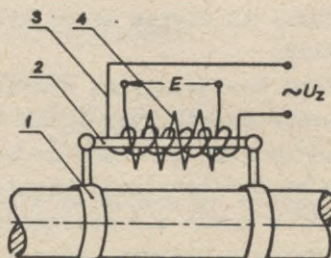
Stan obciążenia czujnika dławikowego może być mierzony np. poprzez bezpośredni pomiar prądu płynącego w obwodzie cewki lub w układzie mostka prądu zmiennego.

#### 4.2. Czujniki transformatorowe

W czujnikach tych wykorzystywana jest zależność siły elektromotorycznej /SEM/ - indukowanej w uzwojeniu wtórnym - od indukcyjności wzajemnej. Zmiana indukcyjności wzajemnej jest skutkiem zmian przenikalności magnetycznej rdzenia pod wpływem działania na niego obciążeń. Schematycznie budowę czujnika magnetosprężystego - transformatorowego pokazuje rys.II-26b. Natomiast zasadę działania tego typu czujników wyjaśnić można na przykładzie pokazanym na rys.II-27. Na elemencie badanym umieszczone są zaciski /1/, a między nimi rozpięta jest taśma /2/ znajdująca się wewnątrz cewek /3/ i /4/, spełniając rolę rdzenia. Cewka /3/ jest zasilana prądem zmiennym, natomiast cewka /4/ jest połączona z miernikiem SEM. Odształcenie elementu pomiarowego wywołuje stan naprę-



Rys.II-26. Schemat czujników magnetosprężystych :  
 a/ dławikowego, b/ transformatorowego



Rys.II-27. Schemat poglądowy czujnika magnetosprężystego transformatorowego:  
 1 - zaciski, 2 - taśma magnetosprężysta, 3 - cewka zasilająca, 4 - cewka pomiarowa



żenia w taśmie, który wpływa na zmianę przenikalności magnetycznej taśmy - rdzenia. Tak więc każdej zmianie naprężenia elementu badanego odpowiada zmiana sprzężenia magnetycznego, a co za tym idzie zmiana wartości SEM indukowanej w uzwojeniu wtórnym.

Wielkość SEM w uzwojeniu wtórnym określa wzór:

$$E = k \omega I_1 \mu_{\sigma} \quad (41)$$

gdzie:  $k$  - współczynnik proporcjonalności,  
 $I_1, \omega$  - natężenie oraz pulsacja prądu w uzwojeniu pierwotnym,  
 $\mu_{\sigma}$  - przenikalność magnetyczna rdzenia pod obciążeniem.

Przy pomiarach szybkozmiennych czujnik może być zasilany prądem stałym. Zasada jego działania będzie wtedy oparta na innych zależnościach, a mianowicie: zmienna przenikliwość magnetyczna rdzenia w czasie, a zatem zmienna wartość strumienia magnetycznego obejmującego uzwojenie wtórne sprawi, że indukować się w nim będzie SEM o wielkości proporcjonalnej do szybkości jego zmian:

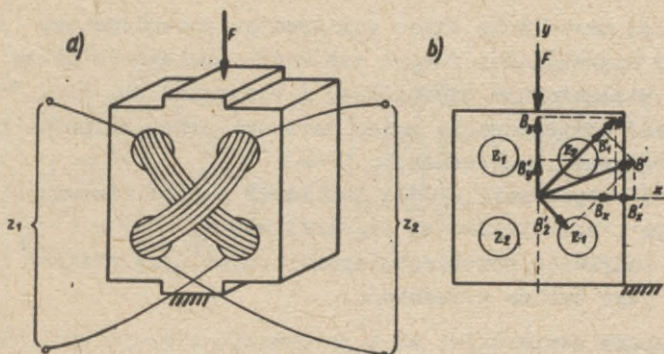
$$E = -z_2 \frac{d\Phi}{dt} = -k z_2 \frac{d\sigma}{dt} \quad (42)$$

gdzie:  $z_2$  - ilość zwojów w uzwojeniu wtórnym,  
 $k$  - stała zależna od własności materiału,  
 $\frac{d\Phi}{dt}$  - zmiana strumienia magnetycznego w czasie,  
 $\frac{d\sigma}{dt}$  - prędkość zmian naprężenia.

Czujniki te mierzą zatem nie wartość naprężenia, lecz prędkość zmian naprężenia.

Odmianą konstrukcyjną czujników transformatorowych są czujniki zwane pressduktorami. Rys. II-28 ilustruje ich budowę i zasadę pracy na przykładzie czujnika do pomiaru sił ściskających. W czujniku tym ze względu na ortogonalność uzwojeń transformatora /brak sprzężenia magnetycznego/ w stanie nie obciążonym nie indukuje się siła elektromotoryczna w uzwojeniu wtórnym. Innymi słowy, gdy  $F = 0$ , wektor indukcji magnetycznej "B" działa w kierunku prostopadłym do płaszczyzny uzwojenia pierwotnego i równoległym do płaszczyzny uzwojenia wtórnego / $B_x, B_y$  są liczbowo równe/ i w cewce wtórnej nie indukuje się SEM, a więc napięcie wyjściowe czujnika jest równe zeru, pomimo faktu płynięcia prądu zmiennego w uzwojeniu pierwotnym. Jeżeli na czujnik działa siła  $F \neq 0$ ,





Rys.II-28. Budowa i zasada pracy czujników magnetosprężystych transformatorowych tzw. pressduktorów: a/ budowa, b/ zasada działania -  $Z_1$ ,  $Z_2$  odpowiednio pierwotne i wtórne uzwojenia,  $F$  - siła nacisku,  $B$  - wektor indukcji magnetycznej

to zmienia się przenikalność magnetyczna rdzenia; składowe  $B'_x$  i  $B'_y$  wektora indukcji magnetycznej  $B'$  przyjmują różne wartości, co umożliwia rozłożenie wektora  $B'$  na dwie składowe  $B'_1$  i  $B'_2$ .

Składowa  $B'_2$  prostopadła do płaszczyzny uzwojenia wtórnego powoduje indukowanie się SEM, będącej sygnałem wyjściowym tym większym, im większa jest siła działająca na czujnik.

W oparciu o te same zasady budowane są także inne czujniki, np. do pomiaru momentu skręcającego.

#### 4.3. Zalety i wady czujników magnetosprężystych

Do głównych zalet tych czujników należy zaliczyć:

a/ możliwość pomiaru bardzo dużych obciążeń:

- pomiar sił rzędu  $4 \cdot 10^8$  [N]; ( $\sim 4 \cdot 10^4$ ) [T]
- pomiar ciśnień w zakresie  $(0 \div 5 \cdot 10^3)$  [MN/m<sup>2</sup>]; ( $\sim 5 \cdot 10^4$  [kg/cm<sup>2</sup>]);

b/ fakt, że zmiana rezystancji uzwojeń nie ma większego wpływu na wynik pomiaru, gdyż zwykle  $R \ll \omega L$ ;

c/ możliwość pracy w bardzo trudnych warunkach pomiarowych;

d/ fakt, że prosty układ pomiarowy nie wymaga wzmocnienia sygnału uzyskiwanego z czujnika.



Do wad zaliczyć należy:

- a/ konieczność określenia błędu pomiarowego spowodowanego zjawiskiem histerezy magnetycznej /uchyb ten można zmniejszyć przez poddanie czujnika wielokrotnym naprężeniom i rozprężeniom, tzw. "trening",
- b/ konieczność kompensowania zmian wartości przenikalności magnetycznej pod wpływem temperatury,
- c/ konieczność stosowania źródła zasilania o stabilizowanym napięciu wejściowym i stabilizowanej częstotliwości,
- d/ fakt, że indykacja przebiegów dynamicznych przy niskich częstotliwościach jest bardzo utrudniona.

Ogólnie można stwierdzić, że w porównaniu z czujnikami rezystancyjnymi i indukcyjnymi czujniki magnetosprężyste wykazują wiele zalet, a przede wszystkim dużą czułość przy dużej mocy wyjściowej.

## 5. C z u j n i k i p o j e m n o ś c i o w e

Czujnik pojemnościowy przetwarza mechaniczne przemieszczenie liniowe lub kątowe w sposób wywołujący zmiany pojemności kondensatora stanowiącego zasadniczy element czujnika.

Pojemność  $C$  kondensatora płaskiego wynosi:

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} [F] \quad (43)$$

gdzie:  $\epsilon$  - stała dielektryczna kondensatora [ $Fcm^{-1}$ ],

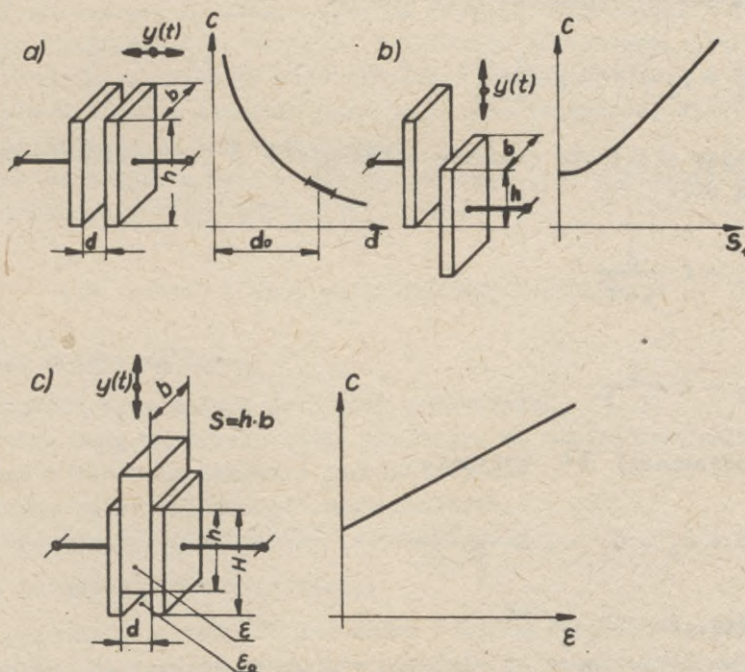
$S$  - pole powierzchni wzajemnego pokrywania się okładek [ $cm^2$ ],

$d$  - odległość między okładkami [ $cm$ ].

Ze wzoru (43) wynika, że zmiany pojemności kondensatora - czujnika można osiągnąć wg jednej z alternatyw:

- a/ przez zmianę odległości  $d$  między okładkami, gdzie  $S = \text{const}$   
 $\epsilon = \text{const}$  - rys. II-29a,
- b/ przez zmianę efektywnego pola powierzchni " $S$ " wzajemnego pokrywania się okładek; gdy  $d = \text{const}$ ,  $\epsilon = \text{const}$  - rys. II-29b.
- c/ przez zmianę przenikalności dielektrycznej  $\epsilon$ , gdy  $S = \text{const}$ ,  
 $d = \text{const}$  - rys. II-29c.

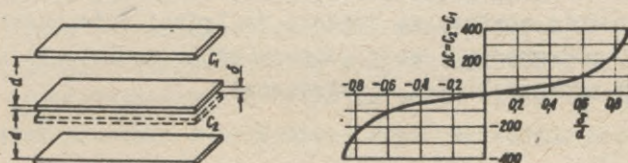




Rys. II-29. Schematy czujników pojemnościowych i ich charakterystyki :  
a/ o zmiennej odległości między okładkami, b/ o zmiennej powierzchni wzajemnego pokrywania się okładek, c/ o zmiennej przenikalności dielektrycznej

### 5.1. Czujniki o zmiennej odległości między okładkami

Są one wykonywane w dwu wersjach: jako czujniki dwuelektrodowe oraz trójelektrodowe /najczęściej różnicowe/. Zasadę działania czujników trójelektrodowych - różnicowych ilustruje rys. II-30. Ustalając zależno-



Rys. II-30. Zasada pracy różnicowego czujnika pojemnościowego trójelektrodowego wraz z jego charakterystyką



ści obowiązujące dla tego typu czujników przyjęto, że elektroda środkowa znajduje się w położeniu, przy którym:

$$C_1 = C_2 = C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

Przesuwając elektrodę środkową o odległość  $\delta$ , odpowiednie pojemności równają się:

$$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d + \delta} \quad (44)$$

oraz

$$C_2 = \varepsilon \frac{S}{d - \delta} \quad (45)$$

a różnica pojemności  $\Delta C$  wyniesie

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \varepsilon S \frac{S}{d^2 - \delta^2} \quad (46)$$

Zakładając, że  $d^2 \gg \delta^2$

$$\Delta C \approx \varepsilon \cdot S \frac{\delta}{d^2} \quad (47)$$

Przy tym założeniu można przyjąć, że zmiana pojemności  $\Delta C$  jest proporcjonalna do  $\delta$ , a względna zmiana pojemności czujnika różnicowego wynosi:

$$\frac{\Delta C}{C} \approx \frac{\delta}{d} \quad (48)$$

Czujniki trójelektrodowe - różnicowe mają szereg korzystnych cech, takich jak:

- a/ możliwość oparcia pomiaru na zmianie względnej pojemności czujnika /a nie samej pojemności/, co eliminuje błędy wynikłe ze zmiany temperatury lub przenikalności elektrycznej,
- b/ duża liniowość charakterystyki, zwłaszcza w zakresie małych stosunków  $\frac{\delta}{d}$ .

Zalety te sprawiły, że czujniki różnicowe preferowane są w grupie czujników pojemnościowych.



Czujniki dwuelektrodowe z racji nieliniowości charakterystyki oraz zależności pojemności od temperatury są rzadziej stosowane. Dwie pozostałe grupy czujników /tj. czujniki o zmiennej powierzchni pokrywania się oraz czujniki o zmiennej przenikalności dielektrycznej/ w dziedzinie pomiarów wielkości mechanicznych są rzadko stosowane, dlatego ograniczono się jedynie do ich wymienienia.

Bardziej szczegółowe dane o czujnikach tego typu czytelnik może znaleźć w literaturze: [28], [29], [37], [38].

## 5.2. Zalety i wady czujników pojemnościowych

Do zalet należy zaliczyć:

- a/ dużą czułość przy małych naciskach pomiarowych,
- b/ nieznaczną masę ruchomej części czujnika, co umożliwia pomiary dynamiczne w szerokim zakresie częstotliwości,
- c/ nieznaczny wpływ silnych pól magnetycznych,
- d/ możliwość wykonywania pomiarów bezstykowych.

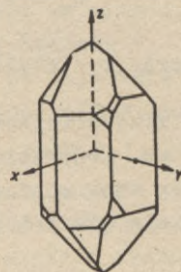
Do wad natomiast zaliczyć należy:

- a/ wpływ pojemności przewodów łączących czujnik z aparaturą pomiarową, co stwarza szczególne wymagania odnośnie do stosowanych łącz,
- b/ dużą wrażliwość na wilgoć i zapylenie,
- c/ konieczność stosowania skomplikowanej i nietypowej elektronicznej aparatury wzmacniającej /opartej o zasadę modulacji częstotliwości/.

Ogólnie można stwierdzić, że przy niskich częstotliwościach przebiegu badanego czujniki pojemnościowe są mniej dogodne od oporowych lub indukcyjnych. Istnieją jednakże takie warunki, w których jedynie czujniki pojemnościowe dają możliwość dokonania dokładnych pomiarów.

## 6. Czujniki piezoelektryczne

Zasada działania czujników piezoelektrycznych oparta jest na zjawisku powstawania ładunków elektrycznych na krawędziach pewnych kryształów pod wpływem sił ściskających lub rozciągających. Zjawisko to nosi nazwę efektu piezoelektrycznego. Pojawienie się ładunków ele-



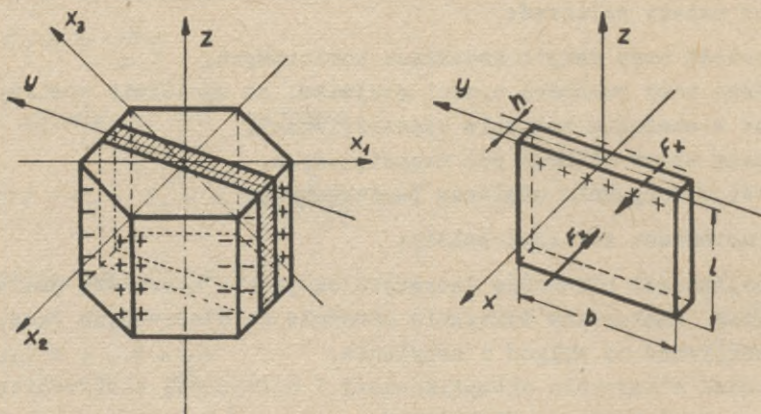
Rys.II-31. Kryształ kwarcu: x - oś elektryczna, y - oś mechaniczna, z - oś optyczna



ktrycznych na krawędziach odkształcanego kryształu tłumaczy się zmianą wzajemnego rozlokowania dodatnich i ujemnych jonów. Do ciał krystalicznych, wykazujących efekt piezoelektryczny, należy m.in. kwarc  $/\text{SiO}_2/$  krystalizujący w układzie heksagonalnym - rys.II-31.

W kryształach kwarcu istnieją trzy osie główne: oś optyczna Z-Z; osie elektryczne, tj. przechodzące przez krawędzie kryształu i normalne do osi optycznej, np. X-X oraz osie mechaniczne, tj. normalne do ścian kryształu, np. Y-Y. Osie elektryczne i mechaniczne charakteryzują się efektem piezoelektrycznym wzdłużnym /oś X-X/ i poprzecznym /oś Y-Y/.

Dla celów praktycznych z kryształu wycina się płytkę o ścianach prostopadłych odpowiednio do osi XZ - rys.II-32.



Rys.II-32. Sposób uzyskania płytki pomiarowej z kryształu kwarcu: Z - oś optyczna;  $x_1, x_2, x_3$  - osie elektryczne, Y - oś mechaniczna

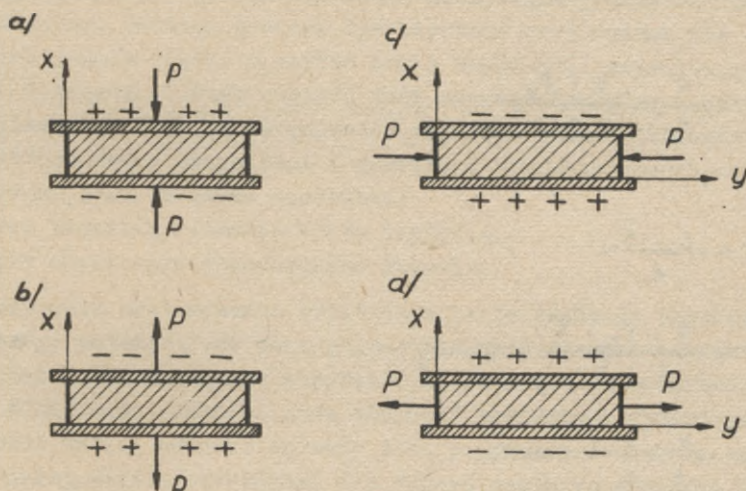
Poddając płytkę działaniu siły w kierunku osi X, na ścianach prostopadłych do tych osi powstają ładunki elektryczne  $Q_X$ , proporcjonalne do działającej siły  $F_X$  /efekt piezoelektryczny podłużny/, przy czym:

$$Q_X = k \cdot F_X \quad (49)$$

gdzie: k - stała piezoelektryczna, dla kwarcu  $k = 18 \cdot 10^{-2} \left[ \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{N}} \right]$

Przy przejściu od ściskania do rozciągania zmieniają się znaki ładunku. Przy działaniu na płytkę siły  $F_Y$  równoległej do osi Y występuje tzw. poprzeczny efekt piezoelektryczny i na ściankach płytki powstają ładunki elektryczne, lecz ich znaki są przeciwne niż przy podłużnym efekcie piezoelektrycznym. Obrazuje to rys.II-33.





Rys.II-33. Podłużny i poprzeczny efekt piezoelektryczny: a,b/ podłużny, c,d/ poprzeczny

W tym przypadku:

$$Q_y = -k \cdot F'_y \cdot \frac{b}{h} \quad (50)$$

gdzie:  $k$  - wartość identyczna jak poprzednio,  
 $b$  i  $h$  - liniowe wymiary płytki.

Zatem powstały ładunek jest zależny w tym przypadku od wymiarów płytki. Jeżeli siła jest przyłożona wzdłuż osi optycznej Z-Z piezoeffekt nie występuje, tzn.  $Q_z = 0$ .

Mimo że istnieje szereg kryształów wykazujących silniejszy od kwarcu efekt piezoelektryczny, to jednak kwarc znalazł w technice pomiarowej największe zastosowanie ze względu na takie zalety, jak wysoka wytrzymałość mechaniczna, wysoka rezystancja, niewrażliwość na wilgoć. Znacznie silniejszy efekt piezoelektryczny daje np. sól Segneta  $a$  / $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ /, lecz wykazuje ona znaczną wrażliwość na działanie wilgoci i zależność piezoeffektu od temperatury. Do innych piezoelementów należą hydrofosfat amonu / $\text{NH}_4\text{N}_2\text{PO}_2$ / i tytanian baru / $\text{BaTiO}_3$ /.

W celu wykorzystania piezoeffektu na płytkę wyciętą z kryształu nakłada się galwanicznie metalowe elektrody w formie okładek. Napięcie  $U$



między okładkami utworzonego w ten sposób kondensatora wyraża się wzorem:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{k \cdot F_x}{C}$$

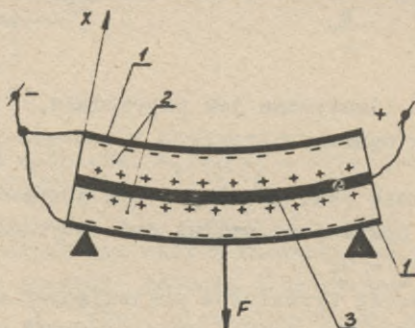
ponieważ:

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d}$$

$$U = \frac{k \cdot F_x \cdot d}{\epsilon \cdot S} = B \cdot F_x$$

gdzie:  $B = \frac{k \cdot d}{\epsilon \cdot S} = \text{const.}$

Niekiedy może okazać się, że wielkość napięcia  $U$  jest za mała; wówczas stosuje się szeregowo-równoległe połączenie płytek. Uzyskuje się w ten sposób znaczne podniesienie czułości czujnika. Innym sposobem zwiększenia czułości czujników piezoelektrycznych jest poddanie piezoelementu zginaniu. Na rysunku II-34 przedstawiono wykonanie piezoele-



Rys. II-34. Budowa piezoelementu bimorficznego poddanego zginaniu: 1 - okładka metalowa, 2 - piezoelementy, 3 - pośrednicząca płytka metalowa

mentu w postaci dwóch jednakowych płytek sklejonych z jednakowo zorientowanymi osiami, z pośredniczącą płytką metalową.

Biorąc pod uwagę powyższy rysunek, łatwo zauważyć, że zewnętrzne powierzchnie piezoelementu będą naładowane ładunkami o znaku /w rozpatrywanym przypadku ujemnym/ przeciwnym niż płytka środkowa. Tego rodzaju piezoelement nosi nazwę bimorficznego.



Napięcie występujące na elemencie piezoelektrycznym ma charakter elektrostatyczny, dlatego powinno być mierzone przyrządami nie pobierającymi praktycznie prądu, o bardzo dużej impedancji wejściowej rzędu  $10^{11}[\Omega]$  i więcej. Z tego względu jest rzeczą niezbędną w przypadku czujników piezoelektrycznych stosowanie elektronicznego "transformatora impedancji" pomiędzy czujnikami a aparaturą wzmacniająco-rejestrującą. Realizowane jest to dwoma sposobami:

- przy użyciu przedwzmacniacza napięcia,
- przy użyciu przedwzmacniacza ładunku.

W przypadku zastosowania przedwzmacniacza napięcia wartość napięcia wyjściowego zależy jest poza parametrami wejściowymi wzmacniacza od pojemności kabla łączącego czujnik z aparaturą elektroniczną. Chcąc uniknąć fluktuacji czułości oraz zakłóceń wywołanych dynamiczną zmianą pojemności kabla, czujnik łączony jest z przedwzmacniaczem napięcia kablem o małej, ściśle określonej dla danego czujnika długości  $/1,5 [m]/$ .

Przy użyciu przedwzmacniacza ładunku czułość toru pomiarowego jest niezależna od tych wpływów, co umożliwia stosowanie długich kabli przyłączeniowych.

Bezinercyjność efektu piezoelektrycznego sprawia, że czujniki te doskonale nadają się do pomiarów szybkich procesów mechanicznych, związanych szczególnie z obciążeniami uderowymi. Za pomocą czujników piezoelektrycznych można wykonywać pomiary odkształceń, gładkości powierzchni, sił, ciśnień, drgań, przyspieszeń i wstrząsów, w szerokim zakresie częstotliwości od  $1 [Hz]$  do  $1000 [kHz]$ .

Do niedawna czynnikiem ograniczającym zastosowanie czujników piezoelektrycznych były trudności występujące przy wykorzystaniu ich do pomiarów w niskim zakresie częstotliwości /poniżej  $10 [Hz]$ /. Ostatnio budowane czujniki oraz związane z nimi funkcjonalnie przedwzmacniacze umożliwiają pomiar drgań o częstotliwościach bardzo niskich. Osiągnięciem ostatnich dwóch lat jest czujnik firmy Brüel-Kjaer oznaczony symbolem 8603 do pomiarów drgań. Czujnik pracuje w zakresie od  $0,2$  do  $1000 [Hz]$ , posiada czułość  $10000 [pC/g]$  i daje możliwość pomiaru przyspieszeń rzędu  $2 \times 10^{-6} [g]$  /gdzie  $g$  - przyspieszenie ziemskie/. Odpowiada to przemieszczeniu rzędu części mikrometra przy częstotliwości  $1 [Hz]$ , [39].



### 6.1. Zalety i wady czujników piezoelektrycznych

#### Zalety:

- a/ duża uniwersalność,
- b/ bardzo duża częstotliwość własna i w związku z tym możliwość pracy w szerokim zakresie częstotliwości od 1 [Hz] do 100 [kHz],
- c/ duża czułość,
- d/ mała zależność od temperatury,
- e/ znikomo małe tłumienie drgań w kryształach, co w połączeniu z wysoką częstotliwością drgań własnych gwarantuje pomiar bez błędów fazowych przy indykacji przebiegów dynamicznych,
- f/ mała wrażliwość na wilgoć /z wyjątkiem wersji konstrukcyjnej wykonanej z kryształu soli Segnete'a/,
- g/ małe gabaryty i mały ciężar.

#### Wady:

- a/ konieczność stosowania specjalnej aparatury pomiarowej,
- b/ konieczność stosowania specjalnych kabli dołączeniowych, aby obniżyć wpływ pojemności oraz rezystancji izolacji międzyprzewodowej na wynik pomiaru,
- c/ trudność cechowania.

### 7. Czujniki fotoelektryczne

Do budowy czujników fotoelektrycznych stosowane są różnego rodzaju elementy fotoelektryczne. Elementy te służą do zamiany energii promienistej światła na impulsy elektryczne. Rozróżnić tu można dwie zasadnicze grupy zjawisk, na których opiera się zasada działania elementów fotoelektrycznych:

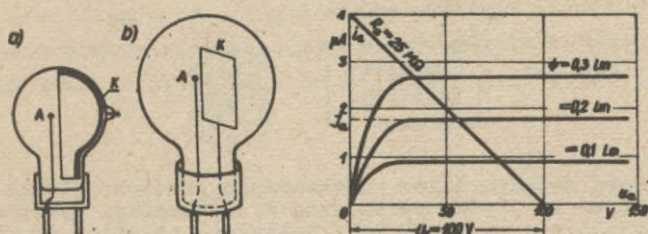
- zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne, związane z emisją elektronów pod wpływem promieniowania,
- wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne, zachodzące wewnątrz danego ciała, np. zmiana jego rezystancji, powstanie SEM, itp.

Oba zjawiska znalazły szerokie zastosowanie w budowie różnego typu fotoelementów, wśród których na szczególną uwagę zasługują: fotokomórki /fotonówki/, fotoopory, fotoogniwa, fotodiody i fototranzystory [1], [10], [16], [29].



## 7.1. Czujniki z zewnętrznym zjawiskiem fotoelektrycznym

Głównym przedstawicielem tej grupy czujników jest fotokomórka, która stanowi dwuelektrodową lampę elektronową. W lampie tej wykorzystuje się zewnętrzne zjawisko fotoelektryczne, spowodowane pochłanianiem kwantów energii promienistej padającej na metal, z którego wykonana jest katoda lampy /tzw. fotokatoda/. Elektrony fotokatody uzyskują po absorpcji fotonów energię wyższą niż praca wyjścia z metalu, co umożliwia ich emisję. Fotokatody wykonuje się z metali o małej pracy wyjścia, jak np. lit, sód, potas, cesz i ich stopów lub tlenków przez napylenie ich na wewnętrzną część bańki szklanej lub na metalową blaszkę /ekran/ - rys.II-35. Anodę



Rys.II-35. Konstrukcja fotokomórek próżniowych i ich charakterystyka robocza: a/ z katodą napyloną na wewnętrznej powierzchni bańki szklanej, b/ z katodą napyloną na płytce metalowej

zastępuje zwykle pręt metalowy umieszczony w pobliżu katody. Nie wchodząc w analizę zjawiska fotoemisji warto zauważyć, że charakterystyka fotokomórki próżniowej, dla stałej wartości strumienia światła padającego na fotodiodę, przebiega prawie poziomo powyżej pewnej /określonej dla danej fotokomórki/ wartości napięcia zasilającego. Ponieważ prąd emisji fotokomórki jest proporcjonalny do strumienia światła padającego na katodę, prąd anodowy fotokomórki jest od niego liniowo zależny. Ta właściwość oraz niezależność prądu od napięcia anodowego, są bardzo ważne przy wykorzystaniu fotokomórek jako elementów pomiarowych.

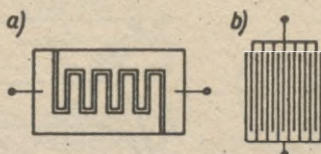
Wydażnością komórek fotoelektrycznych nazywa się stosunek prądu anodowego do strumienia światła padającego na katodę. Komórki próżniowe mają wydażność w granicach  $(10 \div 50) [\mu A/lm]$ , zależnie od rodzaju katody. Wydażność ta dla niektórych zastosowań jest zbyt mała, dlatego też wykorzystuje się często możliwość jej zwiększenia przez napełnienie lampy gazem lub przez wykorzystanie zjawiska emisji wtórnej /fotokomórki gazowe i fotopowielacze/. Te ostatnie mają wydażność rzędu kilkudziesięciu  $[A/lm]$  i znajdują zastosowanie do pomiarów lub wykrywania światła o bardzo małym natężeniu.



## 7.2. Czujniki z wewnętrznym zjawiskiem fotoelektrycznym

Wewnętrzne zjawisko fotoelektryczne można zaobserwować w półprzewodnikach, w których objawia się ono jako zmiana rezystancji, oraz w złączach p-n, w których powoduje zmianę stanu równowagi elektrycznej. W oparciu o to zjawisko wykonywane są takie elementy, jak: fotoopory, fotoogniwa, fotodiody, fototranzystory.

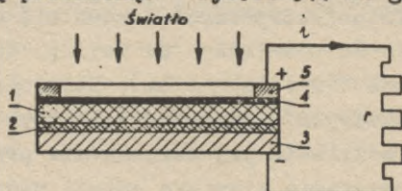
- Fotoopory - zwane także oprnikami fotoelektrycznymi, należą do grupy czujników parametrycznych. Budowane są z płytek izolacyjnych /szkło, mika/, na które nakłada się warstwę półprzewodnika między dwie elektrody metalowe, znajdujące się na płytce - rys.II-36. Dla ochrony przed wpływami atmosferycznymi całość umieszczana jest zwykle w bańce próż-



Rys.II-36. Budowa fotooporników uzyskiwanych przez napylenie półprzewodnika na płytkę ceramiczną z elektrodami wykonanymi: a/ w kształcie grzebleni, b/ w kształcie cienkich drucików

niowej. Oporniki te wykazują w stanie nienaświetlonym dużą rezystancję rzędu mega omów, która maleje wielokrotnie pod wpływem światła. Przy zasilaniu takiego opornika napięciem stałym, w jego obwodzie płynie mały prąd przy braku światła /tzw. prąd ciemny/, w miarę zaś zwiększania natężenia światła, prąd ten wzrasta. Wydajność opornika fotoelektrycznego wynosi  $(100 \div 1000) [\mu A/lm]$  dla oporników selenowych: a  $(10^4 \div 10^5) [\mu A/lm]$  dla oporników talowych.

- Fotoogniwa - zwane także ogniwami fotoelektrycznymi należą do grupy czujników generacyjnych. Fotoogniwo składa się z trzech warstw: metalowej elektrody odprowadzającej, warstwy półprzewodnika oraz elektrody metalowej wykonanej tak, by padający na fotoogniwo strumień światła mógł przez nią przeniknąć - rys.II-37. Na granicy półprzewodnika

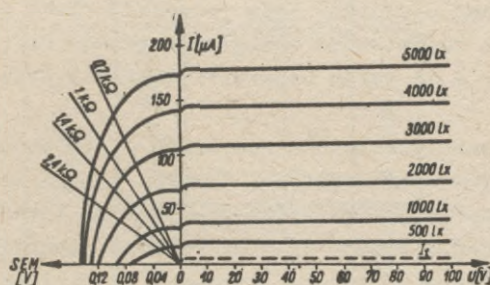


Rys.II-37. Zasada działania fotoogniwa miedziowego: 1 - przewodnik z podtlenku miedzi, 2 - warstwa zaporowa, 3 - płytka przewodząca, 4 - przezroczysta warstwa srebra, 5 - pierścień zbierający ładunki



i metalu wytworzona zostaje cienka warstwa zaporowa, tzw. bariera potencjału. Z chwilą rozpoczęcia naświetlania styku warstw n-p fotony wytrącają elektrony z pasm podstawowych w pasma przewodnictwa po obydwu stronach bariery potencjału. Powstają wolne elektrony przechodzące z warstwy p do warstwy n oraz dziury przechodzące z warstwy n do warstwy p. Po zamknięciu obwodu zewnętrznego następuje przepływ prądu, którego natężenie jest w przybliżeniu proporcjonalne do strumienia światła padającego na złącza. Obecnie budowane ogniwa wykorzystują złącza wykonane z selenu, tlenków miedzi, germanu i krzemu. Siła elektromotoryczna tego typu ogniw jest rzędu 0,5 [V].

- Fotodiody - należą do grupy czujników parametrycznych. Podobnie jak fotoogniwa wykonane są na złączu p-n, lecz spolaryzowanym w kierunku wstecznym. Oświetlenie złącza fotodiody wywołuje wzrost prądu nasycenia, spowodowany przewodnictwem elektrycznym. Charakterystyki statyczne fotodiod pokazano na rys.II-38. Do najbardziej rozpowszechnionych



Rys.II-38. Charakterystyki statyczne fotodiody /typ TP-50/

należą: fotodiody germanowe i krzemowe, czułe na promieniowanie widzialne i podczerwone. Czułość tych elementów jest rzędu kilku [mA/lm].

- Fototranzystory - są to elementy półprzewodnikowe, dzięki którym można uzyskać jednoczesną modulację prądu w układzie elektrycznym przy udziale promieniowania lub sygnału elektrycznego. Budowa fototranzystora jest podobna do budowy tranzystora wzmacniającego, czyli fototranzystory są elementami o trzech warstwach, np. p-n-p, w których jedno złącze /np. emiter - baza/ jest naświetlane, dzięki czemu uzyskuje się sterowanie prądu kolektora. Czułość fototranzystorów jest rzędu (0,5 ÷ 5) [A/lm].



### 7.3. Charakterystyka elementów fotoelektrycznych

Nie wszystkie z wymienionych tu elementów w równym stopniu wykorzystywane są do budowy czujników. Ważniejsze dane charakterystyczne tych elementów zestawiono w tablicy V.

Fotokomórka próżniowa lub gazowa obok takich zalet, jak możliwość przenoszenia szerokiego pasma częstotliwości oraz braku wpływu zmian temperatury na czułość posiada kilka wad. Do nich zaliczyć można duże wymiary, małą czułość, konieczność zasilania prądem o stabilizowanym i dużym napięciu, a także znaczną moc źródła światła.

Fotoopornik ze względu na małe wymiary umożliwia znaczną miniaturyzację czujnika. Posiada on jednak dość istotne wady, a to: niską częstotliwość graniczną, wynoszącą ok. 5 [Hz] i dużą zależność od zmian temperatury otoczenia.

W przypadku stosowania fotoogniwa do budowy czujnika nie ma potrzeby zasilania czujnika, a ponadto uzyskuje się stosunkowo dużą czułość przy małych gabarytach czujnika. Wadą fotoogniwa jest jednak niska częstotliwość graniczna oraz konieczność obciążenia go małymi rezystancjami rzędu  $(10 \div 50) [\Omega]$ , a to celem uzyskania możliwie prostoliniowej charakterystyki.

Fototranzystor umożliwia budowę czujników miniaturowych o niskim napięciu zasilania i znacznej czułości. Element ten posiada jednak nieliniową zależność współczynnika zmian czułości od temperatury otoczenia. Istnieją tu ponadto trudności przy doborze elementu kompensującego /istnieją trudności w uzyskaniu poprawnej stabilizacji termicznej prądu kolektora/.

Fotodioda posiada najkorzystniejsze właściwości. Umożliwia ona budowę czujnika charakteryzującego się małymi wymiarami, niskim napięciem zasilania, małą zależnością czułości od temperatury i łatwością w jej kompensowaniu. Do dalszych korzystnych cech fotodiod można zaliczyć liniową charakterystykę napięcia wyjściowego, i to zarówno w funkcji mierzonych częstotliwości, jak i amplitud, a także jej dużą wytrzymałość mechaniczną i niezawodność w działaniu.

Czujniki fotoelektryczne są obecnie powszechnie stosowane ze względu na to, że umożliwiają dokonanie pomiaru bez kontaktu z obiektem badanym. Znajdują zastosowanie między innymi w układach do pomiaru temperatury, drgań, prędkości itp. W tabl. VI zestawiono najczęściej spotykane schematy układów z podaniem możliwości ich zastosowań.

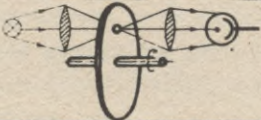


Tablica V

| ELEMENT FOTOELEKTRYCZNY                              | Fotokomórka<br>próchniowa | Fotopornik | Fotoogniwo                 | Fotodioda            | Fototranzystor      |
|------------------------------------------------------|---------------------------|------------|----------------------------|----------------------|---------------------|
| Napięcie zasilania [V]                               | 90 ÷ 150                  | 10 ÷ 100   |                            | 10 ÷ 30              | 12                  |
| Powierzchnia czynna [cm <sup>2</sup> ]               | 1 ÷ 7                     | 0,04 ÷ 3   | Se 0,3 ÷ 140<br>Si 0,5 ÷ 3 | 0,01                 | 0,07                |
| Czułość [mA]                                         | 0,02 ÷ 0,05               | 300 ÷ 3000 | 0,25 ÷ 1                   | 30                   | 130                 |
| Temperaturowy współczynnik<br>zmiany czułości [%/°C] |                           | 2,5        | 0,2                        | 0,5                  | 5                   |
| Częstotliwość graniczna [Hz]                         | 10 <sup>9</sup>           | 5          | 500                        | 50 · 10 <sup>3</sup> | 3 · 10 <sup>3</sup> |
| Wymiary gabarytowe                                   | ø 15x40                   | ø 10x6     | ø 60x9                     | ø 5x15               | ø 5x15              |



Tablica VI

| SCHEMAT CZUJNIKA                                                                  | TYP CZUJNIKA I ZASTOSOWANIE                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>czujnik fotoelektryczny do pomiaru jasności, temperatury, itp. /mierzy strumień świetlny wysyłany przez obiekt badany/</p>                              |
|  | <p>czujnik fotoelektryczny do pomiaru przezroczystości płynów i gazów /mierzy zmianę strumienia świetlnego wywołaną pochłanianiem przez ciecz lub gaz/</p> |
|  | <p>czujnik fotoelektryczny do pomiaru gładkości powierzchni, do liczenia, do mierzenia prędkości obrotowej itp.</p>                                        |
|  | <p>czujnik fotoelektryczny do mierzenia prędkości obrotowej</p>                                                                                            |
|  | <p>czujnik fotoelektryczny do pomiaru wymiarów geometrycznych i liczenia przedmiotów</p>                                                                   |



## Rozdział III

## APARATURA POMIAROWA

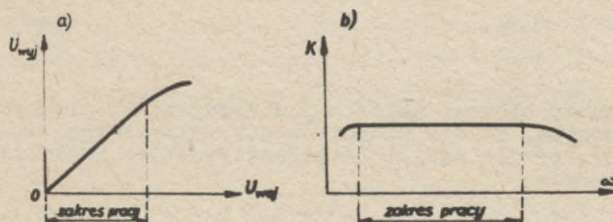
Wyjściowy sygnał pomiarowy czujnika rzadko może być bezpośrednio wykorzystywany ze względu na małą moc. Dlatego sygnał ten podlega zwykle dalszej obróbce w układzie wzmacniająco-formującym, aby możliwe było jego zmierzenie lub zarejestrowanie.

W pomiarowych układach wzmacniająco-formujących, zwanych także układami obróbki sygnału, jako główne człony pomiarowe wymienić należy:

- obwód wejściowy,
- wzmacniacz pomiarowy,
- filtry.

- Obwód wejściowy pracuje zwykle w układzie mostka lub kompensatora. Jest on wyposażony zazwyczaj w elementy służące do wyrównania wstępnego i ustawienia czułości.

- Wzmacniacz pomiarowy służy do wzmocnienia sygnału otrzymanego na wyjściu obwodu wejściowego. Powinien on odznaczać się liniowością, tzn.  $U_{wyj} = k \cdot U_{wej}$ , gdzie:  $k = \text{const}$  - niezmiennie w czasie i całym zakresie pomiarowym, co jest szczególnie ważne ze względu na stabilność pracy aparatury - rys.III-1. Z tych to względów w układach pomiarowych sto-



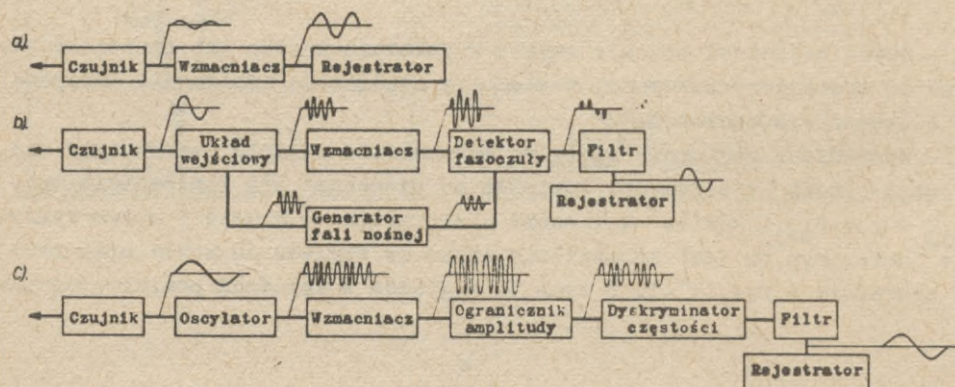
Rys.III-1. Charakterystyki wzmacniacza:  $k$  - wzmocnienie: a/ zależność napięcia wyjściowego od wejściowego, b/ zależność wzmocnienia od częstotliwościowego zakresu pracy

suje się głównie wzmacniacze prądu zmiennego pracujące na częstotliwości nośnej, modulowanej przez przebieg badany. Sygnał wyjściowy ze wzma-



niacza wprowadzany jest do fazoczułego detektora, w którym następuje wyprostowanie sygnału w kierunku /dodatnim lub ujemnym/ zgodnym z mierzonym przebiegiem. W wyniku rozwoju elektroniki w najnowszych rozwiązaniach istnieje tendencja do przejścia od wzmacniaczy pomiarowych na prąd zmienny /z częstotliwością nośną/ na znacznie prostsze układy na prąd stały. Aparatura pomiarowa oparta na stałoprądowych wzmacniaczach ma między innymi tę przewagę nad aparaturą pracującą na częstotliwości nośnej, że zakres badań przebiegów dynamicznych jest rozszerzony o możliwość pomiarów i analizy przebiegów powyżej 10 [kHz], co trudno jest uzyskać w układach pracujących na częstotliwości nośnej.

Filtry przeznaczone są do wydzielania względnie tłumienia składowych zmiennych sygnału w danym zakresie częstotliwości, w wyniku czego na ich wejściu otrzymuje się sygnał pomiarowy o wybranym paśmie częstotliwości. Jest to szczególnie ważne przy analizie przebiegów dynamicznych.



Rys.III-2. Schematy blokowe układów pomiarowych: a/ dla czujników generacyjnych, b/ dla czujników parametrycznych /modulacja amplitudy/, c/ dla czujników parametrycznych /modulacja częstotliwości/

Na rys.III-2 przedstawiono schematy blokowe układów pomiarowych współpracujących z różnego typu czujnikami, obrazujące kolejne fazy przetwarzania sygnału pomiarowego. W przypadku stosowania czujników generacyjnych proces przetwarzania odbywa się zwykle wg schematu przedstawionego na rys.III-2a, natomiast układy pomiarowe z czujnikami parametrycznymi pracują na ogół w oparciu o zasadę modulacji amplitudy lub częstotliwości - rys.III-2b,2c.



W praktyce pomiarowej funkcję układu wzmacniająco-formującego spełnia jeden przyrząd, który zawierać może - poza wymienionymi - dodatkowe człony, takie jak: układy całkujące, różniczkujące itp. Może on współpracować ze ściśle określonym typem czujników bądź może być przystosowany do współpracy z różnymi czujnikami, np. tensometrycznymi, indukcyjnymi itp. i w tym przypadku nosi nazwę "miernika wielkości nieelektrycznych".

Otrzymany w wyniku obróbki sygnał przekazywany jest do ostatniego stopnia układu pomiarowego, którym mogą być mierniki wskaźnikowe i cyfrowe, wyskalowane w jednostkach wielkości mierzonej, lub rejestratory zapisujące przebieg badany.

Względy użytkowe przemawiają za usystematyzowaniem aparatury kontrolno-pomiarowej wg następujących grup:

- uniwersalna aparatura wzmacniająca, pracująca w oparciu o zasadę modulacji amplitudy, przeznaczona do współpracy z czujnikami parametrycznymi, tensometrycznymi /metalowymi i półprzewodnikowymi/, indukcyjnymi oraz fotooporami,
- aparatura wzmacniająca, pracująca w oparciu o zasadę modulacji częstotliwości, współpracująca przede wszystkim z czujnikami pojemnościowymi,
- aparatura wzmacniająca, pracująca w układzie wzmacniacza prądu stałego, współpracująca z czujnikami parametrycznymi,
- aparatura wzmacniająca, współpracująca z czujnikami generacyjnymi, posiadająca prostą budowę sprowadzoną do układu wzmacniającego i wskaźnika wartości mierzonej wielkości.

Ze względu na poruszaną w tym opracowaniu problematykę pomiarową szerzej omawiać się będzie jedynie aparaturę grupy pierwszej oraz niektóre zestawy aparatury grupy czwartej, służące do pomiaru drgań.

Bardziej szczegółowe dane o aparaturze kontrolno-pomiarowej czytelnik może znaleźć w następujących pozycjach wydawniczych [6], [25], [36] [37], [83].

## 1.    U n i w e r s a l n a    a p a r a t u r a w z m a c n i a j ą c a

W elektronicznym miernictwie wielkości mechanicznych szczególnie powszechna jest metoda tensometrii rezystancyjnej. Z tego względu uniwersalna pomiarowa aparatura wzmacniająca jest wykonywana w postaci mostków tensometrycznych przystosowanych do współpracy z różnymi rodzajami czujników parametrycznych. Tego typu aparatura produkowana jest



przez wiele firm. W laboratoriach badawczych obok aparatury krajowej najbardziej rozpowszechniona jest aparatura produkowana przez następujące firmy: Honeywell, Vibrometer, Brüel-Kjær, RFT, KOVO-Mikrotechna.

### 1.1. Aparatura wzmacniająca produkcji krajowej

Głównymi producentami tej aparatury są: Instytut Lotnictwa, Zakłady ELPO - Wrocław i Spółdzielnia Wamel w Warszawie. Ta ostatnia produkuje trzy wersje aparatury:

- zestaw do wielopunktowych tensometrycznych pomiarów statycznych, składający się z mostka TT-3B oraz skrzynek rozdzielczych typu RS-24,
- jednokanałowy mostek tensometryczny typu TT-4B przeznaczony do pomiarów statycznych i dynamicznych,
- sześciokanałowy zestaw typu TT-6B do pomiarów dynamicznych i statycznych.

Podstawowe dane techniczne dotyczące tej aparatury zestawiono w tablicy VII. Opierając się na doświadczeniach eksploatacyjnych całego szeregu egzemplarzy można stwierdzić, że z wymienionych, jedynie mostek do pomiarów statycznych TT-3B wykazuje zadowalające walory użytkowe. Natomiast zarówno typ TT-4B, jak i TT-6B odznaczają się dużą nieliniowością i błędami układu kalibracji, jak również niestabilnością pracy /płynięciem zera/, sięgającą nawet wartości 30 % zakresu pomiarowego, w ciągu trzech godzin pracy. Należy również zwrócić uwagę na to, że wbrew opinii producenta aparatura ta nie może, bez odpowiednich poprawek, współpracować z czujnikami indukcyjnymi.

Instytut Lotnictwa wraz z Zakładami ELPO opracował tranzystorowy miernik wielkości mechanicznych typ RF-01T /N-104/. Przyrząd ten jest wersją rozwojową lampowego miernika RF-01 /N-101/ - rys.III-3, przeznaczonego do współpracy z indukcyjnymi czujnikami transformatorowymi serii OT /produkowanymi również przez wymienione zakłady/.

Tranzystorowy miernik wielkości mechanicznych RF-01T /N-104/ jest sześciokanałowym uniwersalnym wzmacniaczem pomiarowym, przystosowanym do współpracy zarówno z czujnikami transformatorowymi, jak i z czujnikami tensometrycznymi oraz indukcyjnymi w układach pół- i pełnomostkowych. Dzięki wysokiej czułości może być stosowany do pomiarów statycznych i dynamicznych. Aparatura posiada wewnętrzny układ do prowadzenia trójstopniowej kalibracji w każdym zakresie pracy przy czujnikach tensometrycznych oraz możliwość równoważenia elektrycznego w zakresie 20% układów z transformatorem różnicowym /w odróżnieniu od wersji N-101/. Szczegółowe dane techniczne tej aparatury podano w tablicy VII.



Tablica VIIa

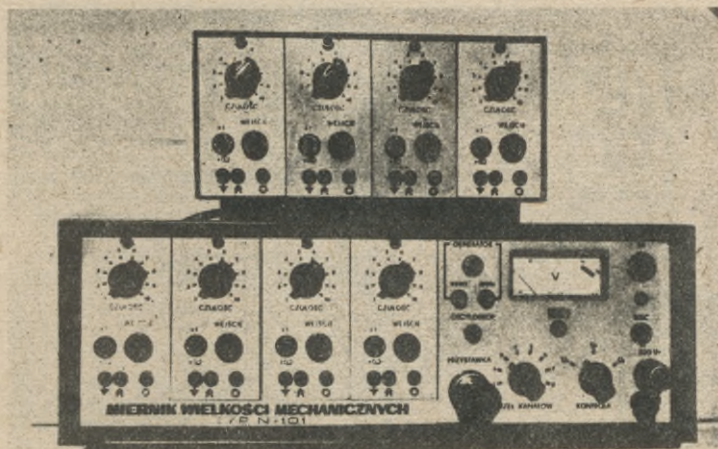
|                                               | 1516<br>Brüel-Kjaer Dan. | TDA-6<br>Mikrotechna CSSR      | EMS-004 Elek-<br>troakustika CSSR | UM-131<br>RFT-NRD              | HLA-111<br>RFT-NRD               |
|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Zakres przenoszonych<br>częstotliwości        | 20 ÷ 100000<br>Hz        | 0 ÷ 1300                       | 0 ÷ 1500                          | 0 ÷ 1200                       | 0 ÷ 50 000                       |
| Rodzaj czujników                              | tensometryczne           | tensometryczne<br>i indukcyjne | tensometryczne<br>i indukcyjne    | tensometryczne<br>i indukcyjne | tensometry pół-<br>przewodnikowe |
| Częstotliwość nośna                           | -                        | 5000 ± 1 %                     | 5000 ± 1 %                        | 5000 ± 1 %                     | -                                |
| Zakresy pomiarowe                             | 0,1 ÷ 30                 | 0,2 ÷ 20                       | 0,1 ÷ 10                          | 0,003 ÷ 1000                   | 0,01 ÷ 100                       |
| $\frac{\Delta R}{R}$ i $\frac{\Delta L}{L}$   |                          |                                |                                   |                                |                                  |
| Nieliniowość charak-<br>terystryki statycznej | 1                        | 1                              | 1                                 | ± 1,5                          | ± 1,5                            |
| Wyjście napięciowe<br>przy oporności wyjśc.   | 3<br>0,3<br>V kΩ         | ± 1,5<br>10                    | 3<br>0,3                          | ± 0,5<br>30                    | 0,1<br>10                        |
| Wyjście prądowe przy<br>oporności wyjściowej  | 10<br>100<br>mA Ω        | ± 5<br>50                      | 10<br>100                         | ± 25<br>100                    | ± 5<br>200                       |
| Wielkość wskaz.                               | ± 1,5                    | ± 2                            | ± 1,5                             | ± 2                            | ± 2                              |
| Przyłączone typy<br>czujników:                |                          |                                |                                   |                                |                                  |
| tensometryczne<br>pół-i pełnomostkowe         | 10 ÷ 1000<br>Ω           | 120 ÷ 600                      | 120 ÷ 600                         | 50 ÷ 1200                      | 50 ÷ 1200                        |
| Indukcyjne półmostk.                          | -                        | 2/5 ÷ 20/                      | 2/2 ÷ 20/                         | 5 ÷ 100                        | -                                |
| Napięcie zasilające<br>czujniki               | 0,3 ÷ 3<br>V             | 4                              | 3                                 | 1 ÷ 8                          | 3,5 ÷ 7                          |
| Zasilanie przyrządu                           | ~ 220<br>V               | ~ 220 ± 15 %<br>= 11,5 ÷ 24    | ~ 220 ± 15 %<br>= 12 ÷ 24         | ~ 110, 127, 240<br>= 12, 6     | ~ 220                            |



Tablica VIIB

|                                                                  | TM-4B<br>Wamel PRL                | TM-6B<br>Wamel PRL           | N-104<br>Bureka PRL           | KWS/T-5<br>Hottinger NRP      | KWS/3S-5<br>Hottinger NRP     | KWS/6S-5<br>Hottinger NRP     |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Zakres przenoszonych częstotliwości                              | Hz<br>0 ÷ 1500                    | 0 ÷ 1500                     | 0 ÷ 1000                      | 0 ÷ 1300                      | 0 ÷ 1500                      | 0 ÷ 1300                      |
| Rodzaj czujników                                                 | -                                 | tensometrycz.                | tensometrycz.<br>i indukcyjne | tensometrycz.<br>i indukcyjne | tensometrycz.<br>i indukcyjne | tensometrycz.<br>i indukcyjne |
| Częstotliwość nośna                                              | Hz<br>5000                        | 5000 ± 1 %                   | 5000                          | 5000                          | 5000                          | 5000                          |
| Zakresy pomiarowe<br>$\frac{\Delta R}{R}$ i $\frac{\Delta L}{L}$ | %<br>0,1 ÷ 10                     | 0,1 ÷ 20                     | 0,1 ÷ 20                      | 0,1 ÷ 100                     | 0,1 ÷ 100                     | 0,1 ÷ 100                     |
| Nieliniowość charakterystyki statycznej                          | %<br>2                            | 2                            | 5                             | ±1,5                          | 1,5                           | ±1,5                          |
| Wyjście napięciowe przy oporności wyjśc.                         | V<br>$\frac{\pm 1}{1}$            | $\frac{\pm 1}{1}$            | $\frac{\pm 1}{1}$             | $\frac{\pm 2}{1}$             | $\frac{\pm 4}{0,04}$          | $\frac{\pm 2}{1}$             |
| Wyjście prądowe przy oporności wyjściowej                        | mA<br>$\frac{\pm 15}{10}$         | $\frac{\pm 15}{10}$          | 20<br>5 ÷ 145                 | $\frac{\pm 20}{100}$          | ±100                          | $\frac{\pm 20}{100}$          |
| Niestabilność wskaz.                                             | %<br>±10                          | ±10                          | ±2,5                          | ±2                            | ±1,5                          | ±1,5                          |
| Przyłączane typy czujników                                       |                                   |                              |                               |                               |                               |                               |
| tensometryczne:<br>pół-i pełnomostkowe                           | $\Omega$<br>60 ÷ 600              | 60 ÷ 600                     | 60 ÷ 600                      | 120 ÷ 1200                    | 40 ÷ 1200                     | 20 ÷ 1200                     |
| Indukcyjne półmostk.                                             | mH<br>-                           | -                            | -                             | 2 ÷ 20                        | 2 ÷ 20                        | 2 ÷ 20                        |
| Napięcie zasilające czujniki                                     | V<br>0,2 ÷ 4                      | 0 ÷ 3                        | 1                             | 3,5 ÷ 5,5                     | 1 ÷ 10                        | 4,5 ÷ 6                       |
| Zasilanie przyrządu                                              | V<br>~220 $\frac{\pm 10}{= 12}$ % | ~220 $\frac{\pm 10}{= 12}$ % | ~220 $\frac{\pm 15}{= 24}$ %  | ~220 $\frac{\pm 20}{= 35}$ %  | ~220 $\pm 20$ %               | ~220 $\pm 20$ %               |





Rys.III-3. Miernik wielkości mechanicznych prod. ELPO typ N-101 /wygląd zewnętrzny/

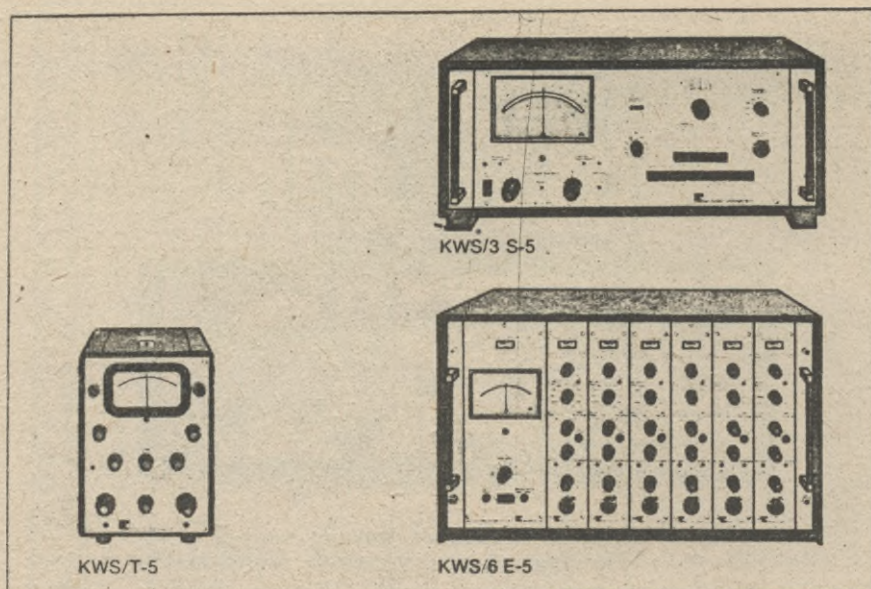
#### 1.2. Aparatura wzmacniająca firmy Hottinger /NRF/

Firma ta specjalizuje się w produkcji aparatury do pomiarów wielkości mechanicznych, w związku z czym oferuje duży jej asortyment. Do najciekawszych rozwiązań konstrukcyjnych zaliczyć należy:

- KWS/T-5 - jednokanałowy tranzystorowy wzmacniacz do pomiarów statycznych i dynamicznych, klasy 0,5;
- KWS/6E-5 - sześciokanałowy zestaw o parametrach pracy KWS/T-5;
- KWS/3S-5 - jednokanałowa tranzystorowa aparatura do pomiarów statycznych i dynamicznych o podwyższonych parametrach pracy klasy 0,2, stanowiąca najnowsze osiągnięcie firmy. Wyposażona jest w dodatkowe zespoły, a mianowicie: wzmacniacz operacyjny o wyjściu  $\pm 10$  [V], modulator umożliwiający przyłączenie czujników czynnych o maks. czułości  $\pm 1$  [mV]/np. termoelementów, czujników elektromagnetycznych itp./, wyłącznik dwupołożeniowy z dwoma bezindukcyjnymi kontaktami /220 [V], 40 [W]/, których położenie może być regulowane niezależnie w całym zakresie pomiarowym.

Aparaturę tę przedstawiono na rys.III-4, a bliższe dane techniczne zawiera tablica VII.





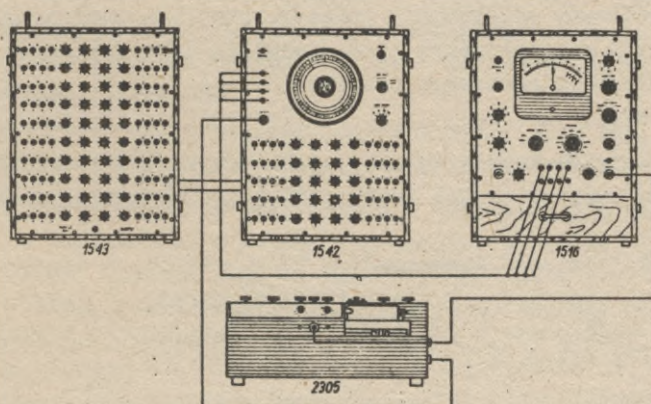
Rys. III-4. Uniwersalna aparatura pomiarowa firmy Hottinger

Na uwagę ponadto zasługuje aparatura tej firmy do pomiarów statycznych i wolnozmiennych, wyposażona we wskaźnik cyfrowy typ DDM-4. W połączeniu z odpowiednim przerzutnikiem pomiar może być wykonywany w sposób automatyczny, kolejno dla stu punktów pomiarowych. Odczyt następuje na czteromiejscowym wskaźniku cyfrowym z sygnalizacją znaku ściskanie - rozciąganie.

### 1.3. Aparatura tensometryczna firmy Brüel-Kjaer /Dania/

Firma ta specjalizuje się głównie w produkcji sprzętu do pomiarów drgań i akustyki. W zakresie miernictwa innych wielkości opracowała uniwersalny zestaw pomiarowy, umożliwiający dokonywanie pomiarów zarówno na częstotliwości nośnej, jak i w układzie prądu stałego. Aparatura tej firmy oprócz wysokiej dokładności i niezawodności ma tę zaletę, że może być łączona w zestawy umożliwiające pełną analizę przebiegów dynamicznych.





Rys. III-5. Zestaw aparatury tensometrycznej firmy Brüel-Kjaer

Na uwagę zasługują następujące typy przyrządów:

- 1516 - mostek tensometryczny pracujący na częstotliwości nośnej 3 [kHz] do pomiarów statycznych i dynamicznych do 300 [Hz] - rys. III-5a przy zastosowaniu zasilacza 1535 prądu stałego do pomiarów dynamicznych w zakresie częstotliwości  $(0,02 \div 100)$  [kHz],
- 1538 - zestaw filtrów eliminujący z wyjścia aparatury 1516 częstotliwość nośną,
- 1542 - automatyczny przełącznik 50-punktowy umożliwiający przyłączenie do mostka 1516 i skompensowanie linii 50 punktów pomiarowych, z możliwością zdalnego sterowania;
- 2010 - analizator harmonicznych, o zakresie częstotliwości  $(2 \div 2000)$  [Hz]

Ważniejsze dane techniczne tej aparatury zestawiono w tablicy VII. Na rys. III-5 pokazano zestaw aparatury tensometrycznej firmy Brüel-Kjaer współpracujący z rejestratorem pisakowym 2305.

#### 1.4. Aparatura produkcji czechosłowackiej

Firma KOVO-Mikrotechna produkuje głównie dwa zestawy pomiarowe, z których jeden przystosowany jest do pomiarów statycznych, a drugi do pomiarów dynamicznych.

W skład automatycznej aparatury wzmacniającej do pomiarów statycznych wchodzi:



- TSA-63 mostek tensometryczny współpracujący z tensometrami o oporności  $(60 \div 600)[\Omega]$ , o automatycznej kompensacji linii, klasa 0,2;
- PS-63 automatyczny przełącznik punktów, umożliwiający przyłączenie 24 tensometrów z regulowanym czasem pomiaru  $(5 \div 20)[\text{sek}]$ ;
- AC-608 przetwornik analogowo-cyfrowy,
- 242-9 drukarka.

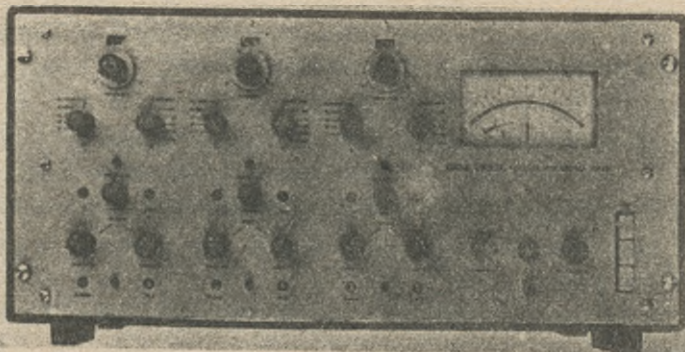
Zestaw pracuje wg metody zerowej, jako mostek z automatycznym równoważeniem, na częstotliwości nośnej 320 [Hz]. Wykonanie całkowicie tranzystorowe.

Aparatura do pomiarów dynamicznych TDA-6 stanowi 6-kanalowy mostek tensometryczny, pracujący na częstotliwości nośnej 5 [kHz]. Przeznaczona jest do współpracy z czujnikami tensometrycznymi o rezystancji  $(120 \div 600)[\Omega]$  i indukcyjnymi o indukcyjności  $L = 2 \times (5 \div 20)[\text{mH}]$  w układzie mostkowym oraz w układzie transformatorowym o impedancji  $Z > 100[\Omega]$ . W aparaturze przewidziana jest możliwość ręcznej i automatycznej kalibracji.

Z aparatury produkcji czechosłowackiej warto zwrócić uwagę na najnowsze rozwiązanie, jakim jest mostek tensometryczny EMS 004 prod. Elektroakustik Bratysława. Jest to 4-kanalowy uniwersalny miernik dynamiczny, skonstruowany w oparciu o tranzystory krzemowe, co zapewnia wysoką stabilność jego pracy.

#### 1.5. Aparatura firmy RFT VEB Messelektronik Dresden NRD

Firma ta opracowała zestaw aparatury /HLW System/ do pomiarów elektrycznych wielkości mechanicznych w wersji laboratoryjnej i przemysłowej. Podstawowym przyrządem tego systemu jest uniwersalny miernik UM 111 /wykonywany również w wersji 3-kanalowej UM 131/ - rys.III-6. Przyrząd



Rys.III-6. Uniwersalny miernik wielkości mechanicznych UM 131 prod. RFT /wygląd zewnętrzny/

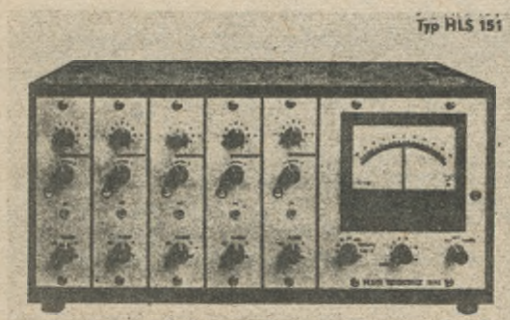


ten jest w pełni stranzystorowany, pracuje na częstotliwości nośnej 5 [kHz], z czujnikami tensometrycznymi i indukcyjnymi. Firma dostarcza do tego przyrządu następujące zestawy czujników:

- półprzewodnikowe tensometry WDH 101 /z podkładką nośną/ i WDH 111,
- akcelerometry typu BWH,
- tensometryczne czujniki przemieszczeń WWH i siły KWH,
- indukcyjne czujniki przemieszczeń IWT i IWB /zbliżeniowe/.

Aparatura może ponadto współpracować z dowolnymi czujnikami tensometrycznymi w układach mostkowych, o oporności od 50 [ $\Omega$ ] do 1200 [ $\Omega$ ] oraz z czujnikami indukcyjnymi, o indukcyjności od 5 [mH] do 100 [mH]. Odznacza się dobrą stabilnością i dokładnością. Przeznaczona jest zarówno do pomiarów statycznych jak i dynamicznych w zakresach częstotliwości (0 ÷ 1200) [Hz].

W połączeniu ze specjalnymi 6-miejscowymi skrzynkami rozdzielczymi typu UMM-161 można dowolnie zwiększać ilość przygotowanych do pomiaru /skompensowanych pojemnościowo i oporowo/ punktów pomiarowych. Dzięki temu czas pomiaru może być znacznie skrócony, lecz oczywiście ilość jednocześnie mierzonych punktów pozostaje niezmienną, tzn. w przypadku UM-131 wynosi "trzy". Ważniejsze dane techniczne zamieszczono w tabeli VII.



Rys.III-7. Uniwersalny mostek tensometryczny typ HLS 151 firmy RPT /wygląd zewnętrzny/

Firma ta w ramach systemu HLW produkuje ponadto także inną aparaturę :

- HLS 111, 151, 171 uniwersalny mostek tensometryczny w wersji jedno- pięcio- i siedmikanalowej - rys.III-7;
- HLA 111 uniwersalny wzmacniacz prądu stałego, przeznaczony głównie do współpracy z czujnikami tensometrycznymi - półprzewodnikowymi; zakres pomiarowy częstotliwości sięga 50 [kHz];
- MU 121 automatyczne skrzynki rozdzielcze.



Skrzynka rozdzielcza MU 121 składa się z układu sterującego SG 151 oraz dwóch układów równoważących AG 111. W połączeniu z czujnikami pomiarowymi i wybranym typem aparatury wzmacniającej służy do automatycznej rejestracji w 20 punktach /możliwość dołączenia AG 131, alternatywa 50-punktowa/. Przyrząd SG 151 służy do kolejnego przełączania punktów pomiarowych podłączonych do układów równoważących, np. AG 121. Daje on napięcie sterujące, napięcie wstępnego podgrzewania tensometrów, ewentualnie napięcie zasilające mostek; służy również do kalibrowania i zbiorczego przekazywania sygnału pomiarowego na urządzenia rejestrujące.

## 2. Aparatura do pomiaru drgań

Do pomiaru drgań może być stosowana uniwersalna aparatura wzmacniająca, wyposażona w specjalne czujniki drgań. Jednakże pełną analizę przebiegów dynamicznych, w tym głównie drgań mechanicznych, można jedynie uzyskać stosując specjalną aparaturę pomiarową. Wymienić tu należy, oprócz rozwiązań aparatury krajowej, przede wszystkim aparaturę firmy RFT /NRD/, zestawy pomiarowe firmy Brüel-Kjaer /Dania/ oraz innych firm zachodnich, jak Hottinger, Vibrometer, Philips.

Wśród aparatury produkcji krajowej na szczególną uwagę zasługuje miernik drgań N-102, współpracujący z czujnikami sejsmicznymi prędkości drgań OT-19 /patrz rozdz. IV p. 6/, posiada on bowiem bardzo szerokie możliwości pomiarowe. Obejmują one:

- pomiar amplitudy, prędkości i przyspieszenia,
- analizę widmową sygnału,
- pomiar wartości średniej, skutecznej lub szczytowej przebiegu.

Zakres częstotliwościowy tego przyrządu ograniczony jest własnościami czujnika elektromagnetycznego OT-19 i obejmuje pasmo  $(25 \div 700)$  [Hz]. Wady tej nie posiada nowo opracowany /1973 r./ przez Zakłady Doświadczalne "Eureka" we Wrocławiu miernik drgań N-106, wyposażony w piezoelektryczny czujnik przyspieszenia /akcelerometr/. Ważną cechą miernika z punktu widzenia jego uniwersalności jest możliwość zastosowania oprócz podstawowego czujnika /opracowanego w Instytucie Lotnictwa/ również akcelerometrów innych znanych firm, np. Brüel-Kjaer, Kistler, przy odpowiedniej korekcji czułości.

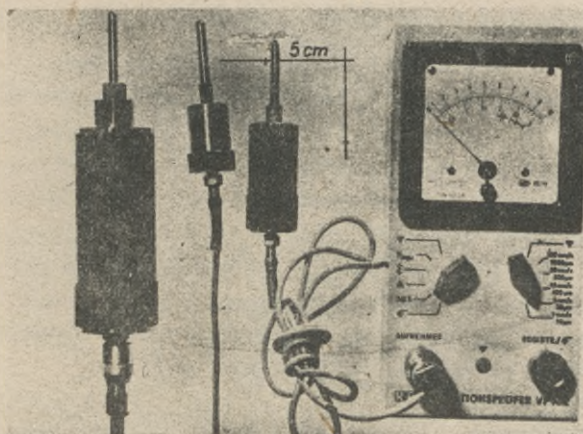
Wielkością mierzoną w przypadku tej aparatury jest skuteczna wartość prędkości drgań w zakresie  $(0,03 \div 30)$  [mm/s]. Miernik wykonany jest w oparciu o najnowsze osiągnięcia elektroniki przy wykorzystaniu półprzewodników krzemowych, scalonych wzmacniaczy operacyjnych oraz techniki grubowarstwowej.



Z uniwersalnej aparatury pomiarowej, mogącej mieć zastosowanie do pomiaru drgań, należy wymienić miernik wielkości mechanicznych N-101, wyposażony w czujnik OT-20, umożliwiający pomiar przyspieszenia w zakresie  $(0,2 \div 200)$  [g], przy częstotliwości  $(0 \div 500)$  [Hz] lub w czujnik OT-25, który umożliwia pomiar amplitudy drgań w zakresie do  $\pm 1,5$  [mm] w paśmie częstotliwości  $(20 \div 600)$  [Hz].

Głównym producentem aparatury do badań drgań w krajach RWPG jest firma EPT Messelektronik "Otto Schön" Drezno. Produkuje ona między innymi:

- przenośny miernik drgań VP 102 wraz z zestawem czujników serii DGA /rys.III-8/, przystosowany do prostych i szybkich testów pomiarowych w przemyśle i w laboratoryjnych badaniach prototypów; zakres częstotliwości pracy w zależności od czujnika wynosi  $(10 \div 3000)$  [Hz], przy zakresie pomiaru skutecznej wartości prędkości  $(1 \div 300)$  [mm/s];



Rys.III-8. Miernik drgań typ VP 102 wraz z czujnikami DGA firmy RPT /wygląd zewnętrzny/

- aparatura do pomiaru i analizy drgań, system SM /211, 212, 231, 241/ wraz z zestawem czujników piezoelektrycznych serii KD /10,...,23,30, 31/ i filtrów dolno- oraz górno-przepustowych KF /102, 103, 201/ zapewniająca pomiar i pełną analizę drgań mechanicznych, przy częstotliwościach od 2 [Hz] do 15 [kHz]. Aparatura wyposażona jest w układy całkujące elektroniczne, dzięki którym możliwy jest bezpośredni pomiar oprócz przyspieszeń także prędkości i przemieszczeń ruchu drgającego. Zakres pomiarowy przy pomiarze przyspieszeń zawiera się w granicach  $(0,032 \div 320)$  [m/s<sup>2</sup>], w kilku zakresach pomiarowych. Przy zastosowaniu wzmacniacza ładunku SM-11 zakres częstotliwości może być znacznie rozszerzony o niskie częstotliwości i wynosi  $(0 \div 50)$  [kHz].



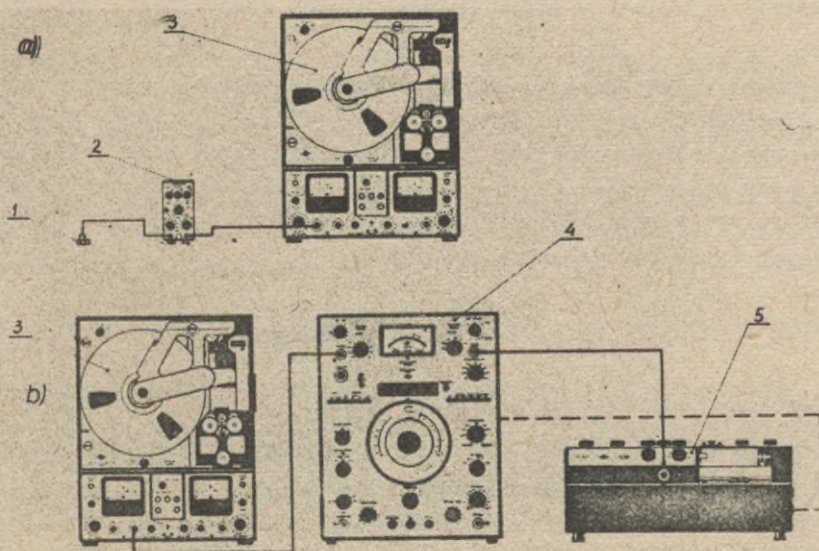
Spośród firm zachodnich produkujących aparaturę do pomiarów drgań wymienić należy przede wszystkim firmę Brüel-Kjaer. Produkuje ona specjalne zestawy pomiarowe przeznaczone do pomiarów i analizy drgań o szerokim asortymencie typów i zakresów pomiarowych, przystosowanych do różnych zadań pomiarowych. Wśród najciekawszych elementów tych zestawów wymienić należy:

- akcelerometry piezoelektryczne, o znormalizowanym sygnale wyjściowym i szerokim zakresie przenoszonych częstotliwości. Częstotliwość rezonansowa tych czujników, w zależności od typu i czułości, wynosi  $(10 \pm 70)$  [kHz], a zakres mierzonych przyspieszeń od części g do 800 g;
- przedwzmacniacze ładunku i napięcia, o znormalizowanym wyjściu napięciowym  $\sim 10$  [V]/ typu 2616... 2626 i 4292, wyposażone na ogół w obwody całkujące do pomiaru prędkości i przemieszczenia, o zakresie częstotliwości w zależności od typu od 0,003 [Hz] do 100 [kHz];
- analizatory częstotliwości różnych typów, wśród których wymienić należy jako zasadnicze dwie wersje: analizator częstotliwości typu 2107 i analizator tercjowo-oktawowy 2112. Charakterystyki robocze obydwu przyrządów są zbliżone, z tym że przyrząd 2107 umożliwia analizę mierzonego zakresu częstotliwości w sposób ciągły, zaś w analizatorze 2112, pełny zakres częstotliwości jest podzielony na jedenaście przedziałów /oktawy/ lub na 33 przedziały /tercje/. Obydwa przyrządy pracują /przestrajają się/ w sposób automatyczny. Zakres analizowanych częstotliwości wynosi od 2 [Hz] do 20 [kHz] w sześciu podzakresach dla 2107 i od 2 [Hz] do 200 [kHz] dla 2112;
- oscylograficzny, cyfrowo-pamięciowy 1/3 - oktawowy analizator częstotliwości typu 3347, składający się z 30 1/3-oktawowych filtrów pracujących równolegle. Umożliwia on bieżącą analizę sygnału pomiarowego i natychmiastowe uzyskanie obrazu widma na ekranie lampy oscylograficznej. Przyrząd posiada zakres częstotliwości od 25 [Hz] do 20 [kHz], szerokość pasma 1/3 oktawy, czas uśredniania może być regulowany w zakresie od 20 [m sek] do 20 [sek], cyfrowy odczyt poszczególnych prążków widma co 2 [msek], skalę naniesioną elektronicznie na ekran i umożliwiającą odczyt z dokładnością 1 %;
- magnetofon pomiarowy typu 7001 umożliwiający transformację częstotliwości przez zmianę prędkości taśmy w stosunku 1 : 40, który przy użyciu analizatora zdolnego do analizy przebiegu o częstotliwości np. 2 [Hz] - typ 2010 - może analizować selektywnie sygnały o częstotliwości równej 0,05 [Hz]. Magnetofon stanowi dwukanałowy przyrząd rejestrujący, posiada on zakres częstotliwości od 0 [Hz] do 20 [kHz], cztery



prędkości taśmy, miernik poziomy, specjalny kanał bezpośredniego zapisu, służący do oznaczenia i identyfikacji taśmy, oraz adapter do zamkniętego obiegu taśmy, umożliwiający szczegółową analizę poszczególnych fragmentów zapisu.

Na rys. III-9 przedstawiono zestaw pomiarowy do badania drgań, składający się z części zapisującej /rys. III-9a/ i części analizującej /rys. III-9b/. W skład tego zestawu wchodzi nie wymieniony powyżej pisak poziomy 2305. Przyrząd ten zapisuje wartość skuteczną pomiarowego napięcia zmiennego w zakresie częstotliwości od 2 [Hz] do 200 [kHz] w funkcji czasu, zaś w połączeniu /linia przerywana/ z analizatorem - w funkcji częstotliwości.



Rys. III-9. Zestaw aparatury firmy Brüel-Kjaer do pomiaru i analizy drgań: a/ zestaw rejestrująco-pomiarowy, b/ zestaw analizujący: 1 - akcelerometr, 2 - przedwzmacniacz ładunku, 3 - magnetofon pomiarowy, 4 - analizator częstotliwości, 5 - pisak poziomy

### 3. Przyrządy wskazujące i rejestrujące

Przyrządy wskazujące i rejestrujące stanowią ostatni stopień układu pomiarowego. Wykonywane są zwykle jako oddzielne urządzenia podłączane do wyjścia aparatury wzmacniającej, która posiada na ogół dwa



rodzaje wyjść: napięciowe i prądowe. Wyjście napięciowe wykorzystywane jest, gdy przyrząd wskazujący lub rejestrujący pracuje napięciowo, a prądowe, gdy jest przyrządem pracującym prądowo.

Wybór przyrządu wyjściowego zależy od:

- metody i wymaganej dokładności pomiaru,
- charakteru mierzonej wielkości wynikającej z częstotliwości,
- rodzaju sygnału /analogowy, cyfrowy/ i sposobu jego dalszego wykorzystania.

Ogólnie przyrządy wyjściowe można podzielić na:

- mierniki wskazujące,
- przyrządy rejestrujące,
- elementy wejściowe układów automatycznego sterowania i rejestracji.

Szczegółowe opisy budowy i zasady działania tych przyrządów znaleźć można w literaturze specjalistycznej [21], [32], [65], [82]. W niniejszym opracowaniu podane zostaną przykłady ciekawszych rozwiązań elektro-  
nicznych przyrządów wyjściowych o zapisie ciągłym<sup>1</sup>, stosowanych obecnie w miernictwie wielkości nieelektrycznych wraz z podaniem ważniejszych danych techniczno-eksploatacyjnych.

### 3.1. Mierniki wskazujące

Do mierników wskazujących zaliczyć należy:

- klasyczne mierniki wskazówkowe na prąd zmienny i stały /galwanometry, amperomierze, woltomierze itp./,
- mierniki wskazujące z wyjściem cyfrowym,
- przyrządy odbiorcze łącz synchronicznych /selsyn odbiorczy, logometr wielociekowy itp./.

Przyrządy tego typu stosowane są głównie przy pomiarach procesów quasi-statycznych metodą wychyłową lub zerową.

---

<sup>1</sup> Przyrządy o zapisie punktowym, w tym rejestratory odbijające, drukujące, z racji tego, że znajdują zastosowanie jedynie przy pomiarach procesów ustalonych, w opracowaniu tym nie będą szerzej omawiane.



### 3.2. Przyrządy rejestrujące

Przy pomiarach procesów dynamicznych zachodzi potrzeba określenia przebiegu badanego procesu w funkcji czasu, dlatego częstotliwość jest zasadniczym parametrem decydującym o wyborze rodzaju przyrządu rejestrującego.

Do częstotliwości rzędu kilkudziesięciu [Hz] stosuje się przyrządy podobne do galwanometrów, z zapisem mechanicznym, zwane pisakami.

W zakresie częstotliwości do kilku [kHz] stosowane są oscylografy pętlicowe, rejestrujące przebieg badany na papierze światłoczułym.

Natomiast przebiegi o częstotliwości rzędu [MHz] rejestrowane mogą być za pomocą oscyloskopów katodowych, przy zastosowaniu specjalnych przystawek filmowych.

Do kategorii szybkich rejestratorów zaliczyć należy również zapis na taśmie magnetofonowej /do 5 [kHz]/. Ten rodzaj zapisu jest bardzo dogodny, ponieważ poprzez transformację częstotliwości, uzyskiwaną w drodze zmiany skali czasu, przy odtwarzaniu daje możliwość dokładnej analizy przebiegu badanego. Magnetofony pomiarowe budowane są zwykle jako układy wielokanałowe /przykładowo dwukanałowy 7001 firmy Brüel-Kjaer lub czternastokanałowy EMM 140-Tesla/.

#### 3.2.1. Pisaki elektromagnetyczne

W rejestratorach tego typu zapis realizowany jest za pośrednictwem pisaka lub rysika, który kreśli na przesuwającej się ze stałą prędkością taśmie przebieg mierzonego procesu. Napęd pisaka odbywa się z reguły za pomocą systemu magnetoelektrycznego /cewka w polu stałego magnesu lub odwrotnie/, ruchem obrotowym lub posuwisto-zwrotnym.

Ze względu na znaczną moc potrzebną głównie na pokonanie oporów tarcia między pisakiem a papierem i momentu bezwładności układu piszącego pisaki zasilane są często pośrednio przez wzmacniacz mocy prądu stałego.

Podstawowymi parametrami rejestratorów pisakowych są: szybkość zapisu, częstotliwość graniczna zapisu i pobór prądu przy pełnym wychyleniu organu piszącego.

Zaletą tych rejestratorów jest możliwość bezpośredniej obserwacji badanego procesu w trakcie pomiaru. Natomiast zbyt niski zakres częstotliwości, sięgający zaledwie 100 [Hz], znacznie ogranicza ich stosowanie.

Rozszerzenie zakresu częstotliwości uzyskać można przy zastosowaniu bezstykowego zapisu strumieniem cieczy. Przyrządy o tego typu zapisie



noszą nazwę mingografów. Ten rodzaj zapisu, dzięki małej bezwładności układu piszącego, pozwala na rejestrację przebiegów o częstotliwości powyżej 1 000 [Hz].

Ogólnie można stwierdzić, że rejestratory pisakowe są z racji prostej budowy i obsługi wygodne w praktyce i należy je stosować, jeżeli tylko częstotliwość przebiegu badanego mieści się w ich zakresie pomiarowym.

Ze stosowanych na szczególną uwagę zasługują: jednokanałowy pisak firmy Brüel-Kjaer i wielokanałowe pisaki firmy Philips i Siemens /przy czym te ostatnie piszą strumieniem cieczy/, jak również wielokanałowe pisaki produkcji ZSRR serii N320 i N327.

W laboratorium MRC Politechniki Krakowskiej przy wielu zadaniach pomiarowych duże usługi oddaje pięciokanałowy pisak produkcji ZSRR typ H 327-5; oto jego podstawowe dane techniczne:

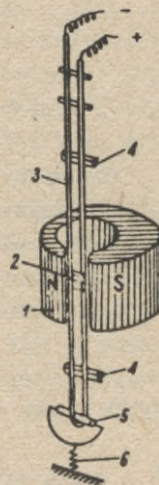
- zakres częstotliwości  $0 \div 100$  [Hz],
- błąd liniowości 4 %,
- maksymalna czułość 0,5 [mm/mV],
- szerokość papieru rejestrującego 240 [mm],
- szerokość zapisu na jednym kanale 40 [mm],
- rodzaj zapisu atramentowy piórkowy,
- system współrzędnych krzywoliniowy,
- rodzaj napędu silnik synchroniczny,
- szybkość przesuwu taśmy  $(1 \div 250)$  [mm/s]  
regulowana skokowo  
w ośmiu stopniach

### 3.2.2. Oscylografy pętlicowe

Najczęściej stosowanym przyrządem rejestrującym jest oscylograf pętlicowy. Pozwala on na pomiar procesów dynamicznych w zakresie częstotliwości do kilku [kHz]. Podstawowym jego elementem są galwanometry pętlicowe, odznaczające się dużą czułością oraz zakresem przenoszonych częstotliwości. Zasadę działania galwanometru pętlicowego pokazano na rys. III-10.

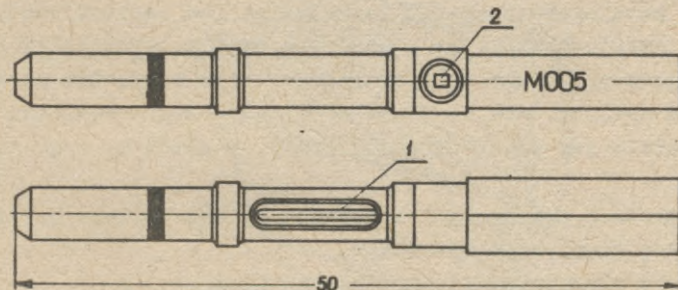


Podczas przepływu prądu przez pętlicę, na skutek oddziaływań dwóch pól magnetycznych /jednego wynikającego z przepływu prądu oraz drugiego wytworzonego przez magnes stały/, pętlica będzie dążyła do obrócenia się o pewien kąt, proporcjonalny do natężenia prądu przez nią płynącego. Umieszczone w środku pętlicy niewielkie lustro steruje /przez odbicie/ promień świetlny padający ze specjalnego źródła światła. O zmianach kąta ustawienia lusterka, a zatem i kąta odbicia promienia świetlnego decydują mierzone zmiany prądu płynącego przez pętlicę. Przedstawiona tu zasada pracy jest taka sama, jak znanych przyrządów magnetoelektrycznych, z tym, że wskazówkę zastępuje promień świetlny, a skalę taśma światłoczuła.



Rys.III-10. Zasada działania galwanometru pętlicowego: 1 - magnes, 2 - lustro, 3 - pętlica, 4 - podpory, 5 i 6 - zawieszenie sprężyste

Galwanometry pętlicowe wykonane są najczęściej w postaci wymiennych wkładek /rys.III-11/, umieszczonych w bloku magnetycznym, który stanowi



Rys.III-11. Wygląd zewnętrzny galwanometru pętlicowego typ MO05 prod.ZSRR; 1 - pętlica, 2 - lustro

jeden z elementów oscylografu. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi pętlicę są:

- czułość prądowa lub napięciowa,
- zakres przenoszonych częstotliwości,
- rodzaj tłumienia /cieczowe, elektromagnetyczne/ i jego współczynnik,
- dopuszczalne obciążenie prądowe.



Dla poszczególnych typów pętlic katalogi podają najczęściej czułość prądową jako długość wychylenia plamki świetlnej, gdy przez pętlę przepływa prąd o natężeniu  $1 \text{ [mA]}$  /wymiar  $[\text{cm}/\text{mA}]$ /. Ten sposób przedstawienia czułości pętlicy jest słuszny dla pętlicy współpracującej z określonym typem oscylografu /dla określonej długości drogi świetlnego promienia/. Ponieważ droga promienia świetlnego dla różnych typów oscylografów jest różna /np. dla K-115 prod. ZSRR wynosi  $0,3 \text{ [m]}$ , dla 80S-4 prod. NRD wynosi  $1 \text{ [m]}$  wprowadzono inne pojęcie czułości, pozwalające na porównywanie pętlic między sobą.

Czułość prądową pętlicy /niezależna od typu oscylografu/ określa odchylenie plamki świetlnej w  $[\text{cm}]$  pod wpływem prądu o natężeniu  $1 \text{ [mA]}$ , gdy długość promienia świetlnego wynosi  $1 \text{ [m]}$ . Wymiar  $\left[ \frac{\text{cm}}{\text{mA} \cdot \text{m}} \right]$ .

Dobór pętlicy o odpowiedniej czułości pozwala uzyskać na oscylografie zapis o dogodnej skali amplitudy przebiegu mierzonego. Zależność tę obrazuje wzór:

$$A = i_{\text{max}} \cdot S$$

gdzie:  $A$  - amplituda zapisu  $[\text{cm}]$ ,

$i_{\text{max}}$  - maksymalna wartość prądu  $[\text{mA}]$ ,

$S$  - czułość prądowa  $[\text{cm}/\text{mA}]$ .

W danych katalogowych pętlic podawane są ich częstotliwości własne oraz zakres częstotliwości przenoszonych wraz z określeniem wielkości błędu dynamicznego. Dobór pętlicy polega w tym przypadku na wybraniu takiego typu pętlicy, aby częstotliwość mierzonego przebiegu znalazła się w przedziale jej częstotliwości pracy, a zatem by błąd dynamiczny był mały.

W oscylografach pętlicowych stosowane są dwa rodzaje pętlic:

- pętlice z tłumieniem cieczowym,
- pętlice z tłumieniem elektromagnetycznym.

Niemal wszystkie pętlice tłumione cieczowo konstruowane są tak, aby ich współczynnik tłumienia wynosił  $\epsilon = 0,65$ . Wartość ta daje praktycznie największy zakres przenoszonych częstotliwości przy najmniejszym zniekształceniu amplitudy mierzonego przebiegu. Dla pętlic tego rodzaju, w przeciwieństwie do pętlic tłumionych elektromagnetycznie, wartość wspomnianego współczynnika jest w szerokim zakresie niezależna od rezystancji obwodu przyłączonego do zacisków pętlicy. Natomiast wykorzystanie w pomiarach znacznie czulszych pętlic tłumionych elektromagnetycznie pociąga za sobą konieczność doboru obwodu zasilającego w ten

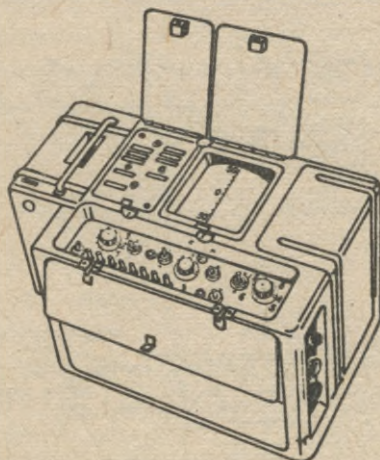


sposób, aby jego rezystancja ściśle odpowiadała żądanej dla danej pętlicy wartości rezystancji. W tym bowiem tylko przypadku spełnione są optymalne warunki pracy pętlicy.

Zapis badanego przebiegu na oscylografie pętlicowym odbywa się za pośrednictwem promienia świetlnego, odbitego od lusterka galwanometru i kierowanego następnie poprzez układ optyczny na przesuwную taśmę światłoczułego papieru. Źródłem światła w nowoczesnych oscylografach jest wysokociśnieniowa lampa rtęciowa lub ksenonowa, dająca możliwość - przy zastosowaniu odpowiednich taśm rejestrujących, czułych na ultrafiolet - uzyskiwania zapisu przebiegu badanego bez konieczności obróbki fotograficznej. Zapis ulega bowiem samowywołaniu przy świetle dziennym.

W Polsce oscylografy nie są obecnie produkowane, natomiast w ramach centralnego importu sprowadzane są oscylografy radzieckie /w tym głównie H-700, H-105, K-115, K12-22/, ponadto często spotykane są także oscylografy prod.NRD typ 8SO-4 oraz 12IS-1 i 8LS-1 oraz firmy Hottingera serii AF i Honeywella typ Viscorder.

Dla przykładu omówione tu zostaną niektóre parametry pracy i dane techniczne oscylografu K-115 produkcji ZSRR /rys.III-12/.



Rys.III-12. Oscylograf pętlicowy K-115 prod. ZSRR /wygląd zewnętrzny/

Oscylograf ten jest typowym, nowoczesnym 12-kanalowym rejestratorem pętlicowym. Współpracuje z pętlicami tłumionymi cieżkowo i elektromagnetycznie typu M 1012, M 1013, M 1015 i M 004. Posiada szeroki zakres prędkości przesuwu taśmy od 0,5 do 10000 [mm/s]. Zaopatrzony jest w specjalną kasetę, która umożliwia rejestrację zarówno na papierze czułym na ultrafiolet, jak również na zwykłym papierze oscylograficznym. Istnieje możliwość zaprogramowania długości odcinków papieru rejestrującego, prze-

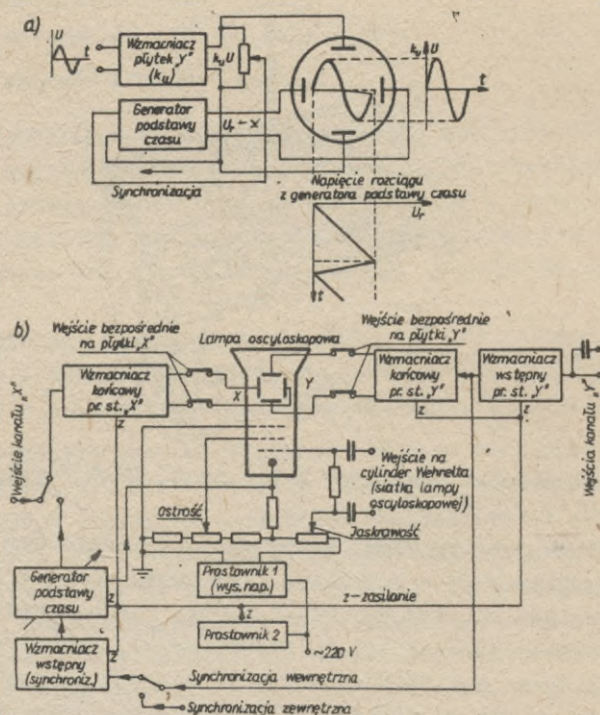


znaczonych do zapisu danego przebiegu w granicach od 0,4[m] do 4 [m]. Przy szerokości papieru 120 [mm] kaseeta mieści 25 [m] taśmy. Znacznik czasu rysuje linie poprzeczne przez całą szerokość papieru, w odstępach regulowanych w zakresie  $(0,002 \div 2)$  [sek], przy czym jest on zsynchronizowany z nastawioną prędkością przesuwu taśmy. I tak, przy prędkościach  $(0,5 \div 5)$  [m/s], znacznik rysuje linie co 2 [sek], przy prędkościach  $(10 \div 50)$  [m/s] co 0,2 [sek], przy prędkościach  $(125 \div 500)$  [m/s] co 0,02 [sek]. Oscylograf posiada układ do zdalnego sterowania.

### 3.2.3. Oscyloskopy

Do pomiarów szybkozmiennych procesów dynamicznych, jak również do wizualnej obserwacji różnych przebiegów i charakterystyk, stosowane są przyrządy zwane oscyloskopami lub oscylografami katodowymi.

Zasadę działania oscyloskopu pokazano na rys.III-13a. Napięcie zmienne, którego przebieg jest badany, doprowadzone jest poprzez wzmacniacz



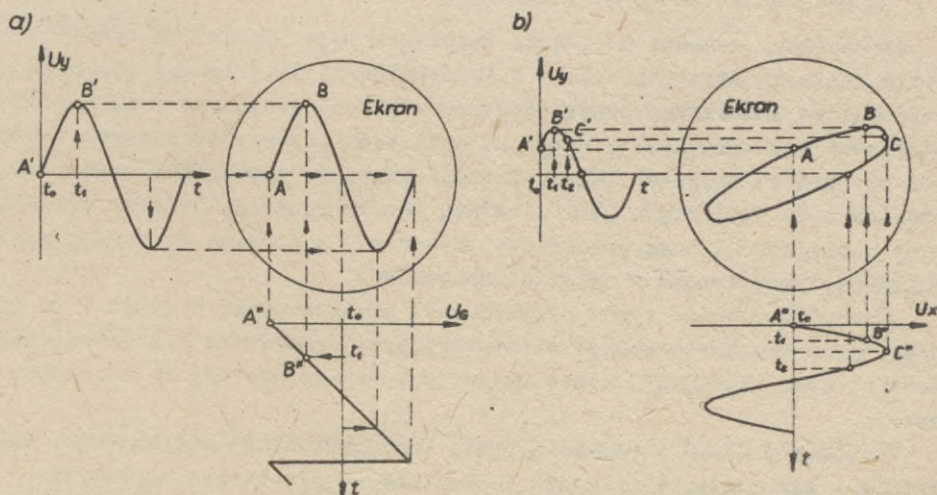
Rys.III-13. Oscyloskop katodowy: a/ zasada działania, b/ schemat blokowy



do płytek odchylenia pionowego Y lampy oscyloskopowej. Natomiast do płytek odchylenia poziomego X tej lampy doprowadzane jest napięcie z liniowego generatora podstawy czasu. W wyniku sumarycznego oddziaływania tych dwóch napięć na strumień elektronów, na ekranie lampy oscyloskopowej występuje obraz przebiegu napięcia badanego w funkcji czasu. Aby uzyskać nieruchomy obraz na ekranie, częstotliwość impulsów liniowej podstawy czasu musi być równa lub musi stanowić wielokrotność częstotliwości przebiegu badanego. Uzyskuje się to dzięki procesowi synchronizacji czyli wymuszania częstotliwości generatora podstawy czasu przez badany przebieg, co obrazuje rys.III-13a.

Oscyloskopy wykonywane są w wersji jedno-, dwu- lub wielostrumieniowej z lampami o krótkim i długim czasie poświaty, z linearnym lub nie linearnym /kołowym, spiralnym/ napięciem podstawy czasu. Zakresy częstotliwości pomiarowych w nowoczesnych oscyloskopach mogą się zawierać w granicach od zera do kilkudziesięciu [MHz]. Schemat blokowy prostego oscyloskopu przedstawiono na rys.III-13b.

Oscyloskop stosowany jest do różnych celów pomiarowych. Głównym jego zastosowaniem jest obserwacja przebiegów napięcia w funkcji czasu  $U = f/t$  lub charakterystyk typu  $U_y = f/U_x$ . W tym drugim przypadku oczywiste jest, że generator podstawy czasu musi być odłączony, tzn. do płytek odchylenia pionowego dołączone jest napięcie  $U_y/t$ , a do płytek odchylenia poziomego napięcie  $U_x/t$ . Jeżeli oba przebiegi  $U_x/t$  i  $U_y/t$

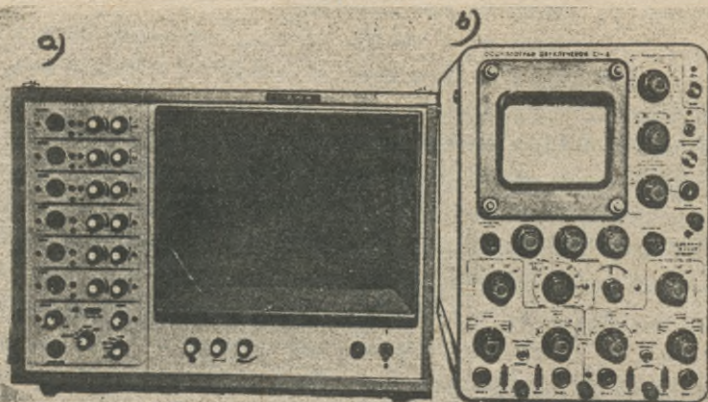


Rys.III-14. Konstrukcja graficzna wyjaśniająca powstanie na ekranie lampy oscyloskopowej: a/ nieruchomego obrazu sinusoidy, b/ nieruchomego obrazu elipsy



są sinusoidalnymi funkcjami czasu, to przy jednakowych częstotliwościach obu napięć na ekranie uzyskujemy elipsę (rys.III-14b), której położenie zależy od przesunięcia fazowego i stosunku amplitud napięć. Ten sposób pozwala również na określenie znaku przesunięcia fazowego.

W praktyce pomiarowej często wystarcza bezpośrednia obserwacja obrazów badanych przebiegów na ekranie oscyloskopu. W wielu jednak przypadkach, zwłaszcza gdy chodzi o badanie stanów przejściowych, procesów nieustalonych, pożądana jest rejestracja. Stosowane są wtedy specjalnie przystosowane do tego celu kamery fotograficzne.



Rys.III-15. Oscyloskopy katodowe /wygląd zewnętrzny/: a/ sześciostromieniowy typ OPD-280U prod. CSSR, b/ dwustrumieniowy C1-18 prod. ZSRR

Oscyloskopy z uwagi na zasadę działania mogą pracować w bardzo szerokim zakresie częstotliwości. W szczególności oscyloskopy katodowe wyposażone we wzmacniacz prądu stałego są bardzo przydatne w pomiarach wielkości mechanicznych z uwagi na możliwość przenoszenia częstotliwości od zera do kilkuset [kHz]. Z racji tego, że impedancja wejściowa oscyloskopów jest rzędu [MΩ], należą one do grupy przyrządów pracujących napięciowo i mogą pracować w połączeniu z dowolną aparaturą wzmacniającą, zaopatrzoną w wyjście napięciowe.

Duża różnorodność typów oscyloskopów produkowanych w kraju i za granicą, przy ich równoczesnej uniwersalności, pozwala na przedstawienie jedynie tych rozwiązań, które wg autorów uznane zostały za najciekawsze.

Oscyloskop C1-29 z pamięcią, prod. ZSRR, gwarantuje odtworzenie, zmierzenie i zapamiętanie ciągłych i impulsowych przebiegów czasowych w przedziale od 4 [μsek] do 4 [sek] o amplitudzie (0,2 ÷ 100) [V]. Wzmacniacz odchylenia pionowego ma zakres pomiarowy (0 ÷ 2) [MHz] i pozwala



rozpatrywać przebiegi o szybkości narastania  $0,5 [\mu\text{sek}]$ , przy czułości  $100 [\text{mV/mm}]$ . Podstawa czasu kalibrowana jest w 18 zakresach ( $1 \div 500$ )  $[\mu\text{sek}]$  na  $1 [\text{cm}]$ . Oscyloskop posiada kalibrator amplitud, pozwalający na pomiar amplitud i impulsów o czasie trwania od  $1 [\mu\text{sek}]$  do  $4 [\text{sek}]$  i sinusoidalnych sygnałów do  $200 [\text{kHz}]$  w przedziale napięć ( $0,2 \div 100 [\text{V}]$ ). W oscyloskopie przewidziano ręczne i automatyczne kasowanie zapisanych procesów; przy automatycznym kasowaniu czas eksponowania przebiegu jest regulowany i wynosi od  $5 [\text{sek}]$  do  $2 [\text{min}]$ . Maksymalny czas utrzymywania /pamięci/ zarejestrowanego przebiegu wynosi  $16 [\text{godz}]$ .

Oscyloskop dwustrumieniowy C1-18 prod. ZSRR przeznaczony jest do jednoczesnego śledzenia dwóch nisko - częstotliwościowych przebiegów ciągłych i impulsowych o częstotliwości od  $0,01 [\text{Hz}]$  do  $1 [\text{MHz}]$ , o napięciu od  $1 [\text{mV}]$  do  $500 [\text{V}]$ . Czas narastania impulsowych przebiegów od  $0,5 [\mu\text{sek}]$  do  $5 [\text{sek}]$ . Czułość przy częstotliwości do  $200 [\text{kHz}]$  wynosi  $20 [\text{mm/mV}]$ . Przyrząd posiada źródło napięcia kalibrującego stałego i zmiennego o częstotliwości  $50 [\text{Hz}]$ , napięcie to jest regulowane w zakresie od  $1 [\text{mV}]$  do  $1 [\text{V}]$ .

Oscyloskop sześciostrumieniowy OPD 280U produkcji TESLA Pardubice służy do obserwowania sześciu niezależnych przebiegów. Dzięki wyposażeniu go w wymienne wzmacniacze typu XN-350/12/13 XN-350/14 zakres pomiarowy ulega znacznemu rozszerzeniu. Generator podstawy czasu przenosi pasmo ( $0,5 \div 50$ )  $[\text{Hz}]$ , a wzmacniacz pionowy ( $0 \div 300$ )  $[\text{kHz}]$ . Czułość wzmacniacza pionowego wynosi  $0,5 [\text{V/cm}]$ . Przyrząd ten jest szczególnie przydatny w dydaktyce, z racji zastosowania w nim 19-calowej lampy oscylograficznej.



## Rozdział IV

## POMIAR WYBRANYCH PARAMETRÓW PRACY MASZYN

Istotnym elementem decydującym o powodzeniu i jakości prowadzonych badań jest wybór metody pomiarowej, aparatury oraz wariantu układu pomiarowego właściwych dla pomiaru danego parametru pracy maszyny. Różnorodność czujników, systemów przetwarzania, rejestracji itp. zmusza do wyodrębnienia grup pomiarowych, obejmujących zagadnienia związane z pomiarami takich wielkości nielektrycznych, jak:

- 1/ pomiar przemieszczeń,
- 2/ pomiar prędkości,
- 3/ pomiar naprężeń,
- 4/ pomiar sił,
- 5/ pomiar momentów obrotowych,
- 6/ pomiar drgań,
- 7/ pomiar ciśnień,
- 8/ pomiar temperatury,
- 9/ pomiar przepływu.

Wymienione grupy pomiarowe zostały zawężone do zakresów i metod pomiarowych najbardziej przydatnych w badaniach maszyn roboczych ciężkich.

### 1. P o m i a r   p r z e m i e s z c z e ń l i n i o w y c h   i   k ą t o w y c h

Pomiary takich wielkości mechanicznych, jak wymiary geometryczne, położenie, przemieszczenie liniowe czy kątowe są ze względu na swe pokrewieństwo i proste wzajemne przetworzenie traktowane jako jedna grupa pomiarowa.

Typowe zagadnienia pomiarowe w tej dziedzinie można podzielić na następujące grupy:

- pomiary mikroprzemieszczeń   /od 0,1 [ $\mu\text{m}$ ] do 10 [ $\mu\text{m}$ ]/,
- pomiary małych przemieszczeń   /od 10 [ $\mu\text{m}$ ] do 10 [mm]/,
- pomiary dużych przemieszczeń   /rzędu [cm]/.



Do realizacji tych zadań pomiarowych stosowane są zarówno metody analogowe, jak i cyfrowe, przy równoczesnym wykorzystaniu różnych typów czujników. W celu zobrazowania przydatności do pomiarów przemieszczeń poszczególnych grup czujników elektrycznych przedstawiono ich zastosowanie wg praktycznego stopnia rozpowszechnienia w tablicy VIII.

Tablica VIII

| Wielkości mierzone         | Charakter pomiaru | Typ czujnika           |                              |                   |            |                   |               |                   |                   |                  |
|----------------------------|-------------------|------------------------|------------------------------|-------------------|------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|------------------|
|                            |                   | Bierny                 |                              |                   |            |                   |               | Czynny            |                   |                  |
|                            |                   | Tensometrycz. metalowy | Tensometrycz. półprzewodnik. | Potencjometryczny | Indukcyjny | Magneto-sprężysty | Pojemnościowy | Elektrodynamiczny | Piezo-elektryczny | Foto-elektryczny |
| długość - droga            | statyczne         | ×                      | ⊗                            | ×                 | ×          |                   |               |                   |                   | ×                |
|                            | quasi-statyczne   | ×                      | ○                            | ○                 | ×          |                   | ○             |                   |                   | ×                |
|                            | dynamiczne        | ○                      | ○                            |                   | ×          |                   | ×             | □                 | □                 | ○                |
| odkształcenia - naprężenia | statyczne         | ×                      | ○                            | ○                 | ×          | ×                 |               |                   |                   | ×                |
|                            | quasi-statyczne   | ×                      | ×                            | ⊗                 | ×          | ×                 | ○             |                   |                   | ○                |
|                            | dynamiczne        | ×                      | ×                            |                   | ×          |                   | ×             | □                 |                   | ⊗                |

- × często stosowana metoda wykorzystywana do pomiaru w szerokim zakresie amplitud i częstotliwości  
 ○ często stosowana metoda wygodna dla wąskiego zakresu amplitud i częstotliwości  
 ⊗ rzadko stosowana metoda wygodna dla wąskiego zakresu amplitud i częstotliwości  
 □ szeroko stosowana metoda pomiaru pośredniego



Z tablicy tej wynika, że najbardziej uniwersalne, a zatem najczęściej stosowane są czujniki tensometryczne i indukcyjne. Nie jest to jednak reguła, bowiem o wyborze czujnika i układu pomiarowego decyduje, jak wiadomo, wiele czynników, do najważniejszych z nich zaliczymy czułość /zdolność rozdzielczą/, prędkość zmian parametru, stopień dopuszczalnego oddziaływania czujnika na obiekt pomiaru, jak również wpływ czynników zewnętrznych i wymaganą dokładność pomiaru.

### 1.1. Pomiary mikroprzemieszczeń

W badaniach maszyn i urządzeń mikroprzemieszczenia elementu powstają w wyniku wywołania w nim stanu naprężeń. Ponieważ określenie stanu naprężeń w elemencie realizowane bywa często poprzez pomiar jego mikroprzemieszczenia /tensometria/, dlatego też omówienie tej grupy pomiarów znajduje się w p. 3 tego rozdziału, który dotyczy pomiaru naprężeń.

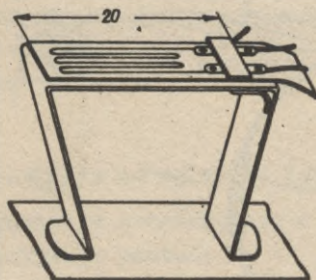
### 1.2. Pomiar małych przemieszczeń

Pomiary te obejmują przemieszczenia rzędu dziesiątych części milimetra do kilku milimetrów. Stosowane są tu przede wszystkim czujniki tensometryczne i indukcyjne, w wersji różnicowej lub transformatorowej. Z innych grup czujników na szczególną uwagę zasługują czujniki pojemnościowe, wyróżniające się bardzo wysoką czułością /wykrywają zmiany przemieszczeń rzędu dziesiątych części  $[\mu\text{m}]$ / oraz fotoelektryczne, jako bardzo dogodne do cyfrowych metod pomiaru. Czułość tych ostatnich zależy od zastosowanego układu optycznego i waha się w granicach  $(10 \div 100)[\mu\text{m}]$  przy zabezpieczeniu dokładności pomiaru w klasie 0,1.

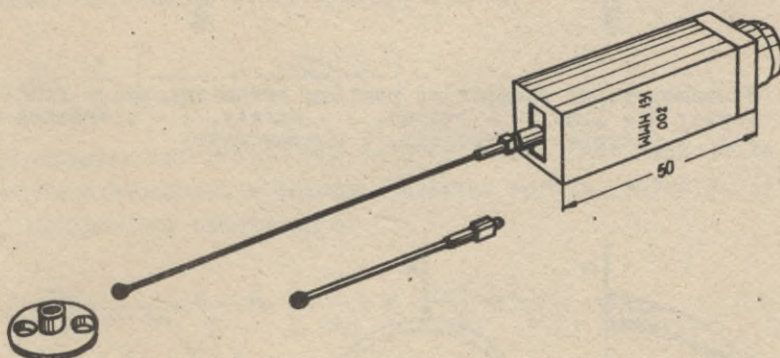
**C z u j n i k i   t e n s o m e t r y c z n e.** W przypadku tej grupy czujników pomiar dokonywany jest przy udziale elementów sprężystych w kształcie belek, ram, półprścieni i pierścieni, stanowiących bazę przy pomiarach przemieszczeń rzędu dziesiątych części milimetra. W celu wykonania pomiaru, na elementy te nakleja się tensometry, a sam element mocuje się na obiekcie badanym. Rys.IV-1 podaje przykład usytuowania tensometru na elemencie w kształcie ramki.

W oparciu o te zasady wykonywane są tensometryczne czujniki przemieszczeń typ WWH/131, 201, 301, 401, 501/ produkcji RFT /NRD/ o zakresach pomiarowych odpowiednio  $\pm 1 [\text{mm}]$ ,  $\pm 2 [\text{mm}]$ ,  $\pm 5 [\text{mm}]$ ,  $\pm 10 [\text{mm}]$ ,  $\pm 20 [\text{mm}]$  - rys.IV-2. Elementem sprężystym w tych czujnikach jest belka wysięgnikowa z naklejonymi tensometrami półprzewodnikowymi. Czuj-





Rys.IV-1. Element pośredniczący z naklejo-  
nym czujnikiem tensometrycznym



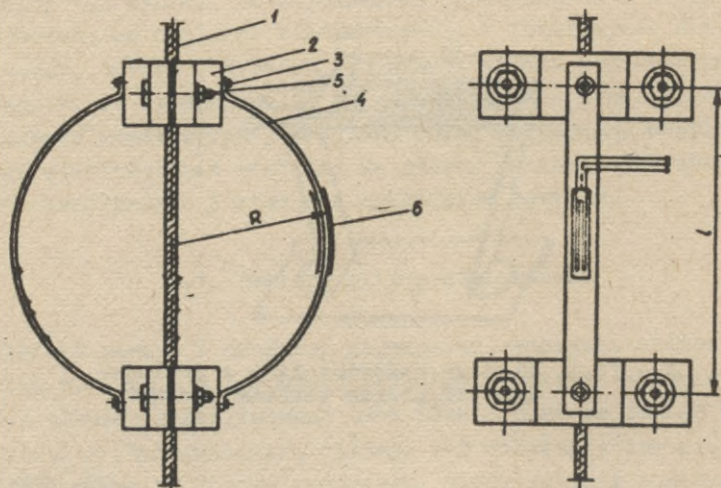
Rys.IV-2. Tensometryczny czujnik do pomiaru przemieszczeń ty-  
pu WWH... prod.RFT /wygląd zewnętrzny/ zbudowany w  
oparciu o tensometry półprzewodnikowe

niki te przeznaczone są do współpracy z miernikiem HLA-101 i zapewnia-  
ją pomiar w klasie 0,5.

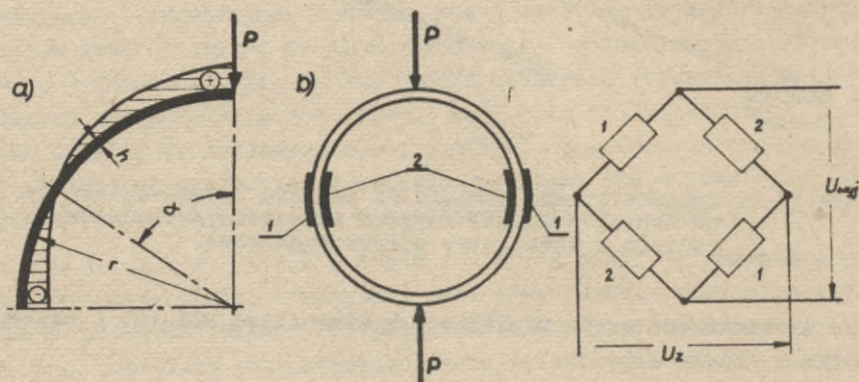
Szczególnego omówienia, ze względu na zastosowanie w pomiarach ma-  
szyn roboczych ciężkich, wymaga czujnik wykonany na bazie elementu  
sprężystego w kształcie pierścienia, służący do pomiaru przemieszczeń  
w linie stalowej. Przykład takiego czujnika został pokazany na rys.  
IV-3. Pierścień /4/ jest przymocowany do obejm /2/ za pomocą wkrętów  
/3/. Obejmy /2/ osadzone są na linie /1/ i skręcone śrubami /5/.

Rys.IV-4 określa miejsca naklejenia tensometrów /6/ na pierścieniu  
sprężystym /miejsca te wyznaczone są na podstawie rozkładu stanu naprę-





Rys. IV-3. Tensometryczny czujnik do pomiaru przemieszczeń w linie stalowej: 1 - lina, 2 - obejmą, 3 - wkręty, 4 - pierścień sprężysty, 5 - śruba zaciskająca, 6 - tensometry



Rys. IV-4. Rozkład naprężeń na pierścieniu sprężystym pod działaniem siły ściskającej wraz z układem połączeń tensometrów

żeń w pierścieniu/. Moment gnący w miejscu naklejenia tensometru wynosi [73]:

$$M = 0,18 P \cdot r \text{ [kGcm]}$$

(1)



gdzie:  $P$  - siła [kG],  
 $r$  - promień pierścienia [cm].

Naprężenia panujące w rozpatrywanym przekroju oblicza się ze wzoru:

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ [kG/cm}^2\text{]} \quad (2)$$

gdzie:  $W$  - wskaźnik przekroju na zginanie [cm<sup>3</sup>].

Dla pierścienia o przekroju prostokątnym o szerokości  $b$  i grubości  $h$  zależność ta przyjmuje postać:

$$\sigma \approx \frac{P}{2bh} + \frac{1,092 P \cdot r}{bh^2} \quad (3)$$

Odształcenie można wtedy wyrazić wzorem:

$$\varepsilon = \frac{P}{E} \left[ \frac{1}{2bh} + \frac{1,092 r}{bh^2} \right] \quad (4)$$

Uwzględniając zależność  $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$  oraz fakt naklejenia czterech tensometrów połączonych w układzie pełnego mostka, patrz p.3 tego rozdziału, otrzymujemy ostatecznie:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{-4 k \cdot P}{E} \left[ \frac{1}{2bh} + \frac{1,092 r}{bh^2} \right] \quad (5)$$

Ponieważ na półobwodzie pierścienia moment zginający dwukrotnie zmienia znak /rys.IV-4/, przechodząc przez wartości zerowe dla kątów  $\alpha = 52^\circ$ , należy więc zwrócić uwagę na to, aby czynna długość tensometru nie przekraczała obszaru naprężeń o jednym znaku.

Poprzednio podany wzór umożliwia dobór geometrycznych wymiarów sprężystego elementu pomiarowego oraz szacunkowe określenie wartości sygnału wyjściowego. W celu uzyskania charakterystyki przemieszczeniowej opisanego tu czujnika należy go poddać cechowaniu.

Czujnik ten /podobnie jak i inne czujniki tensometryczne/ współpracuje z uniwersalną aparaturą tensometryczną, co ma duże znaczenie praktyczne.

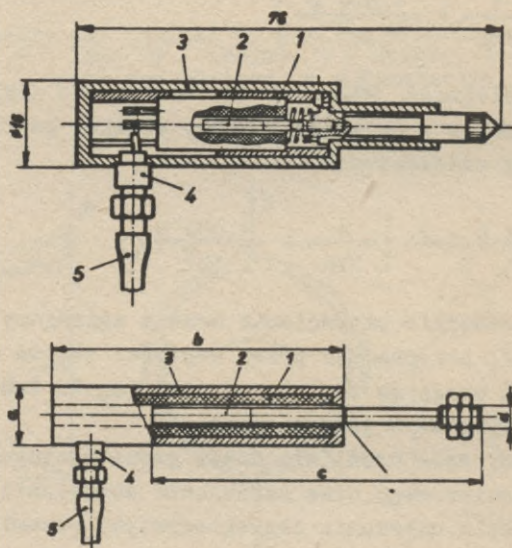
**C z u j n i k i i n d u k c y j n e.** Zgodnie z tym, co podano w rozdziale II, wśród czujników indukcyjnych najdogodniejsze są dwie wersje konstrukcyjne: różnicowa i transformatorowa.



Szczególne przydatność czujników indukcyjnych w technice pomiarowej wynika z takich zalet, jak: duża czułość, niewrażliwość na wilgoć i zmiany temperatury. Ponadto duże znaczenie ma także uniwersalność, polegająca na możliwości wykorzystywania ich zarówno do pomiarów szybkozmiennych jak i statycznych.

Względy te zadecydowały o tym, że czujniki indukcyjne są powszechnie i chętnie stosowane przy pomiarach małych przemieszczeń. Czujniki te produkowane są zarówno w wersji stykowej, jak i w wersji zbliżeniowej. Ta ostatnia pozwala na pomiar bezstykowy wymiarów geometrycznych, odległości i amplitud drgań, ferromagnetycznych elementów maszyn.

Wśród czujników indukcyjnych przemieszczeń stosowanych w laboratorium MRC Politechniki Krakowskiej wymienić należy czujniki OT produkowane przez Instytut Lotnictwa oraz Zakłady ELPO: serii W... i serii Tr /zbliżeniowe/, firmy Hottinger; serii IWT ... /rys.IV-5/ i serii IWB.. /zbliżeniowe/ firmy RFT Messelektronik. Czujniki te współpracują z uniwersalną aparaturą wzmacniającą tych samych firm.



Rys.IV-5. Indukcyjne czujniki przemieszczeń, typ IWT firmy RFT /NRD/: 1 - cewka, 2 - rdzeń, 3 - obudowa, 4 - końcówka złącza, 5 - kabel

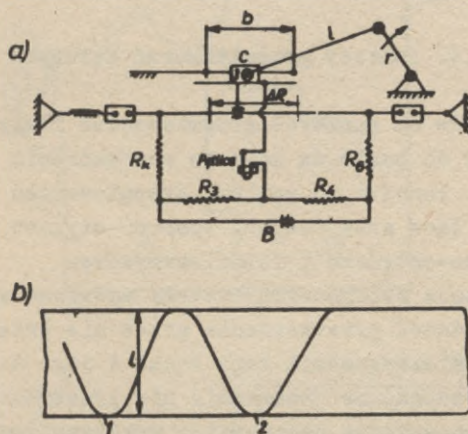
### 1.3. Pomiar dużych przemieszczeń

Pomiar dużych przemieszczeń, tzn. przemieszczeń rzędu [cm] realizowany jest zwykle przy użyciu czujników oporowo-stykowych. Zastosowanie



innych typów czujników, w tym głównie indukcyjnych i fotoelektrycznych, uzasadnione jest w przypadkach szczególnych, wynikających ze specyfiki zadania pomiarowego /np. pomiar dużych przemieszczeń przy wysokiej prędkości ich zmian lub konieczność prowadzenia pomiaru zdalnie itp./.

Zasadę działania czujników oporowo-stykowych przedstawiono w rozdz. II p.1. Na rys.IV-6 pokazano przykład rozwiązania czujnika oporowo-sty-



Rys.IV-6. Schemat czujnika oporowo-stykowego do pomiaru dużych przemieszczeń: a/ zasada działania, b/ rejestrowany przebieg przemieszczenia

kowego, przystosowanego do pomiaru przemieszczenia tłoka poruszającego się ruchem posuwisto-zwrotnym. Rolę elementu pomiarowego spełnia tu drut konstanowy, po którym ślizga się styk elektryczny związany mechanicznie z tłoczyskiem. Czujnik pracuje w układzie mostka, z którego sygnał rejestrowany jest za pomocą oscylografu pętlicowego. Można wykazać, że dla układu jak na rys.IV-6, wartość prądu płynącego przez pętlicę  $I_g$ , przy zrównoważeniu mostka o  $\Delta R$ , określona jest wzorem:

$$I_g = I \frac{R}{(R_g + R) - \frac{\Delta R^2}{2R}} \quad (6)$$

Zależność ta jest nieliniowa ze względu na występujący w niej człon  $\frac{\Delta R^2}{2R}$ . Przy bliższym rozpatrzeniu tego zagadnienia okazuje się, że jeżeli  $R > 10\Delta R$ , to błąd spowodowany tym członem wynosi około 1% i maleje ze zmniejszaniem się wartości  $\Delta R$ .



Maksymalna wartość mierzonego przemieszczenia ślizgacza jest ograniczona średnicą drutu pomiarowego i wartością rezystywności  $\rho$ . Dla otrzymania odpowiedniej wartości prądu w przekątnej mostka należy stosować galvanometry pętlicowe o rezystancji  $R_g = (2 \div 3)[\Omega]$ . Przy użyciu tej metody pomiaru poprawne rezultaty uzyskać można w zakresie przemieszczeń do 600 [mm] przy prędkościach do 15 [ms<sup>-1</sup>].

#### 1.4. Pomiary przemieszczeń kątowych

Większość czujników do pomiarów przemieszczeń liniowych może być bez trudu adaptowana do pomiarów kąta po wprowadzeniu prostego przełożenia mechanicznego. Ponadto do pomiaru przemieszczeń kątowych stosowane są czujniki typu łącz selsynowych, oporowo-stykowe w wersji obrotowej, oraz mechaniczno-optyczne i fotoelektryczne.

- Czujniki typu łącz selsynowych zostały omówione wyczerpująco w rozdz.II p.2.5. Dokładność przetwarzania przez nie przemieszczeń kątowych jest ograniczona sztywnością tego łącza i jego martwym polem. Największa możliwa dokładność przetwarzania nie przekracza 1°.

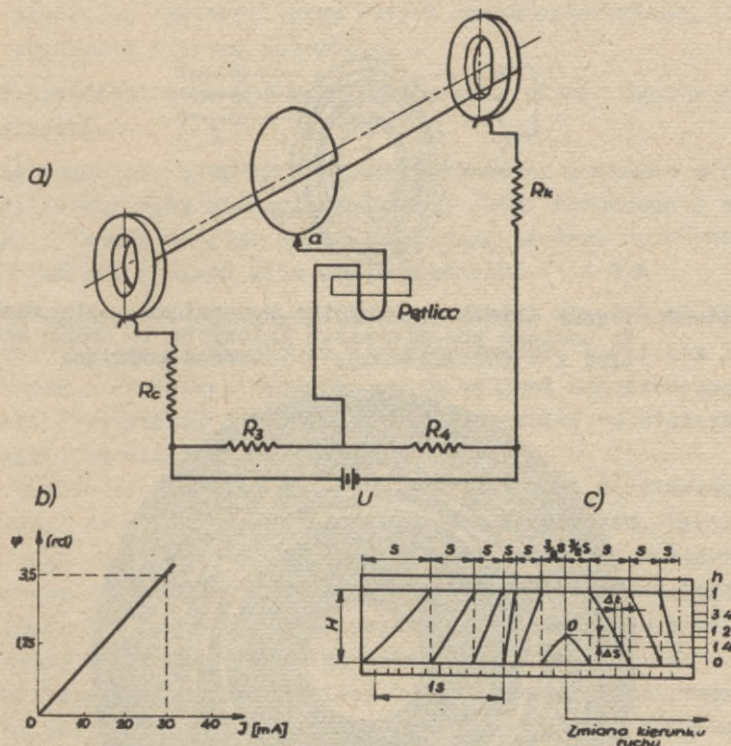
- Czujniki oporowo-stykowe najczęściej wykorzystywane są w postaci potencjometrów obrotowych o ograniczonym lub nie ograniczonym  $n \cdot 360^\circ$ /kącie obrotu. Dokładność ich w wersji technicznej jest rzędu 1 % a w wersji precyzyjnej 0,2 %.

Przyczynami niedokładności wskazań czujników oporowo-stykowych, oprócz niedokładności styku na ślizgaczu, są często opory i luzy w łożyskach. Tych ostatnich można uniknąć stosując wersję przedstawioną na rys.IV-7a. W tym przypadku drut rezystancyjny zakłada się w kształcie pętli na obwodzie izolowanego wału, którego obrót jest mierzony. Drut ten poprzez zbieracze szczotkowe włączony jest w układ mostka pomiarowego. Nieruchomy zbieracz /a/ ślizga się po drucie rozrównoważając mostek. Drut nawinięty na wał posiada niewielką przerwę. W przekątną mostka włącza się pętlę oscylografu. Podczas obrotu na oscylogramie otrzymywane są linie zapisu, proste przy ruchu jednostajnym i krzywe przy ruchu niejednostajnym. W momencie przechodzenia przez przerwę pętli drutu następuje przeskok, co pokazano na rys.IV-7c.

Maksymalna rzędna  $H = 2\pi$  równa się okresowi jednego obrotu. Dzieląc ją na "h" części, otrzymujemy punkty odpowiadające kątom obrotu wału

$$\alpha = 2\pi \frac{h}{H}$$





Rys.IV-7. Schemat czujnika oporowo-stykowego do pomiaru przemieszczeń kątowych: a/ schemat działania, b/ charakterystyka, c/ oscylogram pomiaru przemieszczeń kątowych

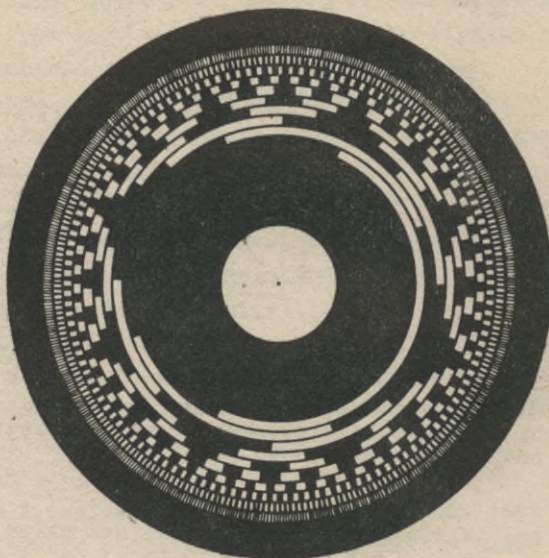
Ze względu na to, że stosowany jest tu taki sam układ mostka jak w przypadku pomiaru przemieszczeń liniowych, obowiązują takie same zależności i analogiczne zastrzeżenia w stosowaniu. Zwiększenie czułości i dokładności opisywanego czujnika można osiągnąć poprzez zastosowanie wielokrotnego zwoju.

- Czujniki mechaniczno-optyczne występują w różnych odmianach konstrukcyjnych. Na rys.IV-8a podano zasadę działania czujnika o elektrycznym wyjściu cyfrowym. Czujnik ten składa się ze źródła światła, tarczy kodującej i fotoelementów. Układ optyczny /źródło światła/ /1/ wytwarza określoną  $n$  liczbę równoległych wiązek światła, które padają na odpowiednie przetworniki fotoelektryczne /2/. Na drodze wiązek światła ustawiona jest tarcza kodująca /3/, złożona ze współśrodkowych pierścieni o segmentach przezroczystych i nieprzezroczystych - rys.IV-8b.





Rys.IV-8a. Zasada działania czujnika mechaniczno-optycznego do pomiaru przemieszczeń kątowych: 1 - źródło światła, 2 - fotoelementy, 3 - tarcza kodująca



Rys.IV-8b. Wygląd tarczy kodującej czujnika mechaniczno-optycznego

W zależności od kąтового położenia tarczy kodującej na wyjściach poszczególnych elementów fotoelektrycznych może pojawić się sygnał napięciowy /lub może nie być takiego sygnału/. W wyniku takiego działania sygnał wyjściowy czujnika podany jest w postaci kodu /sygnał binarny/. Dla  $n = 10$  wiązek światła dokładność odczytu wynosi  $0,35^\circ$ .

## 2. Pomiar prędkości liniowej i kątowej

Pomiary prędkości podzielić można na następujące grupy w zależności od rodzaju przemieszczenia:



- pomiary prędkości liniowych przy małych przemieszczeniach,
- pomiary prędkości liniowych przy dużych przemieszczeniach,
- pomiary prędkości kątowej /obrotowej/.

Pomiary prędkości mogą być realizowane przy użyciu metody analogowej lub cyfrowej.

- Metoda analogowa pomiaru prędkości polega na pomiarze wartości lub częstotliwości siły elektromotorycznej /SEM/ indukowanej w czujniku prędkości. Metoda ta jest obarczona zawsze błędami przetwarzania, dlatego dokładność pomiaru waha się w granicach  $(1 \div 2)\%$ .

- Metoda cyfrowa /impulsowa/ stosowana zwykle przy pomiarach prędkości kątowej polega na zliczaniu w okresie czasu  $t$  liczby impulsów  $N$  wytworzonych w czujniku. Zadaniem czujnika jest jednoznaczne przetworzenie ruchu /prędkości/ na impulsy. Do najczęściej tu stosowanych należą czujniki fotoelektryczne i indukcyjne.

Pomiar prędkości przy tej metodzie sprowadza się do mierzenia średniej wartości prędkości w czasie zwanym czasem pomiaru. Wynik pomiaru ujawniany jest po zakończeniu procesu zliczania. Czas, w którym wynik jest ujawniany, nosi nazwę czasu martwego, ponieważ układ pomiarowy w chwili ujawniania nie dokonuje zliczania. Dzięki zastosowaniu nowoczesnej aparatury elektronicznej błąd cyfrowego pomiaru prędkości łatwo można ograniczyć do wartości poniżej  $0,1\%$  zakresu pomiarowego.

Niekiedy przy pomiarach prędkości wykorzystywane są kombinowane metody pomiaru, tzn. analogowo-cyfrowe. Czujnik analogowy podaje wówczas charakter przebiegu zmian prędkości /odzworowuje funkcję w czasie/, a równocześnie dokładnego pomiaru w poszczególnych przedziałach dokonuje czujnik z układem cyfrowym.

Warto zauważyć, że pomiar prędkości może być realizowany bezpośrednio, tzn. przy użyciu czujników prędkości lub pośrednio przez różniczkowanie przebiegu przemieszczenia czy też całkowanie przebiegu przyspieszenia /metodą graficzną lub w drodze elektrycznej/.

## 2.1. Pomiar prędkości liniowej przy małych przemieszczeniach

W tej grupie pomiarów wykorzystywane są czujniki typu elektrodynamicznego i reluktancyjnego, omówione w rozdz.II tego opracowania.

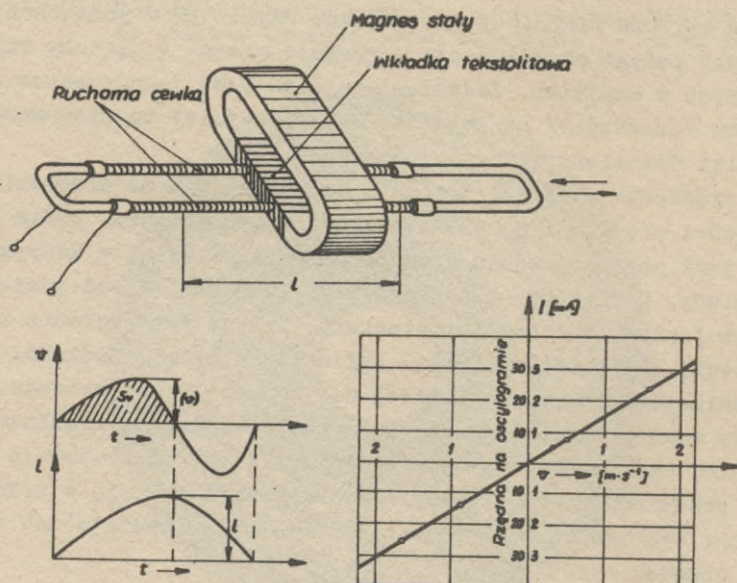
Czujniki elektrodynamiczne posiadają szereg zalet, wśród których na szczególne podkreślenie zasługuje to, że SEM, przez nie indukowana, ma wartość umożliwiającą pomiar bezpośredni, bez użycia aparatury wzmacniającej. Zakresy pomiarowe tych czujników określone są zakresami dopuszczalnych przemieszczeń, które nie przekraczają zwykle  $\pm 15$  [mm] oraz zakresami dopuszczalnych częstotliwości, które sięgają 2000 [Hz].



## 2.2. Pomiar prędkości liniowej przy dużych przemieszczeniach

Pomiar prędkości liniowej przy dużych przemieszczeniach realizowany jest zwykle przy udziale typowych czujników do pomiaru prędkości kątowej /np. prądnice tachometryczne, tachometry mechaniczne itp./, wyposażonych w odpowiednie przekładnie.

Niekiedy do pomiaru stosowane są także specjalne wersje czujników indukcyjnych elektrodynamicznych. Przykładem tego typu rozwiązań jest wersja konstrukcyjna czujników indukcyjnych, pokazana na rys.IV-9. Czuj-



Rys.IV-9. Schemat indukcyjnego czujnika prędkości liniowej przy dużych przemieszczeniach wraz z jego charakterystyką

nik ten składa się z magnesu stałego wykonanego w kształcie podkowy. Między biegunami magnesu ulokowana jest wkładka stała z tekstolitu, przystosowana do współpracy z ruchomą cewką, której rdzeń jest wykonany z miękkiej stali o dużej przenikliwości magnetycznej. Cewka pokryta jest warstwą izolacyjną w celu ochrony przed uszkodzeniami mechanicznymi. Wymiary cewki dobiera się w zależności od przemieszczenia. Przy pomiarach cewkę łączy się z obiektem, którego prędkość jest mierzona.

Wzorcowanie /cechowanie/ czujnika można przeprowadzać korzystając bezpośrednio z zapisu prędkości na oscylogramie pod warunkiem, że rejestrowane jest równocześnie przemieszczenie [43].



Ponieważ:

$$l = \int v \, dt = p_v \, p_t \, S_v \quad (7)$$

gdzie:  $l$  - przemieszczenie

$p_v$  - podziałka prędkości,

$p_t$  - podziałka czasu

$S_v$  - pole pod krzywą  $v$

stąd:

$$p_v = \frac{l}{S_v \, p_t} \left[ \frac{\text{m/s}}{\text{mm}} \right] \quad (8)$$

Dokładność określenia podziałki  $p_v$  zależy od dokładności przy planimetryowaniu pola pod krzywą  $v$ . Rzeczywista prędkość jest iloczynem podziałki przez wielkość rzędnej na oscylogramie w [mm].

### 2.3. Pomiar prędkości kątowej /obrotowej/

W tablicy IX zestawiono różne sposoby pomiaru prędkości obrotowej. Z przedstawionych przykładów największe znaczenie w praktyce mają prądnice tachometryczne. Pozwalają one na zdalny pomiar prędkości obrotowej przy jednoczesnej możliwości śledzenia zmian prędkości w czasie. Tę możliwość uzyskuje się przez podłączenie rejestratora do zacisków wyjściowych prądnicy /w miejsce miernika wychyłowego/.

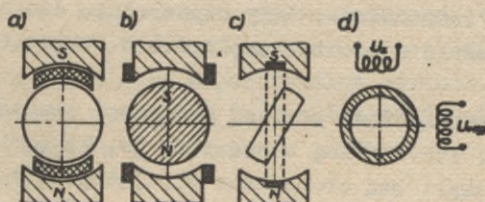
Na rys.IV-10 pokazano schematy różnych typów prądnic tachometrycznych. Pierwsze trzy/rys.IV-10a,b,c/ należą do grupy czujników elektrodynamicznych /patrz rozdz.II/, są zatem generatorami prądu stałego lub zmiennego. Na przykładzie pokazanym na rys.IV-10a przedstawiono schemat prądnicy asynchronicznej, należącej do grupy indukcyjnych czujników parametrycznych, działających w oparciu o zmianę indukcyjności wzajemnej "M".

Dokładność prądnic tachometrycznych nie przekracza na ogół 1 % przy zakresie mierzonych prędkości (500 ÷ 10 000)[obr/min]. Wadą prądnic tachometrycznych jest ich mała przydatność przy pomiarach stanów nieustalonych /np. przy badaniu zjawisk rozruchowych/. Wynika to zarówno z zakresu ich pracy, jak również dość znacznej stałej czasowej.



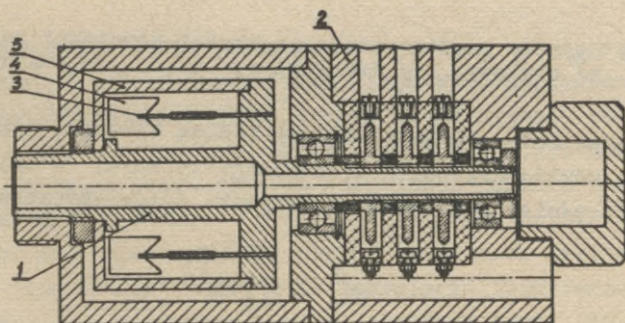
| Sposób pomiaru                                                      | Zasada działania                                                                               | Wielkość wyjściowa                                               | Uwagi                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Odśrodkowy:<br>miernik prędkości obrotowej                          | elementy pomiarowe w polu działania siły odśrodkowej /regulator Watta/                         | droga kąt                                                        | obecnie jeszcze używana metoda w ręcznych tachometrach może również uruchamiać styki /wyłącznik wartości granicznej/                       |
| Wibracyjny:<br>miernik prędkości obrotowej                          | wzbudzenie drgań jezyków metalowych                                                            | tylko wskazania                                                  | przestarzały                                                                                                                               |
| Miernik prędkości obrotowej wykorzystujący zjawisko prądów wirowych | oddziaływanie wzajemne między wirującym magnesem a płaskim przewodnikiem                       | tylko wskazania                                                  | przyrząd odporny mechanicznie, stosowany w pojazdach jako tachometr                                                                        |
| Tachoprądnice                                                       | prądu stałego                                                                                  | napięcia stałe                                                   | górne granice prędkości obrotowej ok. 6000 obr/min, najlepsza liniowość 1 %, najlepsza pulsacja ok. 1 %                                    |
|                                                                     | prądu zmiennego                                                                                | napięcie zmienne, częstotliwość. Po wyprostowaniu napięcia stałe | prędkość obrotowa praktycznie nieograniczona, brak ruchomych styków, wielkość filtru zmniejsza się przy wzroście par biegunów i liczby faz |
|                                                                     | reluktancyjne                                                                                  | napięcie zmienne lub częstotliwość                               | duża masa wirnika                                                                                                                          |
|                                                                     | asynchroniczne                                                                                 | napięcie zmienne lub częstotliwość                               | kl. 0,5<br>500 ÷ 10.000 obr/min                                                                                                            |
| Cyfrowy pomiar prędkości obrotowej                                  | zliczanie w określonych okresach czasu liczby impulsów, proporcjonalnej do prędkości obrotowej | patrz rys.                                                       |                                                                                                                                            |
| Stroboskop                                                          | optyczne porównanie z częstotliwością zewnętrzną                                               | tylko wskazania                                                  | nie wymaga dotknięcia do obiektu mierzonego i poboru mocy, szczególnie wygodny dla obiektów trudno dostępnych                              |





Rys.IV-10. Schematy różnych typów prądnic tachometrycznych: a/ stałoprądowa, b/ synchroniczna, c/ reluktancyjna, d/ asynchroniczna

Przy pomiarach stanów nieustalonych celowe jest stosowanie specjalnych czujników prędkości, których przykładem jest pokazany na rys.IV-11 tensometryczny czujnik prędkości obrotowej. Składa się on z beleczek /3/ na podstawce /1/ z naklejonymi tensometrami usytuowanymi równolegle do osi obrotu. Na końcach beleczek ulokowane są ciężary /4/. Ca-



Rys.IV-11. Tensometryczny czujnik prędkości obrotowej: 1 - podstawka wirująca, 2 - komutator rębciowy, 3 - beleczki pomiarowe, 4 - ciężary, 5 - osłona

łość znajduje się w ośrodku tłumiącym /olej/ i zabezpieczona jest osłoną /5/. Sygnał z wirujących czujników tensometrycznych przekazywany jest za pośrednictwem komutatora rębciowego /2/. Zasada pomiaru polega na określeniu składowej normalnej siły odśrodkowej.

$$F_n = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (9)$$

Eliminację składowej stycznej przyspieszenia względnego uzyskuje się dzięki dużej sztywności beleczek w kierunku poprzecznym i poprzez odpo-



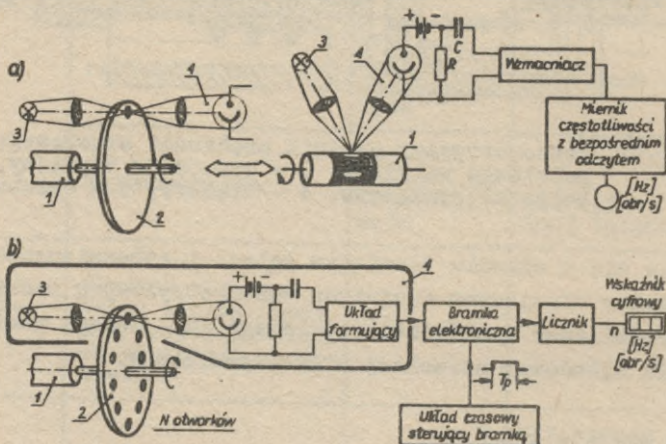
wiednie naklejenie tensometrów. Przy odpowiednio dobranym tłumieniu tego typu czujnik pozwala na pomiar prędkości w zakresie ( $0 \div 15\,000$ ) [obr/min].

Osobną grupę przyrządów do pomiaru prędkości obrotowej stanowią tachometry impulsowe. Ich wspólną cechą jest to, że pomiar realizowany jest bezstykowo, czyli bez obciążenia wirującego obiektu poddanego badaniu. Pomiar sprowadza się do przetworzenia obrotów wirującego obiektu na ciąg impulsów elektrycznych, których częstotliwość jest proporcjonalna do prędkości obrotowej, a następnie pomiaru tej częstotliwości za pomocą miernika częstotliwości /analogowego lub cyfrowego/. Wykorzystywane są tu różne systemy przetwarzania prędkości obrotowej na impulsy /rys.IV-12/.



Rys.IV-12. Sposoby przetwarzania prędkości obrotowej na impulsy: a/ stykowy, b/ indukcyjny, c/,d/ fotoelektryczny

Ze względu na duży zakres pomiarowy i dużą czułość, jak również niewrażliwość na zakłócenia polem elektromagnetycznym, w tej grupie tachometrów najczęściej stosowane są czujniki fotoelektryczne: rys.IV-13.



Rys.IV-13. Fotoelektryczne metody pomiaru prędkości obrotowej: a/ tachometr fotoelektryczny z częstotściomierzem analogowym, b/ tachometr fotoelektryczny z częstotściomierzem cyfrowym, 1 - element wirujący, 2 - tarcza kodująca, 3 - źródło światła, 4 - głowica pomiarowa



W tym przypadku strumień świetlny padający na fotoelement modulowany jest za pomocą tarczy tachometrycznej, zaopatrzonej w otwory i wirującej wraz z obiektem lub przez wytworzenie na powierzchni obracającego się obiektu odcinków o różnym współczynniku odbicia.

Jeżeli czas pomiaru wynosi  $T$  [s], a liczba impulsów odczytywanych na liczniku jest równa "n", to szukana prędkość w ruchu obrotowym badanego obiektu wynosi

$$v = k \frac{60 \cdot n}{T} \left[ \frac{\text{obr}}{\text{min}} \right] \quad (10)$$

gdzie:  $k$  - współczynnik zależny od ilości  $N$  segmentów modulujących /otworów/;  $k = \frac{1}{N}$ .

Tachometry fotoelektryczne wykonywane są zwykle w postaci przyrządu składającego się z głowicy pomiarowej i miernika częstotliwości. Głowica pomiarowa stanowi niezależny zespół, w skład którego wchodzi: układ optyczny, źródło światła i fotoelement wraz z elektronicznym układem formującym.

Z produkowanych w kraju przyrządów tego typu należy wymienić obrotomierz cyfrowy N-103 produkcji ZZEAP Elpo-Wrocław, składający się z głowicy fotoelektrycznej C-3398, tarczy modelującej 60-otworowej E-3841 oraz przyrządu zasadniczego o zakresie pomiarowym  $(0,1 \div 200\ 000)$  [obr/min] w czterech podzakresach. Dokładność pomiaru przy użyciu tego przyrządu wynosi  $\pm 0,05\ %$ .

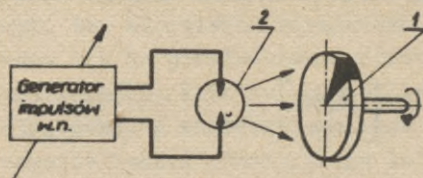
Najnowszym rozwiązaniem w tej grupie przyrządów jest obrotomierz cyfrowy TN-1, opracowany w Instytucie Metrologii Elektronicznej Politechniki Wrocławskiej w oparciu o obwody scalone serii FSC 400 firmy Sessossem /Francja/. Przyrząd ten charakteryzuje się zwiększonymi parametrami metrologicznymi i małymi gabarytami. /Produkcję tego przyrządu podjęły Zakłady Iamel w Ziel. Górze/.

Na uwagę zasługuje również testowy miernik typu "Tacho" produkcji PDPAKP w Sosnowcu, wyposażony w dwie wymienne głowice typu magnetycznego i fotoelektrycznego, współpracujące z elektronicznym układem wzmacniająco-modulującym i wskaźnikiem magneto-elektrycznym. Umożliwia on pomiar prędkości obrotowej w zakresie  $(100 \div 100\ 000)$  [obr/min] przy dokładności  $\pm 2\ %$ .

W pomiarach prędkości obiektów wirujących trudno dostępnych duże usługi oddaje metoda stroboskopowa. Pozwala ona bowiem na uzyskanie znacznej dokładności pomiaru przy wysokich prędkościach.



Pomiary stroboskopowe polegają na wzrokowym porównaniu znanej częstotliwości błysków specjalnej lampy zasilanej z przestrajanego generatora impulsów wysokiego napięcia, z częstotliwością, którą posiada obiekt badany, zasadę pomiaru wyjaśnia rys.IV-14. Lampa stroboskopowa wytwarza błyski światła o częstotliwości nastawianej na zasilającym ją



Rys.IV-14. Zasada pomiaru stroboskopowego: 1 - element wirujący, 2 - lampa stroboskopowa

generatorze impulsów. Błyski te oświetlają znak umieszczony w odpowiedni sposób na obiekcie wirującym, np. biały pas na osi wału. Jeżeli częstotliwość błysków będzie tak dobrana przez odpowiednią regulację częstotliwości generatora, że znak będzie oświetlony zawsze w tym samym położeniu kątowym, to powstanie wrażenie nieruchomości znaku. Oznacza to, że częstotliwość generatora jest równa częstotliwości wytworzonej przez wirujący obiekt i odczyt szukanej częstotliwości, a więc i prędkości obrotowej, może być dokonany bezpośrednio na skali generatora.

Metoda stroboskopowa może być stosowana nie tylko do pomiaru prędkości obrotowej, lecz również do obserwacji okresowych ruchów elementów maszyn, zwłaszcza zaś do obserwacji drgań.

Najczęściej spotykanym przyrządem tego typu jest stroboskop pod nazwą stroboskopu 1 typ TR - 5501 prod. WRL o zakresach pomiarowych  $(140 \div 15000)$  [obr/min] i klasie dokładności 1 %.

### 3. P o m i a r   n a   p r e ̧   z e ̧   ̧

Określenie stanu naprężeń występujących w elemencie /konstrukcji badanej/ realizowane jest poprzez pomiar odkształceń przy wykorzystaniu związków wyrażających prawo Hooke'a.

W technice pomiarowej do pomiaru naprężeń stosowane są różnego rodzaju czujniki /przyrządy/, a to:

- mechaniczne - w których przeniesienie mierzonych odkształceń osiągnięte jest przy udziale kalibrowanego elementu sprężystego i przełożenia mechanicznego,



- optyczne - w których zmiana odcinka pomiarowego /bazy/ wywołuje obrót lusterek, przekazującego wielkość odkształcenia poprzez układ optyczny na wycechowaną w jednostkach naprężenia skalę,
- strunowe - wykorzystujące zależność pomiędzy naprężeniem lub odkształceniem napiętej struny a częstotliwością jej drgań własnych,
- elektryczne - a wśród nich: rezystancyjne, indukcyjne, piezoelektryczne i magnetosprężyste; w czujnikach tych zmiana długości odcinka pomiarowego /bazy/ wywołuje odpowiedni efekt elektryczny, przekazywany i wzmacniany także w drodze elektrycznej.

Należy zauważyć, że pierwsze dwa typy czujników, tzn. czujniki mechaniczne i optyczne, są obecnie rzadko stosowane ze względu na ich niską przydatność do badań dynamicznych, natomiast tensometry strunowe ze względu na duże bazy pomiarowe i gabaryty, stosowane są głównie przy statycznych pomiarach w budownictwie.

W grupie czujników elektrycznych, których cechą wspólną jest mała bezwładność, umożliwiającą dokonywanie pomiaru szybko-zmiennych naprężeń /pomiar dynamiczny/, dominują tensometry rezystancyjne. Inne typy czujników elektrycznych do pomiarów naprężeń stosowane są w przypadkach szczególnych, tzn. gdy zastosowanie metody elektrotensometrii rezystancyjnej napotyka trudności.

Z tych względów omówienie zagadnienia pomiaru naprężeń ograniczono w tym opracowaniu do podania zasad pomiaru naprężeń przy użyciu tensometrów rezystancyjnych.

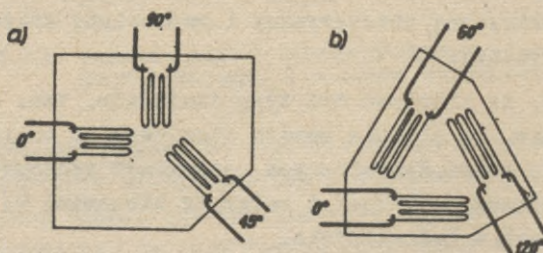
Zasady pracy tych czujników oraz warunki ich zastosowania podano w rozdziale II, natomiast całość zagadnień związanych z tensometrią rezystancyjną, takich między innymi jak: technologia wykonania i klejenia czujników, cechowanie, stabilność, czy zachowanie się przy pomiarach dynamicznych, jest przedmiotem szeregu publikacji specjalistycznych [30], [36], [40], [43], [54], [55], [56], [58], [82], do których oiszyła się zainteresowanych.



### 3.1. Metodyka pomiarów naprężeń przy użyciu tensometrów rezystancyjnych

#### 3.1.1. Określenie wielkości i kierunków naprężeń głównych

Na powierzchni badanego elementu konstrukcji może wystąpić w najogólniejszym przypadku płaski stan naprężeń /odkształceń/. Do jego określenia konieczna jest znajomość wielkości i kierunków naprężeń głównych. W tym celu na badany element konstrukcji naklejane są czujniki rozetowe /rys.IV-15/, składające się z trzech lub czterech tensometrów usy-



Rys.IV-15. Podstawowe typy rozet tensometrycznych:  
a/ układ "prostokątny", b/ układ "delta"

tuowanych względem siebie pod odpowiednimi kątami. W praktyce tensometry najczęściej są rozmieszczone w rozecie pod kątami 0, 60, 120° /tzw. układ "delta"/ i pod kątami 0, 45, 90° /tzw. układ prostokątny/. Odczyty uzyskane kolejno z trzech tensometrów pozwalają na wyznaczenie metodą analityczną lub graficzną, przy użyciu koła "Mohra", kąta  $\alpha$ , który tworzy oś pierwszego tensometru z kierunkiem odkształceń głównych oraz wartości tych odkształceń  $\epsilon_1$  i  $\epsilon_2$ . W przypadku rozety z czterema tensometrami czwarty spełnia rolę tensometru kontrolnego, natomiast tensometr kompensujący wpływ temperatury naklejany jest na nie obciążonej płytce, wykonanej z tego samego materiału, co badany i umieszczonej w bezpośredniej bliskości rozety pomiarowej.

W celu wyznaczenia za pomocą rozet tensometrycznych kierunków i wartości naprężeń głównych  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  metodą analityczną korzysta się z zależności w postaci [73];

- dla układu rozety prostokątnej

$$\epsilon_1 = \epsilon_{\max} = \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{45}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\epsilon_0 - \epsilon_{90})^2 + (\epsilon_{90} - \epsilon_{45})^2} \quad (11)$$



$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{\min} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{45}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})^2 + (\varepsilon_{90} - \varepsilon_{45})^2} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \varepsilon_{90} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{45})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{45}} \quad (13)$$

- dla układu rozety typu delta

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{60})^2 + (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})^2 + (\varepsilon_{120} - \varepsilon_0)^2} \quad (14)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{\min} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{60})^2 + (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})^2 + (\varepsilon_{120} - \varepsilon_0)^2} \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\sqrt{3} (\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120})}{2 \varepsilon_0 - (\varepsilon_{60} + \varepsilon_{120})} \quad (16)$$

przy czym między odkształceniem a naprężeniami obowiązują znane zależności:

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} = \frac{E}{1 - \nu} (\varepsilon_{\max} + \nu \varepsilon_{\min}) \quad (17)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{\min} = \frac{E}{1 - \nu} (\varepsilon_{\min} + \nu \varepsilon_{\max}) \quad (18)$$

gdzie:  $E$  - moduł Younga

$\nu$  - liczba Poissona.

Graficzną metodę wyznaczania kierunków i wartości naprężeń głównych wyjaśnić można na następującym przykładzie. W trakcie pomiarów na poszczególnych tensometrach układu "delta" uzyskano następujące wyniki:

$$\varepsilon_{T1} = \varepsilon_0 = 0,6 \text{ ‰} = 60 \cdot 10^{-5}$$

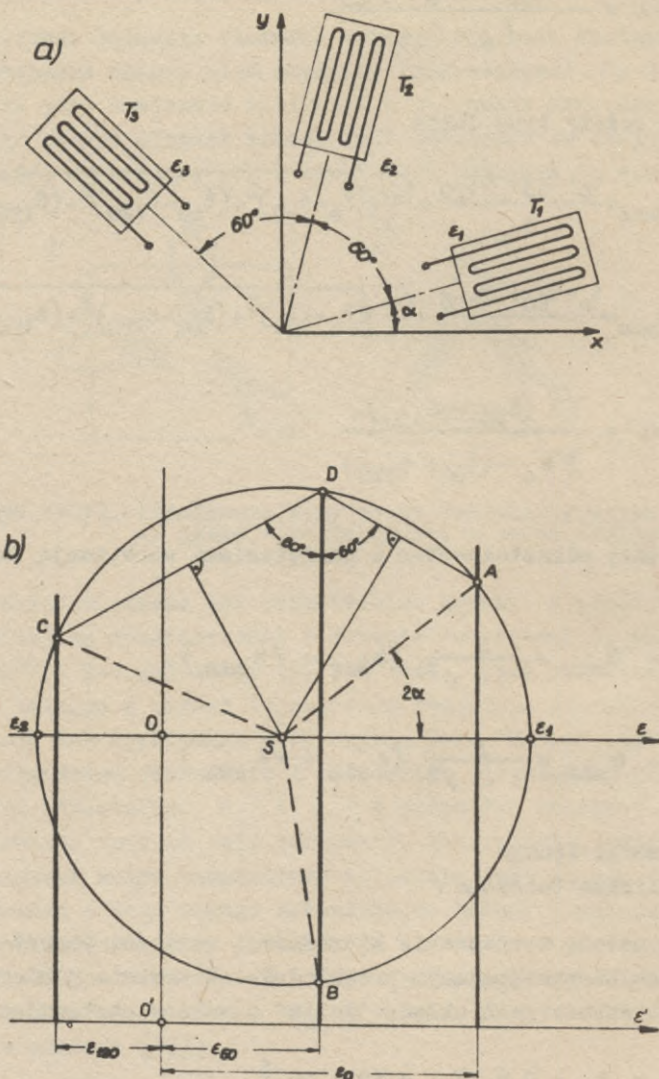
$$\varepsilon_{T2} = \varepsilon_{60^\circ} = 0,3 \text{ ‰} = 30 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{T3} = \varepsilon_{120^\circ} = -0,2 \text{ ‰} = -20 \cdot 10^{-5}$$



W celu wyznaczenia odkształceń głównych /rys.IV-16/ należy:

1. Wykreślić z dowolnego punktu /O'/ poziomo oś  $\xi'$  i odłożyć na niej wartości odkształceń  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_{60^\circ}$ ,  $\epsilon_{120^\circ}$  w odpowiedniej skali.



Rys.IV-16. Konstrukcja koła Mohra dla opisanego przykładu wraz ze schematem tensometrycznego układu "delta"



2. Przez otrzymane punkty poprowadzić proste pionowe oraz na prostej odpowiadającej  $\varepsilon_{60}$  wybrać dowolnie punkt D.
3. Przez punkt D poprowadzić proste pod kątem  $60^\circ$  do prostej pionowej aż do przecięcia z pozostałymi prostymi pionowymi - punkty przecięcia oznaczyć jako /A/ i /C/.
4. Utworzyć symetralne odcinków CD i DA. Punkt ich przecięcia S wyznacza środek poszukiwanego okręgu.
5. Przez punkty A, D i C przeprowadzić okrąg, który wyznaczy punkt B leżący na tej samej prostej pionowej co punkt D.

Punkty A, B i C określają trzy kierunki pomiarowe, a oś  $\varepsilon$  wyznacza prosta równoległa do  $\varepsilon'$  i przechodząca przez punkt S. Początkiem osi  $\varepsilon$  jest punkt O odpowiadający  $O'$ . Odległości punktu O od miejsca przecięcia okręgu z osią  $\varepsilon$  wyznaczają wielkości odkształceń głównych  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$ , natomiast kąt  $\alpha$  nachylenia kierunku naprężeń głównych jest połową kąta nachylenia promienia SA, do osi  $\varepsilon$ . Z tak wyznaczonych wartości odkształceń głównych obliczane są naprężenia główne /podobnie jak przy metodzie analitycznej/ przy wykorzystaniu poprzednio podanych wzorów.

Podane sposoby wyznaczania kierunków i wartości naprężeń głównych są dość pracochłonne, dlatego w praktyce pomiarowej przyjęło się stosowanie tzw. nomogramów opracowanych dla poszczególnych rozet tensometrycznych. Nomogramy te eliminują całkowicie wszelkie operacje rachunkowe i pozwalają na bezpośrednie wyznaczenie naprężeń głównych.

Znajomość wartości naprężeń głównych występujących w badanych elementach konstrukcji pozwala na określenie stanu jego wytężenia. Korzysta się tu z zależności na naprężenie zastępcze  $\sigma_z$ .

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + \sigma_{\min}^2 - \sigma_{\max} \cdot \sigma_{\min}} \quad (19)$$

Wyznaczona tą drogą wartość naprężenia zastępczego nie uwzględnia oczywiście naprężeń własnych konstrukcji /odlewniczych, spawalniczych, względnie od ciężaru własnego/, lecz jedynie naprężenia wynikające od sił zewnętrznych przyłożonych w czasie badań do obiektu czy konstrukcji. Wynika to z istoty metody pomiarów tensometrycznych, w której zerowy stan naprężeń czujników odpowiada stanowi, gdy na obiekt badany nie działają siły zewnętrzne, przy zachowaniu jednak oddziaływań ciężaru własnego i obciążeń wewnętrznych. Przytoczona analiza dotyczy przypadku ogólnego, gdy badany stan naprężeń jest bliżej nieokreślony. W praktyce pomiarowej częściej zdarzają się przypadki, w których kierunki na-



prężen głównych są jednoznacznie określone przez charakter pracy obiektu badanego. Wtedy czujniki tensometryczne naklejane są zgodnie z tymi kierunkami. Przykładem może tu być płaszcz naczynia cylindrycznego, poddanego działaniu ciśnienia wewnętrznego, występuje na nim bowiem dwuosiowy stan naprężeń o znanych kierunkach głównych.

W przypadku pomiaru naprężeń jednoosiowych, np. przy czystym rozciąganiu, czujniki tensometryczne naklejane są zgodnie z kierunkiem działania obciążenia. Tensometr kompensujący wpływ temperatury może być wtedy naklejony bezpośrednio na elemencie obciążonym, lecz prostopadle do kierunku naprężeń.

Jak wspomniano w rozdz.II, zmiany rezystancji tensometru, spowodowane odkształceniem badanego elementu, mierzone są w układzie mostka Wheatstone'a, z którego sygnał wyjściowy jest wzmacniany i rejestrowany.

### 3.1.2. Pomiary "czystych" naprężeń

W elementach konstrukcji mogą występować naprężenia pochodzące od rozciągania, ściskania, zginania i skręcania.

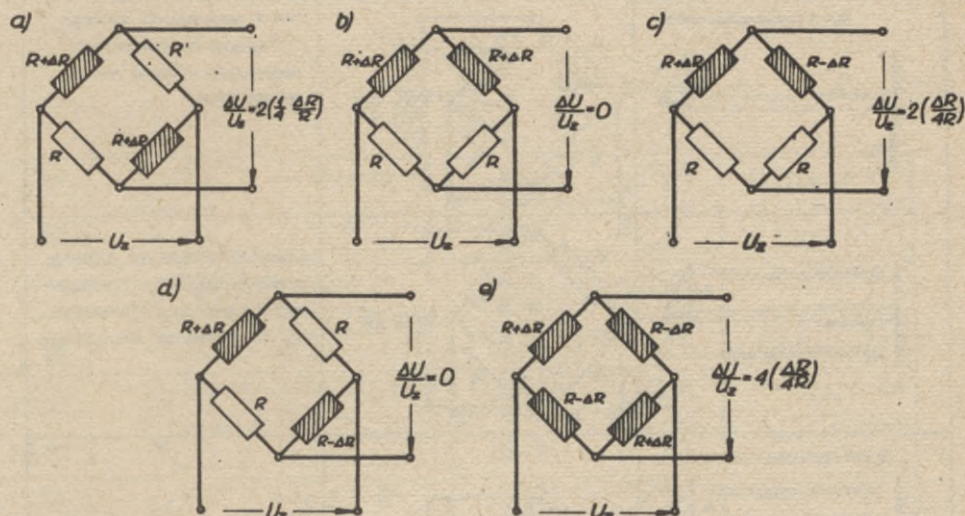
Dużą zaletą pomiarów tensometrycznych jest możliwość przeprowadzania pomiaru tzw. naprężeń czystych, tzn. pochodzących od jednego z wyż. wym. obciążeń, eliminując wpływ pozostałych. Realizowane jest to poprzez odpowiednie naklejenie tensometrów przy specjalnym sposobie ich połączenia w mostku. W mostku pomiarowym zmiany rezystancji dodają się lub odejmują w zależności od gałęzi /w przyległych - odejmują się, w przeciwnych - dodają się/, co wynika z warunku jego równowagi

$$R_1 \cdot R_2 = R_3 \cdot R_4$$

Ogólną zasadę zwiększania lub eliminowania poszczególnych sygnałów ilustruje rys.IV-17 i można ją sformułować następująco:

- a/ wejściowy sygnał jednoimienny przyłożony w dwu przeciwnych gałęziach mostka podwaja się na wyjściu; rys. a
- b/ wejściowy sygnał jednoimienny przyłożony w dwóch przyległych gałęziach mostka eliminuje się na wyjściu - rys.b
- c/ wejściowy sygnał różnoimienny przyłożony w dwóch przyległych gałęziach mostka podwaja się na wyjściu - rys.c
- d/ wejściowy sygnał różnoimienny przyłożony w dwóch przeciwnych gałęziach mostka eliminuje się na wyjściu - rys.d





Rys.IV-17. Warianty pomiarowe mostka Wheatstone'a

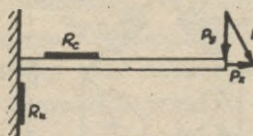
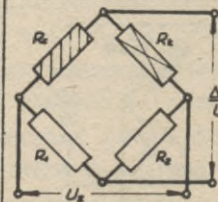
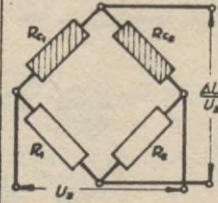
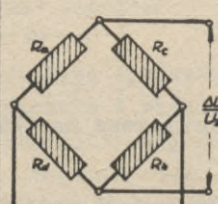
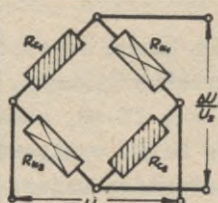
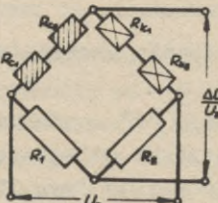
e/ wejściowy sygnał przyłożony parami jednoimiennie i różnoimiennie w przeciwległych gałęziach mostka ulega na wyjściu czterokrotnemu zwiększeniu - rys.e.

Opierając się na tych zasadach można tworzyć układy bardziej skomplikowane, reagujące tylko na wybrane sygnały, a eliminujące wpływy innych sygnałów. Ilustruje to rysunek IV-18, podając szereg wariantów pomiarowych w przypadku obciążenia belki wysięgnikowej skupioną siłą ukośną. Natomiast w tablicy X zestawiono najczęściej spotykane układy pomiarowe.

### 3.1.3. Pomiar naprężeń w przypadku skręcania

Przy obciążeniu wału o średnicy "D" momentem skręcającym  $M_g$  jego przekroje poprzeczne, znajdujące się w odległości "l" od siebie, przemieszczają się względem siebie o kąt  $\varphi$  /rys.IV-19/. Tworząca AD skręca się przy tym o kąt odkształcenia postaciowego  $\gamma$ , przechodząc w linię śrubową AD'.

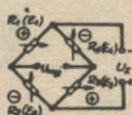


| Sposób nabejgania tensometrow.                                                                                                                                                                                           | Schemat pomiarowy i wielkość sygnału wyjściowego.                                                                                           | Opis.                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_c = R + \Delta R(t) + \Delta R(p) + \Delta R(t)$<br><br>$R_s = R + \Delta R(t)$                                                      | <br>$\frac{\Delta U}{U_s} = \frac{\Delta R}{4R}$           | Układ reagujący na zginanie i rozciąganie. Kompensacja temperatury w części wolnej od obciążeń.                    |
| $R_c = R + \Delta R(t) + \Delta R(p) + \Delta R(t)$<br>$R_s = R + \Delta R(t) - \Delta R(p) + \Delta R(t)$                                                                                                               | <br>$\frac{\Delta U}{U_s} = 2 \cdot \frac{\Delta R}{4R}$   | Układ reagujący na zginanie a eliminujący wpływ rozciągania. Kompensacja temperatury na elemencie obciążonym.      |
| $R_a = R + \Delta R(t) + \Delta R(p) + \Delta R(t)$<br>$R_b = R + \Delta R(t) + \Delta R(p) + \Delta R(t)$<br>$R_c = R - \Delta R(p) + \Delta R(t) + \Delta R(t)$<br>$R_d = R - \Delta R(p) + \Delta R(t) + \Delta R(t)$ | <br>$\frac{\Delta U}{U_s} = 4 \cdot \frac{\Delta R}{4R}$   | Układ reagujący na zginanie a eliminujący wpływ rozciągania. Kompensacja temperatury na elemencie obciążonym.      |
| $R_c = R + \Delta R(p) + \Delta R(t) + \Delta R(t)$<br>$R_s = R - \Delta R(p) + \Delta R(t) + \Delta R(t)$<br>$R_{a1}$ i $R_{a2}$                                                                                        | <br>$\frac{\Delta U}{U_s} = 2 \cdot \frac{\Delta R}{4R}$  | Układ reagujący na rozciąganie i eliminujący wpływ zginania. Kompensacja temperatury na części wolnej od obciążeń. |
| $R_c = R + \Delta R(p) + \Delta R(t) + \Delta R(t)$<br>$R_s = R - \Delta R(p) + \Delta R(t) + \Delta R(t)$<br>$R_{a1}$ i $R_{a2}$                                                                                        | <br>$\frac{\Delta U}{U_s} = 2 \cdot \frac{\Delta R}{4R}$ | Układ reagujący na rozciąganie i eliminujący wpływ zginania. Kompensacja temperatury na części wolnej od obciążeń. |

Rys.IV-18. Względna czułość mostka i eliminacja poszczególnych naprężeń dla różnych układów mostka w przypadku belki wysięgnikowej obciążonej siłą ukośną:  - tensometr czynny,  - tensometr kompensacyjny



Tablica I



$$\frac{U_{x\max}}{U_x} = \frac{k}{2} (E_1 - E_2 + E_3 - E_4)$$

| 1. |        | $E = E_n + E_{zg} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x} - E_t$                    | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>           | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 1 | 1      | 1      | 0 |
|----|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|-----------------|-----------------|---|--------|--------|---|
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 1  | 1      | 1                                                                                     | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 2. |        | $E = E_n + E_{zg} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$                          | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>           | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 1      | 1      | 0 |
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0  | 1      | 1                                                                                     | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 3. |        | $E = E_n + E_{zg} = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$ | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1/4μ</td> <td>1/4μ</td> <td>0</td> </tr> </table>     | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 1/4μ   | 1/4μ   | 0 |
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0  | 1/4μ   | 1/4μ                                                                                  | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 4. |        | $E = E_{zg} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$              | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> </table>           | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 2      | 0 |
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0  | 0      | 2                                                                                     | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 5. |        | $E = E_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x} - E_t$           | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>           | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 2 | 2      | 0      | 0 |
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 2  | 2      | 0                                                                                     | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 6. |        | $E = E_n + E_{zg} = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$ | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>2(1+μ)</td> <td>2(1+μ)</td> <td>0</td> </tr> </table> | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 2(1+μ) | 2(1+μ) | 0 |
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0  | 2(1+μ) | 2(1+μ)                                                                                | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 7. |        | $E = E_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$                 | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>           | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 2      | 0      | 0 |
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0  | 2      | 0                                                                                     | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 8. |        | $E = E_{zg} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$              | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> </table>           | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 4      | 0 |
| t  | P      | M <sub>zg</sub>                                                                       | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                               |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0  | 0      | 4                                                                                     | 0                                                                                                                                                                             |   |   |                 |                 |   |        |        |   |

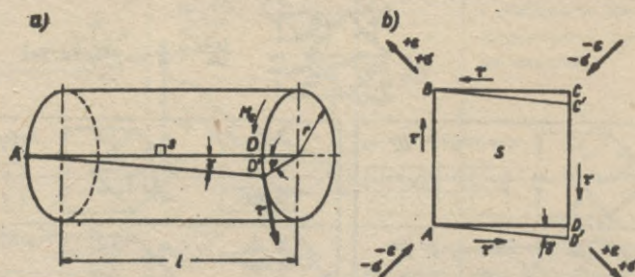
| 9.  |        | $E = E_n = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$    | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>2(1+μ)</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table> | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 2(1+μ) | 0      | 0 |
|-----|--------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|-----------------|-----------------|---|--------|--------|---|
| t   | P      | M <sub>zg</sub>                                                                 | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                          |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0   | 2(1+μ) | 0                                                                               | 0                                                                                                                                                                        |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 10. |        | $E = E_{zg} = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$ | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>2(1+μ)</td> <td>0</td> </tr> </table> | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 2(1+μ) | 0 |
| t   | P      | M <sub>zg</sub>                                                                 | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                          |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0   | 0      | 2(1+μ)                                                                          | 0                                                                                                                                                                        |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 11. |        | $E = E_{zg} = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$ | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>2(1+μ)</td> <td>0</td> </tr> </table> | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 2(1+μ) | 0 |
| t   | P      | M <sub>zg</sub>                                                                 | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                          |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0   | 0      | 2(1+μ)                                                                          | 0                                                                                                                                                                        |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 12. |        | $E = E_{zg} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$        | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> </table>      | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 2      | 0 |
| t   | P      | M <sub>zg</sub>                                                                 | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                          |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0   | 0      | 2                                                                               | 0                                                                                                                                                                        |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 13. |        | $E = E_{sk} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$        | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> </table>      | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 0      | 4 |
| t   | P      | M <sub>zg</sub>                                                                 | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                          |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0   | 0      | 0                                                                               | 4                                                                                                                                                                        |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 14. |        | $E = E_{sk} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$        | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> </table>      | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 0      | 4 |
| t   | P      | M <sub>zg</sub>                                                                 | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                          |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0   | 0      | 0                                                                               | 4                                                                                                                                                                        |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 15. |        | $E = E_{sk} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{x\max}}{U_x}$        | <table border="1"> <tr> <th>t</th> <th>P</th> <th>M<sub>zg</sub></th> <th>M<sub>sk</sub></th> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> </tr> </table>      | t | P | M <sub>zg</sub> | M <sub>sk</sub> | 0 | 0      | 0      | 4 |
| t   | P      | M <sub>zg</sub>                                                                 | M <sub>sk</sub>                                                                                                                                                          |   |   |                 |                 |   |        |        |   |
| 0   | 0      | 0                                                                               | 4                                                                                                                                                                        |   |   |                 |                 |   |        |        |   |

- tensometr czynny  
 tensometr kompensacyjny  
 opór w mostku tensometrycznym  
t — temperatura  
P — siła  
M<sub>zg</sub> — moment zginający

- μ — stała Poissona  
E<sub>n</sub> — odkształcenie normalne  
E<sub>zg</sub> — odkształcenie zginające  
E<sub>t</sub> — odkształcenie termiczne  
k — stała tensometru  
M<sub>sk</sub> — moment skręcający



Na powierzchni walca powstaje stan czystego odkształcenia postaciowego, w którym kierunki naprężeń głównych są nachylone względem tworzą-



Rys.IV-19. Schemat obciążenia wału momentem skręcającym: a/ wał skręcany, b/ rozkład naprężeń na elemencie powierzchni walca

cej pod kątem  $\frac{\pi}{4}$  - rys.IV-19. Wartość bezwzględna tych naprężeń jest równa naprężeniu stycznemu, występującemu na obwodzie walca.

$$|\sigma| = \tau \quad (20)$$

Stąd w celu wyznaczenia w drodze pomiaru wartości naprężeń stycznych /występujących pod wpływem działania momentu  $M_g$ / wystarczy zmierzyć wartości naprężeń głównych  $\sigma$  skierowanych pod kątem  $\frac{\pi}{4}$ . Realizowane jest to poprzez usytuowanie czujników tensometrycznych pod kątem  $\frac{\pi}{4}$  do tworzącej walca. Należy przy tym pamiętać, że zależność między odkształceniem  $\varepsilon$  odpowiadającym naprężeniu  $\sigma$ , a kątem odkształcenia postaciowego  $\gamma$ , wyraża się znanym związkiem:

$$|\varepsilon| = \frac{\gamma}{2} = \frac{1}{2} \frac{\tau}{G} \quad (21)$$

gdzie:

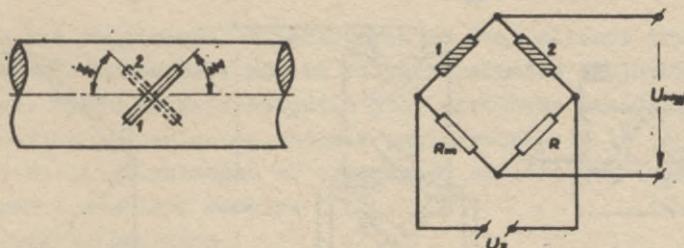
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{moduł sprężystości postaciowej,}$$

$E$  - moduł Younga,

$\nu$  - stała Poissona.

Przykład pokazany na rys.IV-20 przedstawia rozmieszczenie tensometrów na elemencie poddanym skręcaniu oraz sposób podłączenia ich w układ mostka.





Rys.IV-20. Układ pomiarowy z kompensacją temperatury przy czystym skręcaniu

Ze względu na to, że tensometry /1/ i /2/ poddane są różnoimiennym naprężeniom oraz włączone są w przyległe gałęzie mostka, sygnał wyjściowy jest podwojony przy równoczesnej kompensacji wpływu temperatury.

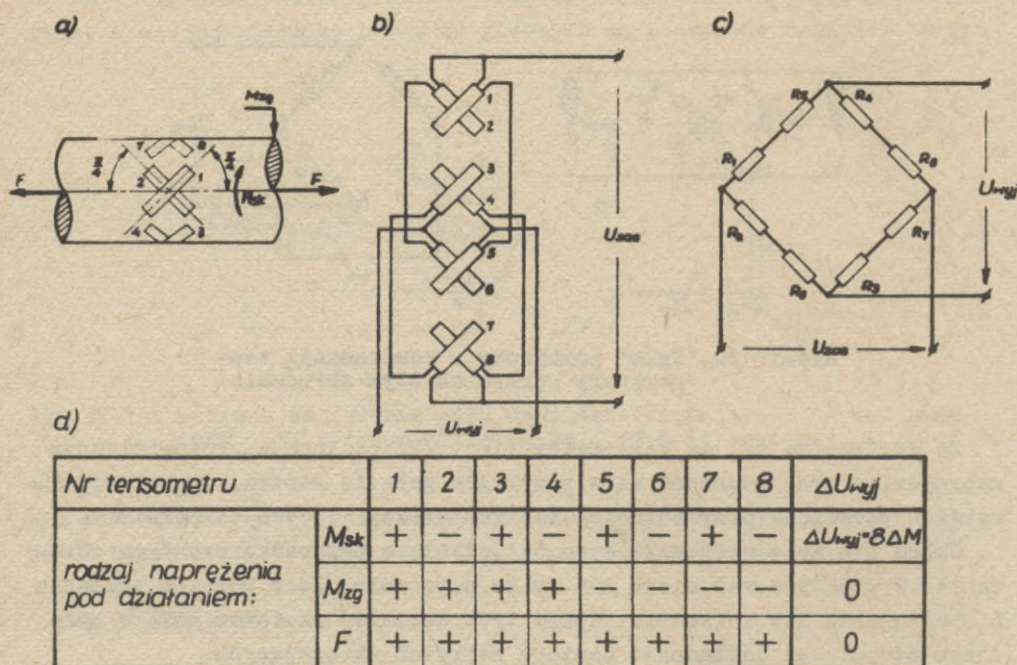
Układ ten może mieć zastosowanie jedynie w przypadku czystego skręcania. W praktyce wał ulega nie tylko skręcaniu, lecz również zginaniu i rozciąganiu lub ściskaniu. Wpływ tych obciążeń rzutować może w znacznym stopniu na dokładność pomiaru naprężeń skręcających.

W celu uzyskania kompensacji mogących wystąpić dodatkowych obciążeń stosuje się układy bardziej złożone. Przykładem może być pokazany na rys.IV-21 układ czterech par czujników naklejonych na obwodzie walca w ten sposób, aby ich środki znajdowały się w wierzchołkach kwadratu wpisanego w przekrój walca i nachylonych pod kątem  $\frac{\pi}{4}$  do jego tworzących.

Kompensacja wpływów momentu zginającego i siły osiowej  $F$  wynika z przytoczonych poprzednio zasad eliminacji i wzmocnienia sygnału mostka Wheatstone'a, co można wykazać, analizując jego pracę w przytoczonym na rys.IV-21 przykładzie.

- Moment skręcający  $M_s$  - pod jego wpływem tensometry (1), (3), (5), (7) są rozciągane, a tensometry (2), (4), (6), (8) - ściskane. Ze względu na to, że tensometry poddane jednoimiennym naprężeniom wpięte są w przeciwległe, a różnoimienne w przyległe gałęzie mostka Wheatstone'a - sygnał na wyjściu jest ośmiokrotnie zwiększony.





Rys.IV-21. Sposób rozmieszczenia tensometrów i ich połączenie przy pomiarze naprężeń skręcających: pełna kompensacja: a/ element pomiarowy z rozmieszczonymi czujnikami, b/, c/ sposób połączenia tensometrów, d/ tabelka

- Moment gnący  $M_g$  - pod jego wpływem tensometry są parami ściskane lub rozciągane. Tensometry z jednej pary, np. 1-2 są włączone w ten sposób, że tensometr /1/ znajduje się względem tensometru /2/ w gałęzi przyległej mostka, zatem sygnały z tych tensometrów się znoszą.
- Siła osiowa  $F$  - pod jej wpływem wszystkie tensometry pełnego mostka są poddane jednocześnie temu samemu naprężeniu, a zatem układ mostka nie reaguje na zmiany siły osiowej.

Należy przypomnieć, że przytoczone tu relacje są słuszne dla układu mostka zbudowanego z tensometrów o jednakowej rezystancji oraz takiej samej stałej  $k$ .



#### 4. P o m i a r   s i ł

Pomiaru sił skupionych, działających na dany element konstrukcji lub obiekt, dokonać można przy użyciu różnych rodzajów czujników i metod pomiarowych. Wybór rodzaju czujnika jest określony przede wszystkim przez specyfikę postawionego zadania pomiarowego.

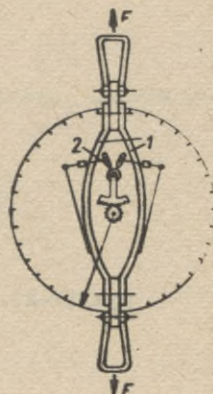
Spośród wielu stosowanych tu przyrządów pomiarowych /zwanycn dalej dynamometrami/ wyróżnić należy:

- dynamometry mechaniczne,
- dynamometry hydrauliczne,
- dynamometry elektryczne.

Ich cechą wspólną jest wykorzystanie właściwości sprężystych elementów czujnika, który przejmuje obciążenie. Niekiedy elementem tym jest wprost dana część maszyny.

##### 4.1. Dynamometry mechaniczne

Istnieje wiele odmian konstrukcyjnych dynamometrów mechanicznych. Działają one na zasadzie pomiaru odkształcenia sprężystego elementu przy użyciu czujnika mechanicznego /np. zegarowego/. Wersje konstrukcyjne różnią się zarówno kształtem elementu sprężystego, jak i rodzajem mechanicznego układu pomiarowego. Na rys.IV-22 pokazano przykładowo schemat dynamometru ze sprężyną kabłąkową. Zasada działania tego dynamometru polega na wykorzystaniu zmiany krzywizny kabłąka pod wpływem obciążenia. Za pośrednictwem elementów ślizgowych zmiana ta przekazywana jest na zębatkę, która napędza wskazówkę. Położenie wskazówki na wyskalowanej tarczy określa zatem wielkość siły rozciągającej przyłożonej do dynamometru. Przyrządy tego typu najczęściej stosowane są do pomiaru ciężaru i wykonywane są dla różnych zakresów pomiarowych do ok. 0,1 [MN]; (~1,0 [T]), przy niepewności wskazań rzędu  $\pm 3\%$  górnej wartości granicznej zakresu pomiarowego.



Rys.IV-22. Schemat dynamometru mechanicznego: 1 - elementy sprężyste, 2 - przełożenie



## 4.2. Dynamometry hydrauliczne

W dynamometrach hydraulicznych pomiar siły dokonywany jest przez określenie ciśnienia cieczy w przestrzeni pomiarowej, ograniczonej membraną lub tłokiem, które stanowią element przekazujący obciążenia. Siła działająca na tłok wytwarza ciśnienie w komorze pomiarowej, które mierzone jest za pomocą manometru połączanego z komorą pomiarową za pośrednictwem rurki kapilarnej. Ciśnienie to stanowi miarę siły działającej na dynamometr zgodnie ze znaną zależnością

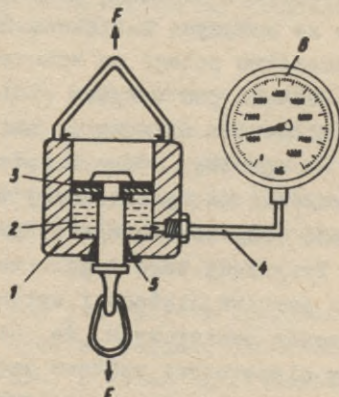
$$p = \frac{F}{S} \quad (22)$$

gdzie:  $p$  - ciśnienie,

$F$  - siła mierzona,

$S$  - powierzchnia czynna elementu /tłoka/ przekazującego obciążenie.

Na rys. IV-23 pokazano przykładowo schemat dynamometru hydraulicznego do pomiaru sił rozciągających. Przyrządy tego typu stosuje się przede wszystkim celem określenia ciężaru ładunku przy zakresach pomiarowych sięgających  $0,3 \text{ [MN]}$ ; ( $\sim 30 \text{ [T]}$ ). Błąd pomiarowy tych przyrządów waha się w granicach ( $\pm 0,5 \div \pm 1,5 \%$ ) górnej wartości granicznej zakresu pomiarowego.



Rys. IV-23. Schemat dynamometru hydraulicznego: 1 - korpus, 2 - ciecz, 3 - tłok wraz z uszczelnieniami, 4 - kapilara, 5 - uszczelnienia, 6 - manometr



### 4.3. Dynamometry elektryczne

Spółród opisanych w rozdziale. II czujników elektrycznych do pomiaru siły, najszersze zastosowanie znajdują czujniki magnetoelastyczne, tensometry rezystancyjne oraz indukcyjne i piezoelektryczne. Stosowanie czujników piezoelektrycznych jest uzasadnione jedynie w przypadkach pomiaru sił o charakterze dynamicznym czy też uderowym.

Najczęściej przy pomiarach sił stosowane są:

- dynamometry tensometryczne,
- dynamometry indukcyjne,
- dynamometry magnetoelastyczne.

W przypadku dynamometrów wykonanych na bazie czujników tensometrycznych i indukcyjnych pomiar siły realizowany jest za pośrednictwem elementu sprężystego, pracującego w układzie rozciągającym lub ściskającym, zginającym, pierścieniowym lub membranowym. Każdy z tych układów odznacza się innymi cechami, które predysponują go do określonych zadań pomiarowych.

W zakresie pomiarów i badań maszyn roboczych ciężkich stosuje się najczęściej dynamometry tensometryczne, pracujące w układzie rozciągającym, ściskającym lub membranowym.

Konstrukcja pośredniczących elementów sprężystych powinna uwzględniać następujące warunki:

- a/ naprężenia w dowolnym przekroju elementu nie mogą przekraczać granicy proporcjonalności,
- b/ odkształcenia elementu na odcinku bazy pomiarowej powinny być jednakowe /dotyczy dynamometrów tensometrycznych/.

#### 4.3.1. Dynamometry tensometryczne

Zasada pomiaru przy użyciu dynamometru tensometrycznego oparta jest na następującym schemacie przetwarzania:

$$F \rightarrow \sigma \rightarrow \varepsilon_s \rightarrow \varepsilon_t \rightarrow \frac{\Delta R}{R} \rightarrow U_{wyj} \rightarrow \alpha_L$$

gdzie:

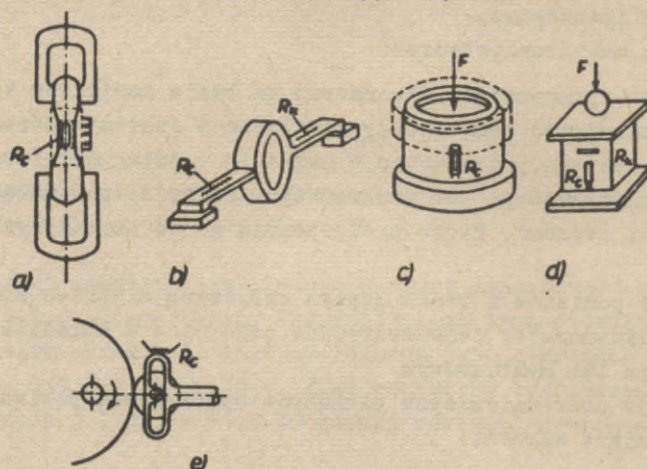
- $F$  - siła mierzona.
- $\sigma$  - naprężenie w elemencie pośredniczącym,
- $\varepsilon_s, \varepsilon_t$  - wydłużenia elementu sprężystego i tensometru,



- $\frac{\Delta R}{R}$  - względny przyrost rezystancji tensometrów,  
 $U_{wyj}$  - napięcie wyjściowe mostka tensometrycznego,  
 $\alpha$  - wychylenie przyrządu wyjściowego analogowego,  
 $L$  - wskazania przyrządu cyfrowego.

Przytoczony schemat przetwarzania powinien zapewnić liniową zależność między siłą  $F$  i wskazaniem  $\alpha$  przyrządu.

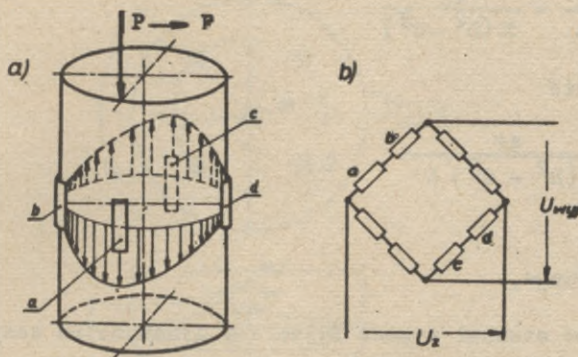
Na rys.IV-24 przedstawiono kilka typów dynamometrów tensometrycznych.



Rys.IV-24. Rozwiązania konstrukcyjne dynamometrów tensometrycznych :  
 a/ czujnik do pomiaru sił w linie, b/ czujnik do pomiaru sił w łożysku, c/ czujnik do pomiaru sił ściskających, d/ czujnik do pomiaru nacisków:  $R_c$  - tensometr czynny,  $R_k$  - tensometr kompensacyjny

Dynamometry w układzie rozciągany m lub ściskany m. Oznaczają się one prostą budową i znaczną uniwersalnością. Warunkiem ich prawidłowej pracy jest zapewnienie osiowego obciążenia, co uzyskać można przez zastosowanie uchwytów kulistych /samocentrujących/. Nie zawsze jednak jest to wystarczające i dlatego w konstrukcji czujnika przewiduje się takie ukierunkowanie naklejonych tensometrów, które umożliwi eliminację wpływu nieosiowego przyłożenia siły na wynik pomiaru. Na rys.IV-25 pokazano sposób rozmieszczenia tensometrów na elemencie sprężystym, zapewniający kompensację naprężeń zginających, występujących na skutek nieosiowego ściskania.





Rys.IV-25. Sposób rozmieszczenia tensometrów czynnych na elemencie sprężystym, zapewniającym kompensację nieosiowego ściskania: a/b/c/d/ - tensometry czynne

Jeżeli tensometry zostaną połączone zgodnie ze schematem pokazanym na rys.IV-25b, to wskutek umieszczenia tensometrów czynnych w przeciwnych gałęziach mostka pomiarowego - sygnał wyjściowy będzie funkcją wyłącznie średnich odkształceń wywołanych ściskaniem, zaś różnoimienne sygnały powstałe na skutek zginania zniósą się /patrz pkt 3 rozdz.IV/. Tensometry kompensujące temperaturę naklejane są prostopadłe do mierzonej siły, zatem nie reagują na odkształcenia osiowe.

Dobór wymiarów elementu sprężystego, a w szczególności stosunek jego długości do średnicy, zapewniać musi równomierny rozkład naprężeń w miejscu przyklejenia tensometru. Z zasady de Saint Venanta wynika, że zadowalające wyrównanie naprężeń osiąga się w odległości jednej średnicy od punktu przyłożenia siły. Z tego względu przyjmowany stosunek średnicy do długości elementu sprężystego zawarty jest w granicach od  $1/2$  do  $1/3$ ; zapewnia on równocześnie odpowiednią smukłość /zabezpieczenie przed wyboczeniem/. Wymiary elementu sprężystego powinny zapewniać otrzymanie, pod wpływem obciążeń nominalnych, sygnału wyjściowego zawartego w granicach  $\epsilon = (1 \div 2,5) \text{‰}$ . Ta wielkość sygnału wyjściowego gwarantuje najlepszą pracę tensometrycznej aparatury wzmacniającej.

W przypadku zastosowania elementu sprężystego w postaci cylindra tok obliczeń jest następujący. Dla elementu o średnicy zewnętrznej  $D$  i wewnętrznej  $d$ , naprężenie  $\sigma$  występujące pod wpływem mierzonej siły  $F$  wyrazi się znaną zależnością:



$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (23)$$

zaś odkształcenie

$$\varepsilon = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2) E} \quad (24)$$

gdzie:

$E$  - moduł Younga.

Odształcenie to stanowi sygnał wyjściowy dynamometru zaopatrzonego w jeden tensometr naklejony wzdłuż osi elementu sprężystego. W przypadku zastosowania czujnika kompensacyjnego, naklejonego obwodowo na części obciążonej, sygnał zostanie powiększony o wielkość odkształceń obwodowych /zależność liczbowa odkształceń wzdłużnych i obwodowych wiąże liczba Poissona/

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\text{obw}}}{\varepsilon_{\text{wzdł}}} \quad (25)$$

Ostatecznie sygnał wyjściowy dynamometru z dwoma tensometrami czynnym i kompensacyjnym jest sumą sygnałów obu tensometrów /wzdłużnego i obwodowego/ i odkształcenie  $\varepsilon$  wyraża się wzorem:

$$\varepsilon = (1 + \nu) \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2) E} \quad (26)$$

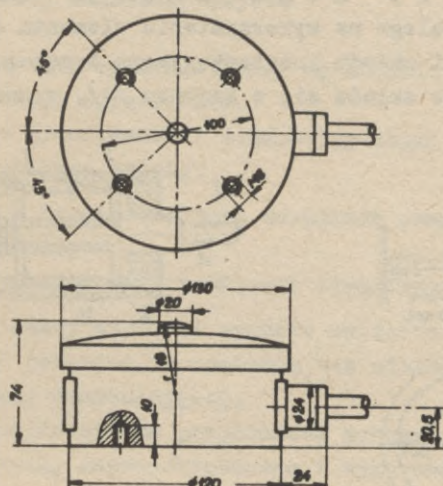
Zależność ta jest słuszna dla połączenia tych tensometrów w "układzie półmostka". Dla układu pomiarowego "pełnego mostka" podana zależność ma postać:

$$\varepsilon = (1 + \nu) \frac{8F}{\pi(D^2 - d^2) E} \quad (27)$$

Opisana wersja konstrukcyjna dynamometru umożliwia pomiar sił powyżej 1 [kN] (100 [kG]).

Jak widać, możliwe jest wykonanie różnych dynamometrów do specjalnych zadań pomiarowych, współpracujących z uniwersalną aparaturą tensometryczną. W oparciu o te zasady produkowane są tego typu czujniki przez różne firmy /np. Hottinger - NRF, Vibrometer - Szwajcaria, RFT -

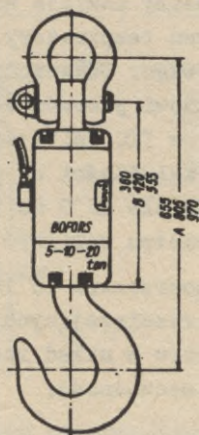




Rys.IV-26. Szkic wymiarowy czujnika KWH 10, 20, 50 prod. RPT

NRD, MOM - WRL, Diera - PRL/. Dla przykładu - czujniki produkcji RPT Messelektronik NRD serii KWH 10 ...500 /rys.IV-26./lub KWH 1M... 100M pokrywają zakresy pomiarowe odpowiednio od 1,0 [N] do 5,00 [kN] oraz od 10 [kN] do 1 [MN]. Czujniki te współpracują z uniwersalną aparaturą wzmacniającą /UM 131/ produkcji tej samej firmy i zapewniają dokładność 0,25 %.

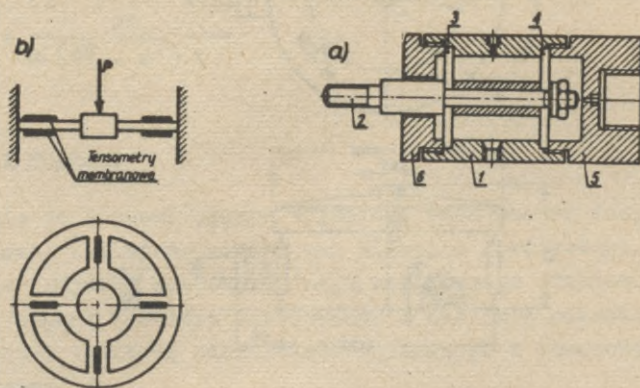
Na rys.IV-27 pokazano ponadto dynamometr firmy Bofors.



Rys.IV-27. Hak z wbudowanym czujnikiem tensometrycznym: typ Lkk - 1, firmy Bofors



**Dynamometry membranowe.** Zasada działania tej grupy dynamometrów polega na wykorzystaniu elementu sprężystego w kształcie membrany. Schemat układu konstrukcyjnego dynamometru zobrazowano na rys.IV-28. Dynamometr składa się z korpusu /1/, wewnątrz którego zamo-



Rys.IV-28. Schemat czujnika membranowego do pomiaru sił rozciągających i ściskających: 1 - korpus, 2 - trzpień, 3, 4 - membrany, 5, 6 - korki: a/ konstrukcja, b/ kształt membrany

cowany jest trzpień /2/ za pośrednictwem dwóch membran pomiarowych /3/ i /4/. Membrany blokowane są w korpusie poprzez korki gwintowane /5/ i /6/. Jeden z korków przez wytoczenie gwintu wewnętrznego spełnia rolę końcówki mocującej. Sumaryczna sztywność obu membran winna być tak dobrana, by pod wpływem obciążenia nominalnego odkształcenie osiągało wartość  $\varepsilon = 2 \text{ ‰}$ . Na rys.IV-28b pokazano kształt membrany i sposób naklejenia tensometrów. Tensometry nakleja się po obu stronach membrany, co zapewnia kompensację wpływu temperatury przy równoczesnym podwojeniu wartości sygnału pomiarowego. Połączenie dynamometru z uniwersalną aparaturą tensometryczną stanowi przewód wkręcony w boczne gniazdo obudowy /czujnik ten opracowano w ITC Politechniki Warszawskiej/. Zakresy pracy takiego dynamometru w zależności od rodzaju membrany są różne i obejmują pomiary sił w przedziale od 0 do 5 [kN]; (~500 [kg]).

Do zalet tego typu dynamometru zaliczyć należy:

- niewrażliwość na drgania poprzeczne do 10 g,
- możliwość pomiaru sił tak rozciągających jak i ściskających,
- łatwość włączenia dynamometru w układ ruchowy urządzenia,
- małe gabaryty i znaczna niezawodność.



#### 4.3.2. Dynamometry magnetoelastyczne

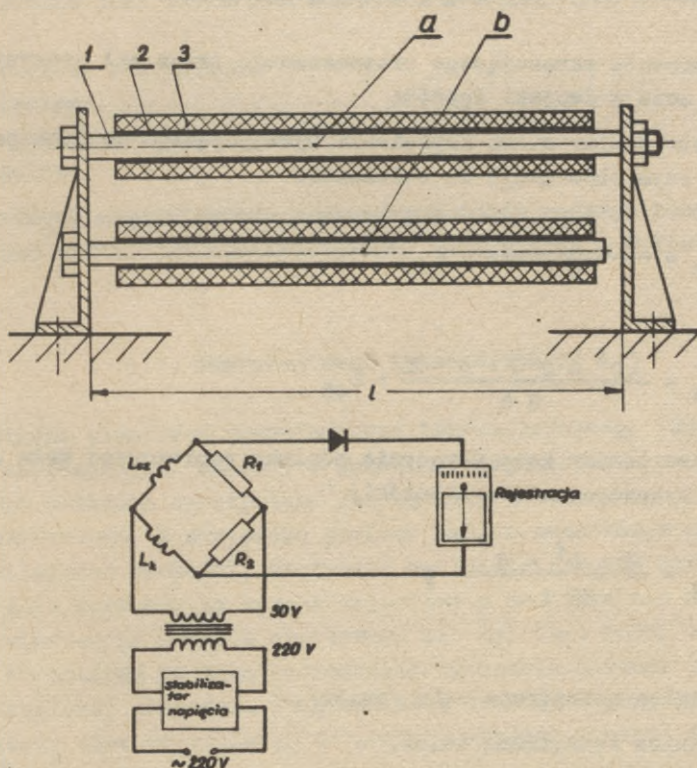
W dynamometrach tych wykorzystywane są czujniki magnetoelastyczne opisane w rozdz. II tego opracowania.

W zestawieniu z dynamometrami tensometrycznymi wykazują one wiele zalet, do których zaliczyć należy:

- możliwość pracy w bardzo trudnych warunkach pomiarowych,
- znaczną niezawodność,
- możliwość zastosowania przy pomiarach długotrwałych.

Ponadto dzięki dużej wartości sygnału wyjściowego tych dynamometrów istnieje możliwość prowadzenia pomiarów bez udziału drogiej i trudnej w obsłudze aparatury wzmacniającej.

Na rys. IV-29 przedstawiono przykładowo schemat dynamometru do pomiaru sił rozciągających, zaprojektowanego i wykonanego przez autora w la-



Rys. IV-29. Schemat dynamometru magnetoelastycznego do pomiaru sił rozciągających i ściskających wraz z układem połączeń: 1 - rdzeń magnetoelastyczny, 2 - przekładka izolacyjna, 3 - uzwojenie: a/ czujnik pomiarowy, b/ czujnik kompensacyjny



boratorium MRC Politechniki Krakowskiej. Składa się on z dwóch identycznych czujników magnetosprężystych, połączonych w układzie różnicowym, z których jeden spełnia rolę elementu pomiarowego a drugi - kompensacyjnego. W przypadku, gdy czujnik pomiarowy nie jest obciążony, ze względu na symetrię w obwodzie elektrycznym, przez miernik wyjściowy nie płynie prąd. Symetria ta zanika w przypadku obciążenia rdzenia czujnika pomiarowego mierzoną siłą  $F$ . Na skutek jej działania zmienia się przenikliwość magnetyczna rdzenia, co prowadzi w konsekwencji do zmiany prądu elektrycznego płynącego w obwodzie czujnika. Wielkość prądu płynącego w obwodzie elektrycznym dynamometru jest zatem funkcją mierzonej siły  $F$ . Określenie zależności pomiędzy mierzoną siłą  $F$  a wartością prądu płynącego w obwodzie dynamometru uzyskuje się w drodze indywidualnego cechowania.

#### 5. P o m i a r m o m e n t u o b r o t o w e g o / s k r ę c a j ą c e g o /

Pomiar momentu skręcającego przenoszonoego przez wał maszyny realizowany być może w dwojaki sposób:

- 1/ poprzez pomiar stanu naprężenia występującego na jego powierzchni, przy czym obowiązuje tu zależność:

$$M_s = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot G}{8} \cdot \epsilon_{45} \quad (28)$$

lub

$$M_s = \frac{(D^4 - d^4) \cdot G \cdot \pi}{8 D} \cdot \epsilon_{45} \quad (29)$$

- 2/ poprzez pomiar kąta skręcenia odcinka pomiarowego wału /tulei/ przy wykorzystaniu zależności:

$$M_s = \frac{\pi \cdot D^4 \cdot G}{32 l} \varphi \quad (30)$$

gdzie:

- $D$  - średnica zewnętrzna wału /tulei/,
- $d$  - średnica wewnętrzna tulei,
- $G$  - moduł sprężystości postaciowej,
- $\epsilon_{45}$  - odkształcenie w kierunku głównym  $45^\circ$  do osi wału/,
- $\varphi$  - kąt skręcenia elementu sprężystego na długości pomiarowej "l".



W pierwszym przypadku pomiar dokonywany jest przy udziale czujników tensometrycznych naklejanych na element sprężysty w postaci wału lub tulei, przy czym jako element sprężysty wykorzystuje się bądź element pomiarowy wmontowany w układ ruchowy maszyny, bądź sam wał maszyny.

Ponadto do pomiaru stanu naprężeń występującego pod wpływem momentu obrotowego używane są niekiedy indukcyjne czujniki momentu skrętnego, działające na zasadzie zmian właściwości magnetosprężystych materiału pod wpływem zmian naprężenia.

W przypadku drugim, tzn. gdy pomiar momentu obrotowego realizowany jest poprzez wyznaczenie kąta skreślenia, używa się czujników przystosowanych do pomiarów małych kątów. Wymienić tu należy czujniki: indukcyjne, fotoelektryczne, pojemnościowe lub mechaniczne.

Aby określić w sposób ciągły wartości momentu, któremu poddane są elementy maszyn znajdujące się w ruchu, konieczne jest zapewnienie prawidłowej transmisji sygnału pomiarowego z części wirującej na część stałą. Realizowane jest to za pośrednictwem następujących rodzajów połączeń:

- łącznie ślizgowe /szczotkowe/,
- łącznie rtęciowe,
- łącznie indukcyjne lub pojemnościowe,
- łącznie radiowe.

W niektórych zagadnieniach pomiarowych dobór rodzaju łącza jest bardzo istotnym szczegółem konstrukcyjnym, decydującym o dokładności pomiarów.

### 5.1. Momentomierze tensometryczne

Zasadniczym elementem momentomierza tensometrycznego jest czujnik naprężeń skręcających, opisany w punkcie 3 tego rozdziału. Wymiary zastosowanego elementu sprężystego zależą od przenoszonych przez czujnik momentu obrotowego. W przypadku pomiaru małych momentów, w celu uzyskania zadowalającej czułości, stosowane są tuleje skrętne zamiast wałków.

Spełnienie warunku, by sygnał wyjściowy z czujnika dla nominalnych wartości mierzonego momentu obrotowego nie był zbyt mały, tzn. że  $\epsilon \geq 0,5\%$ , pociąga za sobą konieczność wykonania ścianki tulei skrętnej o określonej grubości. Stąd wynikają trudności przy konstruowaniu momentomierzy tensometrycznych do pomiaru momentu poniżej 50 [Nm]; ( $\sim 5$  [kGm]).

Rozmieszczenie tensometrów na elemencie sprężystym oraz sposób ich połączenia w układzie mostka przedstawiono na rys.IV-21. Rozwiązanie



to zapewnia pełną kompensację temperatury oraz eliminację wpływu sił rozciągających, ściskających i zginających. Zrozumiałe jest, że przedstawiony sposób rozmieszczenia i połączenia tensometrów nie jest jedynym możliwym, jednakże należy zwrócić uwagę, że w przypadku pomiaru momentu obrotowego konieczne jest zawsze stosowanie układu połączeń tensometrów w "pełnym mostku". Wynika to z konieczności transmisji sygnału do układu pomiarowego z części obrotowej za pośrednictwem ślizgowego łącza obrotowego. W łączy tym uzyskanie stabilnej rezystancji styków nie jest możliwe nawet przy najlepszej technologii wykonania. Mimo że zmiany rezystancji styków ślizgowych mogą być tego samego rzędu co zmiany rezystancji tensometrów, to w układzie "pełnego mostka" nie decydują one o dokładności pomiarów. W układzie tym zmiany rezystancji na stykach zasilających powodują pomijalnie małe zmiany napięcia zasilania, zaś na stykach przekątnej pomiarowej mostka dodają się do dużej rezystancji aparatury wzmacniającej, nie wpływając decydująco na wynik pomiaru.

W czujnikach do pomiaru momentu obrotowego najprostszym i w wielu przypadkach najwygodniejszym sposobem transmisji sygnału jest zastosowanie układu pierścieni i szczotek. Rozwiązanie to ma jednak pewne wady, jak wspomniana zmienna rezystancja styku ślizgowego, zależna od siły tarcia, oraz niewielka trwałość eksploatacyjna.

Przykładem udanego ominięcia zasygnalizowanych trudności konstrukcyjnych jest pokazany na rys.IV-30 tensometryczny czujnik momentu obrotowego, wyposażony w łącze szczotkowo-ślizgowe w wykonaniu firmy Hottinger B.M typ T1.

Ważniejsze dane techniczne tego czujnika są następujące:

klasa dokładności: 0,2,

prędkość maksymalna: 6000 [obr/min],

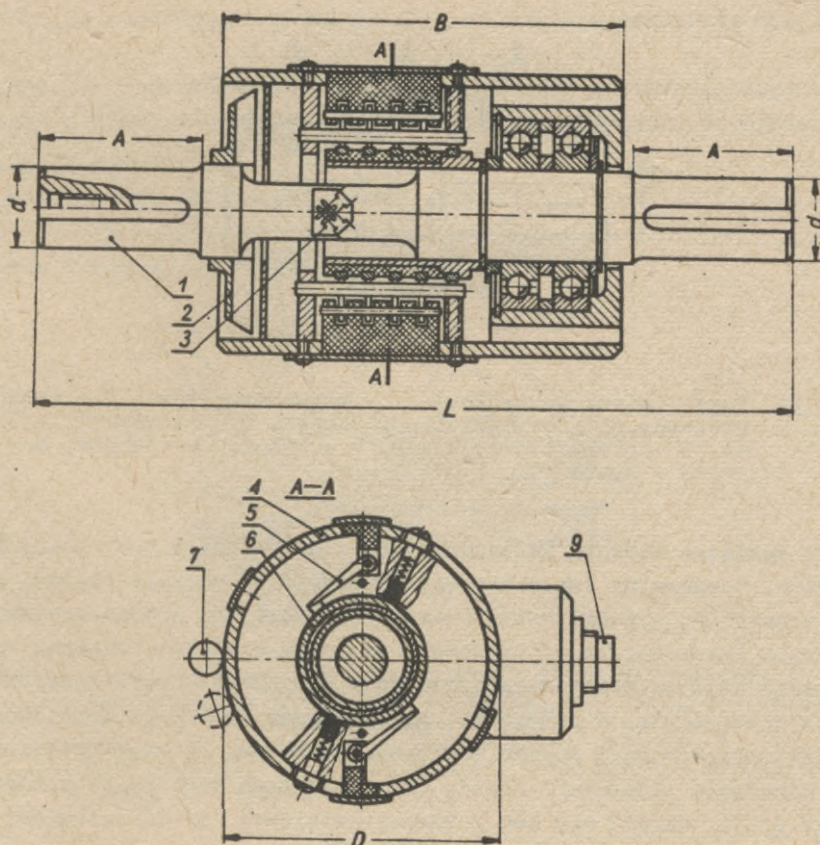
zakres pomiarowy zestawu czujników:  $(50 \div 50000)$  [Nm],

temperatura pracy:  $(-20 \div +70)$  °C,

trwałość: 100 000 godz.

Przedstawiony czujnik momentu obrotowego posiada jednak pewną niedogodność: mianowicie w celu zamontowania go konieczne jest zwiększenie odległości pomiędzy urządzeniami badanymi. W praktyce nie zawsze jest to możliwe. W tych przypadkach przydatna okazuje się konstrukcja momentomierza sprzęgłowego, pokazana na rys.IV-31 /opracowanie patentowe PRL nr 114539/.

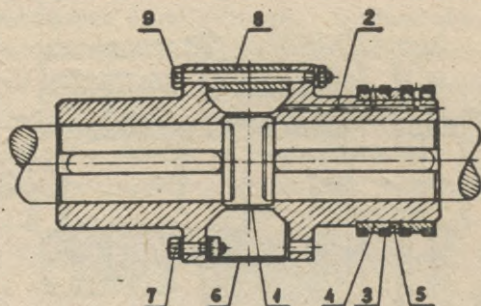




Rys.IV-30. Momentomierz tensometryczny z łączem ślizgowym firmy Hottinger, typ T1: A,B,D,d,L - wymiary zależne od zakresu momentu znamionowego: 1 - stalowy wałek skrętny, 2 - wentylator, 3 - układ tensometrów, 4 - korpus, 5 - szczotki, 6 - pierścienie, 7 - mechanizm podnoszenia szczotek, 8 - szczotki uziemiające, 9 - gniazdo wtykowe

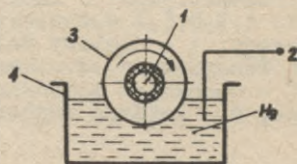
Sprężystym elementem pomiarowym jest w tym przypadku rura sprężelowa /1/ posiadająca w swej środkowej części odpowiednio dobrane przewężenie, na którym umieszczone są czujniki tensometryczne. Sygnał pomiarowy z tensometrów przekazywany jest za pośrednictwem pierścieni ślizgowych, wykonanych ze srebra twardego oraz szczotek wykonanych ze srebra i grafitu /o składzie 75 % srebra, 25 % grafitu/. Pokazana na rysunku tuleja /8/ wraz ze śrubami /9/ podczas pomiaru są usuwane. Ich zadaniem jest zabezpieczenie czujnika przed ewentualnymi uszkodzeniami w czasie montażu.





Rys. IV-31. Momentomierz sprzęgłowy: 1 - rura sprzęgłowa, 2 - kanał na przewody, 3 - pierścienie ślizgowe, 4 - pierścienie izolacyjne, 5 - pierścienie mocujące, 6 - osłona, 7 - śruba, 8 - tuleja, 9 - śruba

Przy pomiarze momentu przenoszonoego przez wirujące wały pędne dużych agregatów, tensometry umieszcza się bezpośrednio na wale badanej maszyny, a transmisję sygnału zabezpiecza się, stosując gotowe zestawy łącz obrotowych /tzw. zbieracze prądowe/. Na rynku krajowym dostępne są zestawy łącz stykowo-ślizgowych, opracowane i wykonane przez Instytut Lotnictwa w Warszawie. W przypadku, gdy wymagana jest duża dokładność pomiaru oraz bardzo mały poziom zakłóceń, stosowane są styki rtęciowe /tzw. komutacja rtęciowa/. Zasadę działania tego typu łącza przedstawia rys. IV-32. Składa się ono z tarczy metalowej /3/ odizolowanej od wału /1/ i zanurzonej w naczyniu z rtęcią /4/.



Rys. IV-32. Zasada komutacji rtęciowej: 1 - wał, 2 - elektroda zbierająca, 3 - tarcza metalowa, 4 - naczynie z rtęcią

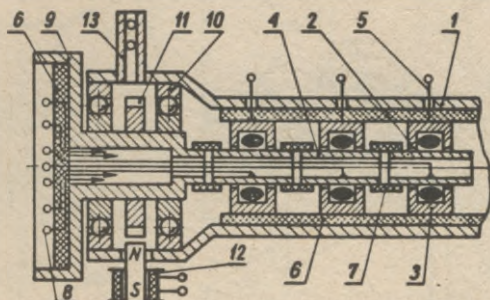
Według tej zasady produkowane są zestawy stykowe zawierające 4 lub 8 identycznych komór wypełnionych rtęcią. Łącza rtęciowe mogą mieć szereg wad, np. przegrzewanie się styków przy dużych prędkościach obrotowych, lub pokrywanie się warstwą źle przewodzących tlenków rtęci.



Trudności te powodują, iż niewiele firm na świecie podejmuje się ich produkcji.

Na rys.IV-33 przedstawiono schemat komutatora rtęciowego typu 4-MTA/T w wykonaniu firmy Vibrometer. Ważniejsze jego parametry są następujące:

prędkość maksymalna; 30 000 [obr/min],  
wartość szumów przy maks.obrotach: 5 [ $\mu V$ ],  
rezystancja izolacji:  $10^{10}[\Omega]$ ,  
zakres temperatury pracy;  $(-25 + 60)^{\circ}C$ .



Rys.IV-33. Komutator rtęciowy - typ 4 MTA/T firmy Vibrometer: 1 - korpus metalowy, 2 - komora z rtęcią, 3 - rtęć, 4 - oś stykowa, 5 - końcówka złączeniowa, 6 - wkładka izolacyjna, 7 - sprzęgło, 8 - końcówki stykowe, 9 - sprzęgło, 10 - łożysko, 11 - koło zębate, 12 - czujnik prędkości obrotowej, 13 - ramię mocujące

## 5.2. Momentomierze indukcyjne

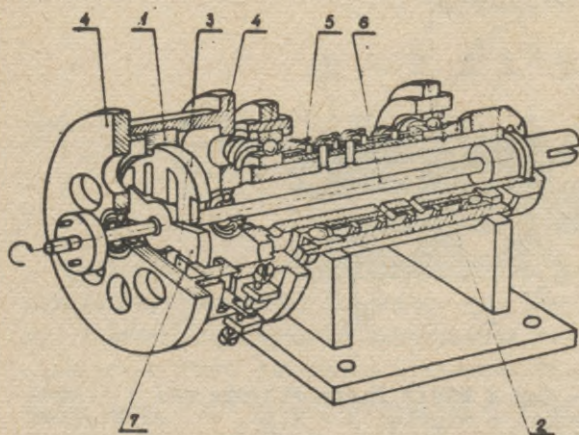
Momentomierze indukcyjne działają w oparciu o indukcyjne czujniki do pomiaru przemieszczeń kątowych przy wykorzystaniu stykowego lub indukcyjnego systemu transmisji sygnału.

Duże zastosowanie tego rodzaju czujników wynika z ich przydatności do pomiarów małych wartości momentów obrotowych już w zakresie od  $0,5 \cdot 10^{-4}$  [Nm]; (0,5 [Gcm]). Ponadto cechami szczególnie ważnymi są:

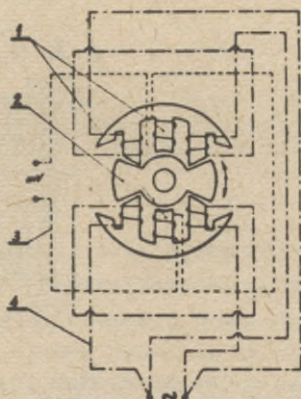
- duża trwałość oraz odporność na wpływy zewnętrzne, a zatem przydatność do badań długotrwałych,
- mała wrażliwość na zmiany rezystancji łączy,
- możliwość stosowania przy dużych prędkościach obrotowych.



Ciekawym rozwiązaniem konstrukcyjnym reprezentującym tę grupę czujników jest momentomierz indukcyjny, opracowany w Politechnice Warszawskiej. W czujniku tym, jako element pomiarowy zastosowano pręt pracujący na skręcanie /rys.IV-34/. Na pręcie tym osadzona jest na sztywno zwora indukcyjnego czujnika różnicowego. Pręt pomiarowy, skręcając się pod działaniem momentu, wywołuje poprzez zworę asymetrię w obwodzie magnetycznym czujnika różnicowego, co daje w efekcie na wyjściu sygnał



Rys.IV-34a. Konstrukcja momentomierza indukcyjnego: 1 - pierścień regulacyjny, 2 - tulejka izolacyjna, 3 - stojan, 4 - korpus, 5 - szczotka, 6 - pręt, 7 - wirnik



Rys.IV-34b. Schemat połączeń: 1 - stojan wraz z uzwojeniami, 2 - rdzeń ruchomy, 3 - przewody wyjściowe, 4 - przewody zasilające

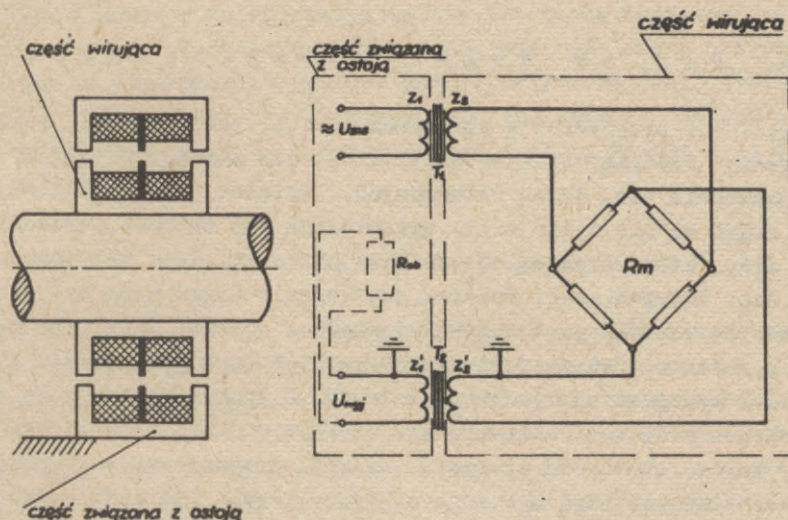
napięciowy, o wartości proporcjonalnej do zmian mierzonego momentu. Momentomierz ten jest przeznaczony do ciągłych pomiarów małych wartości momentów /powyżej  $0,5 \cdot 10^{-4}$  [Nm]/, a dzięki możliwości łatwej wymiany elementu pomiarowego, zakres pracy może być dowolnie zmieniany.

Zastosowanie w tym czujniku łącza stykowo-ślizgowego uzasadnione jest względami konstrukcyjnymi. W większości jednak przypadków, w momentomierzach indukcyjnych celowe jest stosowanie bezstykowych łączy indukcyjnych /transformatorowych/.

Zasada działania łączy indukcyjnego polega na przekazywaniu sygnału za pośrednictwem obracającego się transformatora. Uzwojenia transformatora związane są z dwoma częściami obrotowymi, ułożyskowanymi względem siebie, przy czym jedno /pierwotne/ połączone jest z elementem wirują-

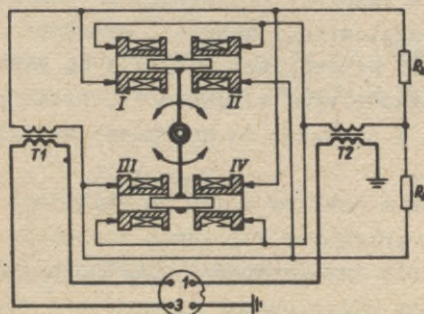


cym, a drugie /wtórne/ z ostoją maszyny. Zasada działania takiego łącza przedstawiona jest na rys.IV-35.



Rys.IV-35. Zasada działania łącza indukcyjnego transformatorowego

Przykładem momentomierza z bezstykowym, transformatorowym przekazywaniem sygnału pomiarowego jest konstrukcja typu TG wykonana przez firmę Hottinger B.M., rys.IV-36.



Rys.IV-36. Schemat połączeń momentomierza indukcyjnego firmy Hottinger, typ TG..

O przydatności tego urządzenia świadczą niektóre dane techniczne:

- zakres pomiarowy:  $1 \text{ [Mm]} \div 0,1 \text{ [Mm]}/\text{w zależności od typu/}$ ,
- maksymalna prędkość obrotowa:  $10\,000 \text{ [obr/min]}$ ,
- temperaturowy zakres pracy:  $(-25 \div +70) [^{\circ}\text{C}]$ ,



- klasa dokładności: 0,5,
- napięcie zasilania: 10 [V] o częstotliwości  $f = 8$  [kHz].

## 6. P o m i a r   d r g a ń   m e c h a n i c z n y c h

W większości przypadków w obiektach takich, jak maszyny i budowle inżynierskie, źródłem drgań są siły zewnętrzne zmienne w czasie, powodujące powstanie tzw. drgań wymuszonych. Pamiętać przy tym należy, że źródłem drgań są nie tylko siły, zmieniające swą wartość okresowo, lecz również siły, których przebieg nie jest okresowy, lecz przypadkowo zmienny /np. uderzeniowo/. Źródłem powstawania drgań mogą być również siły, których wartość jest wprawdzie stała w czasie, lecz kierunek lub punkt przyłożenia jest zmienny. We wszystkich tych przypadkach mamy do czynienia z wymuszeniem dynamicznym drgań. W konstrukcjach mogą również występować drgania samowzbudne, których mechanizm powstawania jest niekiedy bardzo trudny do wykrycia. Na ogół przyczynami występowania drgań samowzbudnych mogą być zmienne opory tarcia lub siły hydro- i aerodynamiczne.

Wyznaczenie wartości i przebiegu zmienności obciążeń i drgań w czasie daje możliwość określenia rzeczywistych naprężeń w maszynach i konstrukcjach, czyli pozwala na podanie rzeczywistych warunków pracy badanego obiektu. W szczególności pozwala nie tylko na wyznaczenie występujących naprężeń maksymalnych, lecz również tzw. charakterystyki cyklu zmiany naprężeń w czasie - potrzebnej do obliczeń zmęczenia.

W konstrukcji i eksploatacji maszyn i urządzeń /z wyjątkiem specjalnych urządzeń techniki wibracyjnej/ drgania są zjawiskiem niepożądanym, a nawet wręcz szkodliwym, albowiem zakłócają poprawną pracę maszyn czy konstrukcji i prowadzą do szybkiego zużycia oraz powodują straty energetyczne.

Za pomocą pomiarów i analizy drgań na obiektach rzeczywistych należy ustalić miejsca i przyczyny działania czynników wymuszających oraz podać sposoby obniżenia intensywności działania źródeł drgań. Ponadto należy ustalić sposoby odizolowania szczególnie wrażliwych elementów od źródeł drgań, stosując odpowiednie zawieszenie sprężysto-tłumiące i dobierając doświadczalnie jego parametry.

Pomiary drgań są ponadto podstawowym narzędziem ostatnio rozwijającej się dziedziny, tzw. diagnostyki drganiowej, za pomocą której można wykryć różne nieprawidłowości w pracy maszyn, powstałe w trakcie eksploatacji. Przykładem takich nieprawidłowości mogą być np. zwiększone luzy, mimośrodowości, nadmierne zużycia czy pęknięcia elementów maszyn, które naruszają niezawodność pracy maszyny. Znając przebieg drgań w



obiekcie prawidłowo działającym oraz przebieg drgań w obiekcie badanym, można określić zaburzenia spowodowane różnymi przyczynami i ustalić źródło ich powstania.

Analiza i pomiary drgań maszyn są zagadnieniami złożonymi, dlatego w kwestiach teorii i matematycznych zasad pomiarów drgań należy odesłać czytelnika do obszernej literatury specjalistycznej [44], [48], [50], [70], [78], [81]. Natomiast w opracowaniu tym naświetlone zostaną pewne podstawowe zależności wraz z podaniem ogólnych zasad pomiarów i analizy drgań.

### 6.1. Wielkości charakterystyczne

Drgania mechaniczne są, najogólniej biorąc, oscylacyjnymi zmianami położenia masy w stosunku do poziomu odniesienia. Podstawową wielkością, która charakteryzuje drgania ale nie określa ich intensywności, jest częstotliwość. Intensywność ruchu drgającego można natomiast określić w drodze pomiarów wartości takich wielkości, jak przemieszczenia, szybkości, przyspieszenia lub szybkości narastania przyspieszeń.

Amplitudy tych wielkości nazywane są wartościami szczytowymi  $y_{\max}$ . Inny rodzaj wartości tych wielkości /czyli parametrów ruchu drgającego/ stanowi średnia arytmetyczna bezwzględnych wartości chwilowych w czasie jednego okresu drgań:

$$y_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| dt \quad (31)$$

lub wartość pierwiastka kwadratowego średniej kwadratów wartości chwilowych w czasie jednego okresu, zwana wartością skuteczną

$$y_{\text{sk}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \quad (32)$$

gdzie:  $y(t)$  - rozpatrywana wielkość fizyczna.

Jak wiadomo, w przypadkach drgań harmoniczych /zwanych także sinusoidalnymi/ występują znane zależności pomiędzy wartościami przemieszczeń  $x$ , szybkości  $v$ , przyspieszeń  $a$  i dalszymi pochodnymi, jak szybkość narastania przyspieszeń  $\frac{da}{dt}$ , a mianowicie:

$$x : v : a : \frac{da}{dt} = 1 : 2\pi f : (2\pi f)^2 : (2\pi f)^3 \quad (33)$$



a także znane zależności pomiędzy wartościami szczytowymi, średnimi i skutecznymi

$$Y_{\max} : Y_{\text{sr}} : Y_{\text{sk}} = 1 : 0,636 : 0,707 \quad (34)$$

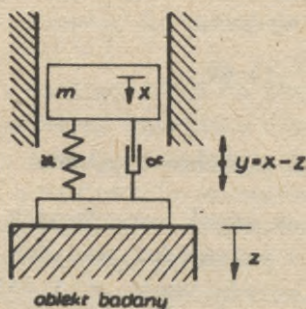
W praktyce przebiegi drgań mają charakter w różnym stopniu odmienny od harmonicznego /głównie na skutek nieliniowej charakterystyki więzów sprężystych/, a w związku z tym odpowiednio zmieniają się /i to niekiedy dość znacznie/ relacje między wielkościami, jak i rodzajami wartości /patrz wzory (33) i (34)/.

Ponieważ wszystkie trzy wielkości: przesunięcie, prędkość i przyspieszenie są ze sobą matematycznie ściśle powiązane, wybór jednej z tych wielkości do opisu ruchu drgającego jest w konkretnym przypadku tylko kwestią wygody.

Względy praktyczne narzucają jednak pewne zalecenia wynikające z wielkości sygnału otrzymywanego z czujnika. Należy bowiem zawsze mierzyć ten parametr, który daje największy sygnał. Zatem przy częstotliwościach niskich należy mierzyć przemieszczenia, gdyż zwykle niskim częstotliwościom towarzyszą duże przemieszczenia. Przy częstotliwościach wysokich mierzy się przyspieszenia, gdyż są proporcjonalne do kwadratu częstotliwości.

## 6.2. Model dynamiczny inercyjnych czujników drgań

Do pomiaru drgań wykorzystywane są najczęściej czujniki inercyjne /bezwładnościowe/ zwane również czujnikami sejsmicznymi. Model dynamiczny działania tego typu czujników został przedstawiony na rys.IV-37.



Rys.IV-37. Model dynamiczny inercyjnego czujnika drgań

Przedstawia on układ drgający jednowasowy, charakteryzujący się trzema podstawowymi parametrami: masą  $m$ , sztywnością  $x$ , tłumieniem  $\alpha$ .



Równanie ruchu takiego układu ma postać:

$$m \ddot{x} + \alpha(\dot{x} - \dot{z}) + \chi(x - z) = 0 \quad (35)$$

Natomiast równanie ruchu masy względem badanego obiektu przy uwzględnieniu, że  $y = x - z$  oraz  $2\varrho = \frac{\alpha}{m}$  i  $\frac{\chi}{m} = \omega_0^2$ , wynosi

$$\ddot{y} + 2\varrho \dot{y} + \omega_0^2 y = \ddot{z} \quad (36)$$

Jeżeli wymuszenie ma charakter harmoniczny

$$z(t) = Z_0 \sin \omega t$$

gdzie:  $Z_0$  i  $\omega$  - odpowiednio amplituda i częstość wymuszenia  $\omega = 2\pi f$ ,  
to równanie ruchu zapisać można w postaci:

$$\ddot{y} + 2\varrho \dot{y} + \omega_0^2 y = Z_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (37)$$

a jego rozwiązanie przybierze następującą postać:

$$y = A e^{-\varepsilon \omega_0 t} \sin(\sqrt{1 - \varepsilon^2} \omega_0 t + \varphi_0) + y_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (38)$$

gdzie:

$A, \varphi_0$  - stałe zależne od warunków początkowych,

$\omega_0^2 = \frac{\chi}{m}$  - częstość drgań własnych ( $\omega_0 = 2\pi f_0$ ),

$\varepsilon = \frac{\alpha}{2\sqrt{\chi m}}$  - jednostkowy współczynnik tłumienia,

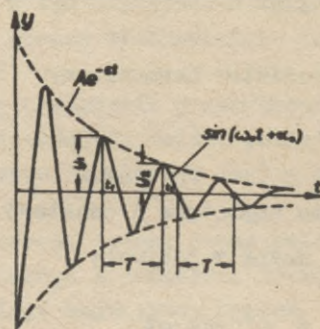
$y_0 = Z_0 \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_0)^2]^2 + (2\varepsilon \omega/\omega_0)^2}}$  - amplituda drgań wymuszonych,

$\varphi = \arctg \frac{2\varepsilon (\omega/\omega_0)}{1 - (\omega/\omega_0)^2}$  - kąt fazowy.

Pierwszy człon równania przedstawia drgania swobodne zanikające /wobec istnienia  $e^{-\omega_0 t}$  - rys.IV-38/, a człon drugi przedstawia drgania wymuszone o stałej amplitudzie  $y_0$ . W praktyce można przyjąć, że równocześnie z ruchem wymuszonym występuje szybko zanikający ruch swobodny i po kilku cyklach drgania ustalą się, a pozostaje tylko ruch wymuszony. Po dostatecznie długim czasie można przyjąć, że:



$$y \approx y_0 \sin(\omega t - \varphi) = \frac{z_0 (\omega / \omega_0)^2}{\sqrt{[1 - (\omega / \omega_0)^2]^2 + (2\epsilon \omega / \omega_0)^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (39)$$



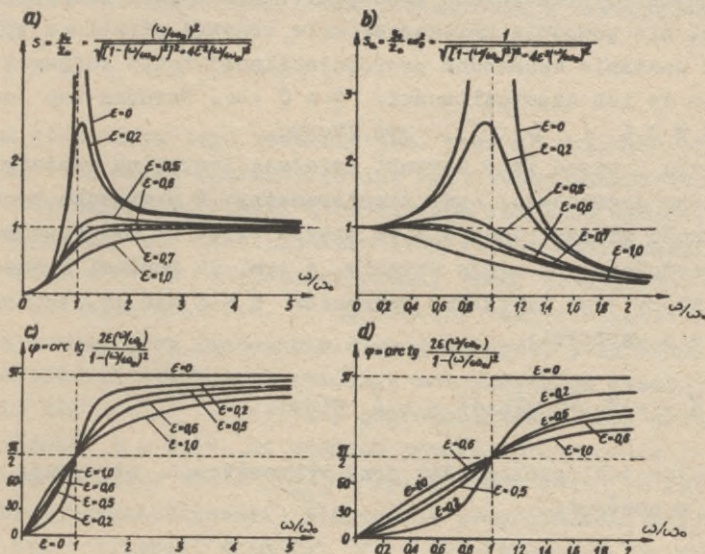
Rys.IV-38. Przebieg drgań swobodnych tłumionych

Oznaczając ponadto przez  $S$  stosunek amplitudy  $y_0$  drgań elementu inercyjnego do amplitudy  $z_0$  drgań punktu obiektu badanego, otrzymuje się:

$$y = z_0 S \sin(\omega t - \varphi) \quad (40)$$

Obrazem graficznym tego równania jest rodzina krzywych przedstawiona na rys.IV-39a, stanowiąca charakterystykę amplitudowo-częstościową omawianego czujnika. Wynika z niej, że czułość  $S$  /zwana również współczynnikiem amplifikacji/ wzrasta ze zmniejszaniem się tłumienia i przy  $\epsilon = 0$  oraz  $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$ , czyli w warunkach rezonansu,  $S \rightarrow \infty$ . Oznacza to, że pomiar w tych warunkach nie może być wykonany /stan rezonansowy wykorzystywany jest niekiedy do pomiaru częstości drgań harmonicznym w przyrządach rezonansowych typu częstościomierzy/. Natomiast, gdy tłumienie wzrasta, czułość przy rezonansie szybko maleje, przy równoczesnym nieznacznym przesunięciu się wierzchołków rezonansowych w prawo; wreszcie przy wartości tłumienia  $\epsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$  rezonans przestaje istnieć. Charakterystyczną cechą rodziny rozpatrywanych krzywych jest ich asymptotyczne zbliżanie się do stałej równej jedności. Praktycznie oznacza to, że maleją zniekształcenia amplitudowe i układ drgają-





Rys.IV-39. Charakterystyki amplitudowo-częstościowe i fazowe czujników inercyjnych: a/, c/ wibrometru, b/, d/ akcelerometru

cy mierzy coraz rzetelniej amplitudę badanych drgań, innymi słowy czułość układu pomiarowego jest const. Wynika stąd, że chcąc otrzymać prawidłowy pomiar drgań w ruchu drgającym, częstotliwość drgań własnych  $f_0$  musi być możliwie mała w stosunku do częstotliwości drgań mierzonych "f" /przrządy nadrezonansowe/. Jest to realizowane w wibrometrach przez wprowadzenie dużej masy, podczas gdy oddziaływanie obiektu /obudowy czujnika/ przez sprężynę na masę, będzie możliwie małe, tzn. zastosuje się miękką sprężynę.

Kąt przesunięcia fazowego między wielkościami  $y$  i  $z$  może być określony z zależności:

$$\varphi = \arctg \frac{2\epsilon(\omega/\omega_0)}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \quad (41)$$

Zależność tę można przedstawić również graficznie, rys.IV-39c.

Ponieważ w badaniach drgań występują zazwyczaj drgania złożone, tzn. zawierające drgania harmoniczne różnych częstotliwości, to zniekształcenie obrazu zarejestrowanego polegać może nie tylko na różnej czułości czujnika dla poszczególnych częstotliwości harmonicznych, ale tak-



że na różnych przesunięciach fazowych. Przesunięcia fazowe między harmonicznymi nie powodują zniekształcenia krzywej przebiegu tylko wówczas, gdy zostanie zachowana proporcjonalność kątów fazowych tych harmonicznymi do ich częstotliwości:  $\varphi = C \cdot \omega$ . Warunek ten jest spełniony, gdy  $\xi \approx 0,6$  i  $\omega_0 \leq 1$ , rys.IV-39c.

W oparciu o nieco inne warunki działają inercyjne czujniki przyspieszenia ruchu drgającego, tzw. akcelerometry. W przypadku tych czujników zależność między rzeczywistym przyspieszeniem a rejestrowaną przez czujnik wartością nie ulega zmianie, z tym, że ruchowi sinusoidalnemu obudowy, który jest określony równaniem  $z = Z_0 \sin \omega t$ , towarzyszy przyspieszenie o wartości:

$$\ddot{z} = -Z_0 \omega^2 \sin \omega t = -\ddot{Z}_0 \sin \omega t \quad (42)$$

Postępując analogicznie jak przy wibrometrach, otrzymuje się równanie ruchu w postaci:

$$y = \frac{\ddot{Z}_0}{\omega^2} \frac{(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{(2\xi \omega/\omega_0)^2 + [1 + (\omega/\omega_0)^2]^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (43)$$

czyli

$$y = \frac{\ddot{Z}_0}{\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{(2\xi \omega/\omega_0)^2 + [1 + (\omega/\omega_0)^2]^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (44)$$

oraz

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2\xi \omega/\omega_0}{1 - (\omega/\omega_0)^2}$$

Natomiast czułość dynamiczną akcelerometru określa równanie:

$$S_a = \frac{y_0}{\ddot{Z}_0} = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{(2\xi \omega/\omega_0)^2 + [1 - (\omega/\omega_0)^2]^2}} \quad (45)$$

Łatwo zauważyć, że funkcja  $S_a/\omega_0^2$  jest określona tym samym równaniem, co poprzednio przedstawiona funkcja  $S = y_0/\ddot{Z}_0$ .



Ostatecznie równanie ruchu można przedstawić w następującej postaci:

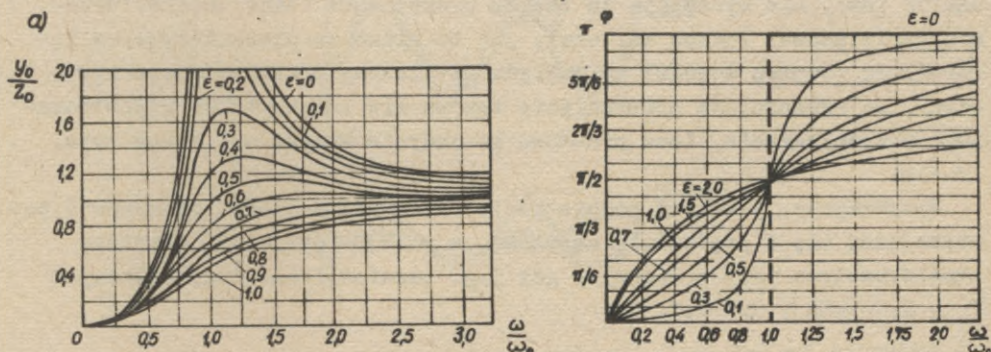
$$y \approx \ddot{Z}_0 S_a \sin(\omega t - \varphi) \quad (46)$$

Obrazem graficznym tego równania jest rodzina krzywych, pokazana na rys. IV-39b, stanowiąca charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową dla różnych współczynników tłumienia. Z ostatniego równania wynika, że zachowana jest wymagana dla akcelerometru proporcjonalność przemieszczenia  $y$ , masy sejsmicznej  $m$  do przyspieszenia ruchu drgającego. Z przedstawionej charakterystyki widać, że największy zakres częstotliwości, który może być mierzony przy zachowaniu stałej czułości przyrządu, przypada dla częstotliwości mierzonych znacznie mniejszych od częstotliwości własnej, czyli dla  $\omega \ll \omega_0$  /przyrządy podrezonansowe/. Dla przyjętej wartości tłumienia  $\xi = 0,65$  ma miejsce ponadto praktycznie liniowy wzrost przesunięcia fazowego  $\varphi = f(\frac{\omega}{\omega_0})$  - rys. IV-39d. Zatem, w celu uzyskania dużego zakresu częstotliwości mierzonych przyspieszeń, należy dążyć do dużych częstotliwości własnych " $f_0$ " akcelerometru, co uzyskiwane jest przez dobór sprężyny o dużej sztywności /twardej/ oraz małych mas sejsmicznych przy zachowaniu współczynnika tłumienia  $\xi = 0,65$ .

#### Wierność wskazań czujników inercyjnych

Przez wierność wskazań czujników inercyjnych, jak również całego układu pomiarowego należy rozumieć możliwość pomiaru parametrów drgań bez skażeń amplitudowych i fazowych czyli błędów dynamicznych.

Jeżeli przedmiotem pomiaru jest przemieszczenie  $Z_0$  obiektu badanego, to należy dążyć do zachowania  $y_0 = Z_0$ . Ma to miejsce w przypadku  $\omega_0 \ll \omega$ , tzn. przy małych wartościach częstotliwości drgań własnych czujnika. Najmniejsze zniekształcenie amplitudy otrzymuje się przy wartościach  $\xi = 0,6 \div 0,7$ , wówczas  $\omega/\omega_0$  może być rzędu 1,5, co zobrazowano na rys. IV-40a.



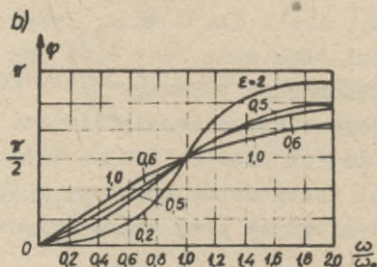
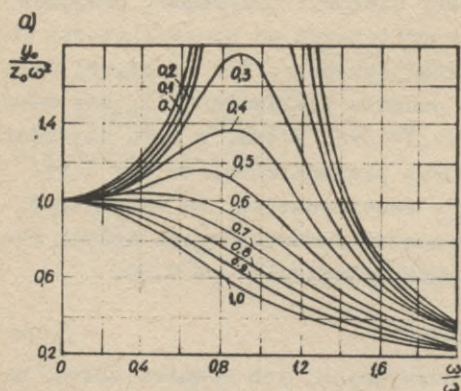
Rys. IV-40. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa i fazowa wibrometru



Na rys. IV-40b pokazano zależność kąta fazowego  $\varphi$  od stosunku  $\omega/\omega_0$ . Przy  $\omega/\omega_0 = 0$  kąt  $\varphi = 0$  lub  $\pi$ . Przy  $\omega/\omega_0 = 1$  występuje rezonans i kąt fazowy  $\varphi$  osiąga wartość  $\pi/2$ . Pożądane jest, aby przesunięcie fazowe nie zależało od stosunku  $\omega/\omega_0$  lub zależało od niego liniowo. Z rysunku widać, że warunek ten spełniony jest przy  $\varepsilon = 0,6 \div 0,7$ .

Jeżeli przedmiotem pomiaru jest przyspieszenie obiektu, to należy dążyć do zachowania  $\omega_0 \gg \omega$ . Na rys. IV-41a przedstawiono zależność

$\frac{y_0}{z_0 \omega^2}$  w funkcji  $\omega/\omega_0$  dla różnych wartości tłumienia.



Rys. IV-41. Charakterystyka amplitudowo-częstościowa i fazowa akcelerometru

Z wykresów tych wynika, że optymalna wartość tłumienia zawarta jest w granicach  $(0,6 \div 0,7)$ , w których  $\omega/\omega_0 = 0,7$ . Oznacza to, że przy  $\varepsilon = 0,6$  i  $\omega/\omega_0 = 0,7$  można za pomocą czujników o częstotliwości drgań własnych 100 [Hz] mierzyć przebiegi przyspieszeń o częstotliwości 70 [Hz], nie występują tu bowiem praktycznie żadne zniekształcenia amplitudowe. Podane wartości, jak to widać na charakterystyce fazowej, są również dogodnie ze względu na liniowy przebieg charakterystyki, co oznacza, że przesunięcie fazowe nie zniekształca rejestrowanego przyspieszenia, lecz przesuną go jedynie wzdłuż osi czasu /rys. IV-41b/.

Przykładowo, jeżeli w pompie wielotłoczkowej o ilości tłoczków 6, poruszającej się z prędkością obrotową  $n = 1200$  [obr/min], mierzymy akcelerometrem przyspieszenie, gdy jego częstotliwość drgań własnych  $f_0 = 0,1$  [kHz],  $\varepsilon = 0,7$ , to:



$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{2\pi \frac{n}{60}}{2\pi f_0} = 0,2$$

$$\varphi = \arctg \frac{2\varepsilon \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} = \arctg \frac{2 \cdot 0,7 \cdot 0,2}{1 - 0,2^2}$$

przesunięcie fazowe  $\varphi \approx 16^\circ 15'$

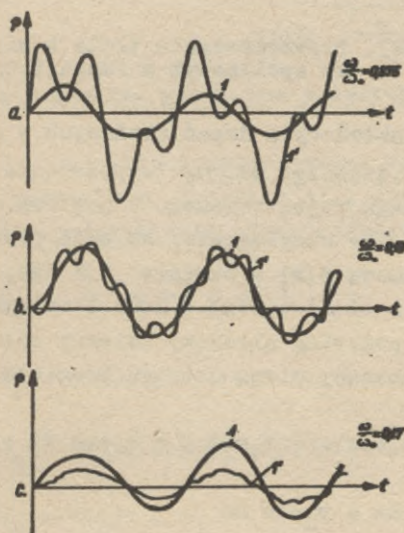
co stanowi  $\sim 4,6\%$  w stosunku do  $2\pi$ .

Okres drgań przyspieszenia

$$T = \frac{60}{n} = \frac{60}{1200} = 0,05 \left[ \frac{1}{s} \right]$$

Jeżeli przebieg drgań zapisywany jest na taśmie oscylografu, która porusza się z prędkością  $1[m/s]$ , to jeden okres zapisany zostanie na długości  $1000 \cdot 0,05 = 50 [mm]$  i będzie przesunięty o  $2,3 [mm]$ .

Dla zapewnienia wierności odwzorowania rzeczywistego przebiegu amplitudy konieczne jest zachowanie odpowiedniego stosunku  $\omega/\omega_0$ . Pokazują to wykresy na rys.IV-42. Jak to wynika z przytoczonego na tym rysunku



Rys.IV-42. Wierność wskazań akcelerometru w zależności od stosunku  $\frac{\omega}{\omega_0}$

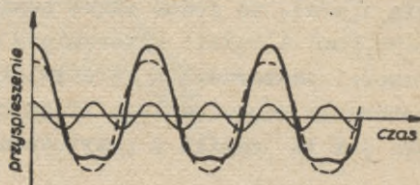


przykładu, wyznaczona charakterystyka /zarejestrowana/ jest podobna do rzeczywistej przy  $\omega/\omega_0 = 0,17$ .

### 6.3. Pomiar i analiza drgań złożonych

Przy pomiarach drgań harmoniczných pomiar częstotliwości i amplitudy dostarcza pełnej informacji o przebiegu ruchu drgającego. Wyznaczenie takich parametrów, jak: prędkość, przyspieszenie, jak również określenie ich wartości skutecznych czy średnich odbywać się może bądź to w drodze pomiarowej /zastosowanie urządzeń różniczkujących/, bądź w drodze obliczeń. W praktyce zwykle występują drgania złożone, które można przedstawić jako superpozycję składowych harmoniczných drgań.

Zatem drgania harmoniczne podlegają prawu geometrycznego sumowania, dając w wyniku złożone drgania wypadkowe, które przyjmują postać zależną od charakteru jego składowej. Przykładowo, przyspieszenie ruchu tłoka w silniku spalinowym można przedstawić jako sumę dwóch drgań harmoniczných dodanych metodą superpozycji; rys.IV-43.



Rys.IV-43. Przyspieszenie tłoka w silniku spalinowym w funkcji czasu

W celu wyznaczenia składowych drgań złożonych, w przypadku braku analizatora harmoniczných, dającego odczyty bezpośrednie, posłużyć się można analizą graficzną przebiegu rejestrowanego w postaci cechowania wykresu zarejestrowanego na taśmie oscylografu. Na ogół przebieg drgania złożonego jest funkcją okresową  $f(x)$  o okresie  $2\pi$  tak, że dla każdego  $x$  spełnione jest równanie  $f(x) = f(x) + 2\pi$ . Z matematyki jest znane twierdzenie, że każdy przebieg okresowy zmienny można rozłożyć na szereg trygonometryczny, noszący miano szeregu Fouriera, mający postać:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos x + b_1 \sin x + a_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x + \dots + \\ + a_n \cos nx + b_n \sin nx$$



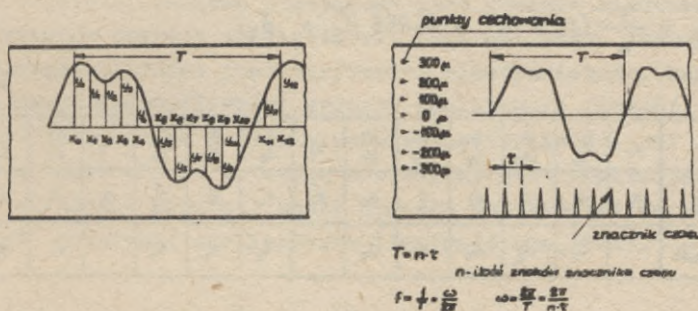
gdzie:

$$n = 0, 1, 2, \dots; \quad x = \frac{2\pi t}{T},$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \cos nx \, dx,$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(x) \sin nx \, dx$$

Z ogólnych równań matematycznych /w tym miejscu pominiętych/ wynika, że dla obliczenia współczynników " $a_n$ " i " $b_n$ " zadanego wykresu wyprowadzić można  $n+1$  równań normalnych, których rozwiązanie daje poszukiwane możliwości. W tym celu pole wykresu należy podzielić tak jak wskazuje to rys.IV-44. Odczytane współczynniki  $y_n$  należy stabelaryzować



Rys.IV-44. Analiza graficzna przebiegu drgań

wpisując je do tablicy, w której przeprowadza się dodawanie i odejmowanie odpowiednich składników /tablica XI/. Poszczególne współczynniki obliczane są przez podstawienie otrzymanych wartości do wzorów:

$$a_0 = \frac{1}{12} (\sigma_0 + \sigma_3 + \sigma_1 + \sigma_2)$$

$$a_1 = \frac{1}{6} (\tau_0 + 0,866 \tau_1 + 0,5 \tau_2)$$

$$a_2 = \frac{1}{6} (\sigma_0 - \sigma_3 + 0,5 \sigma_1 - 0,5 \sigma_2)$$

$$a_3 = \frac{1}{6} (\tau_0 - \tau_2)$$



$$a_4 = \frac{1}{6} (\sigma_0 + \sigma_3 - 0,5 \sigma_1 - 0,5 \sigma_2)$$

$$a_5 = \frac{1}{6} (\tau_0 - 0,866 \tau_1 + 0,5 \tau_2)$$

$$a_6 = \frac{1}{12} (\sigma_0 + \sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_3)$$

$$b_1 = \frac{1}{6} (0,5 \delta_1 + 0,866 \delta_2 + \delta_3)$$

$$b_2 = \frac{1}{6} (0,866 \gamma_1 + 0,866 \gamma_2)$$

$$b_3 = \frac{1}{6} (\delta_1 - \delta_2)$$

$$b_4 = \frac{1}{6} (0,866 \gamma_1 - 0,866 \gamma_2)$$

$$b_5 = \frac{1}{6} (0,5 \delta_1 - 0,866 \delta_2 + \delta_3)$$

Tablica XI

| $\pm$   | $u$   | $y_1$<br>$y_n$ | $y_2$<br>$y_n$ | $y_3$<br>$y_n$ | $y_4$<br>$y_n$ | $y_5$<br>$y_n$ | $y_6$<br>$y_n$ | $s_0$<br>$s_n$ | $s_1$<br>$s_n$ | $s_2$<br>$s_n$ | $s_3$ | $d_1$<br>$d_n$ | $d_2$<br>$d_n$ | $d_3$ |
|---------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|----------------|----------------|-------|
| Sumy    | $s_0$ | $s_1$          | $s_2$          | $s_3$          | $s_4$          | $s_5$          | $s_6$          | $s_0$          | $s_1$          | $s_2$          | $s_3$ | $d_1$          | $d_2$          | $d_3$ |
| Różnice |       | $d_1$          | $d_2$          | $d_3$          | $d_4$          | $d_5$          |                | $\tau_0$       | $\tau_1$       | $\tau_2$       |       | $\tau_1$       | $\tau_2$       |       |

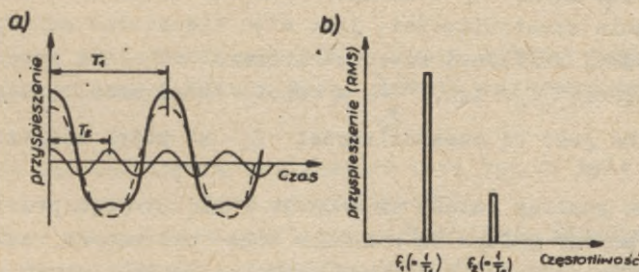
Otrzymane współczynniki należy wstawić do szeregu Fouriera, uzyskując w ten sposób określone wartości poszczególnych składowych drgania harmonicznego.

Metoda ta naraża sporo żmudnych obliczeń, ponadto zawodzi, gdy w badanym obiekcie występuje więcej niż jedno źródło drgań. Dodatkową niedogodnością jest to, że określając przebiegi poszczególnych składowych drgań i oceniając drgania według wartości szczytowych, nie można uzyskać poprawnego wyniku bez znajomości kątów fazowych drgań składowych.

Dokładne określenie kąta fazowego znacznie komplikuje prace pomiarowe, dlatego przyjęto posługiwać się wartością skuteczną, która daje ocenę niezależną zarówno od kształtu, jak i kątów fazowych drgań składowych.

Ponieważ znajomość występujących częstotliwości daje najwięcej informacji o charakterze drgań, przyjęto w technice pomiarowej charakteryzować drgania jako wartość skuteczną w funkcji częstotliwości, zamiast charakteryzować je jako wartości chwilowe w funkcji czasu - rys. IV-45.

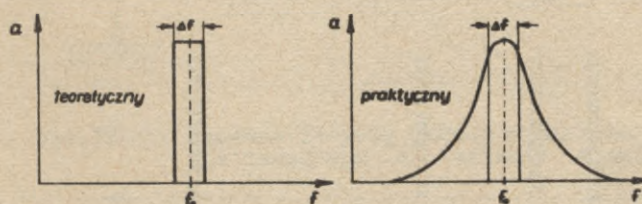




Rys. IV-45. Zapis przebiegu drgań: a/ w funkcji czasu, b/ w funkcji częstotliwości

W oparciu o tę zasadę można także analizować drgania nieperiodyczne, co ma ogromne znaczenie praktyczne.

Analiza częstotliwościowa prowadzona jest obecnie elektronicznie za pomocą przyrządów zwanych analizatorami częstotliwości /harmonicznych/. Analizator częstotliwości jest przyrządem elektronicznym, który wzmacnia tylko pewne częstotliwości sygnału pomiarowego /drgań/, a mianowicie te, które zawarte są w wąskim paśmie częstotliwości  $\Delta f$ , w otoczeniu częstotliwości  $f_0$ , na którą nastrojony jest analizator. Wszystkie inne składniki częstotliwości sygnału pomiarowego są mocno stłumione. Zasadę działania analizatorów ilustruje rys. IV-46.



Rys. IV-46. Zilustrowanie zasady działania analizatora drgań

Aby uzyskać całkowite widmo częstotliwości analizowanego przebiegu należy przestroić pasmo częstotliwości w poddanym analizie zakresie. Dokonywane jest to poprzez zmianę wartości  $f_0$  w sposób automatyczny lub ręczny.

Analogowe analizatory częstotliwości mogą pracować w oparciu o dwa systemy:

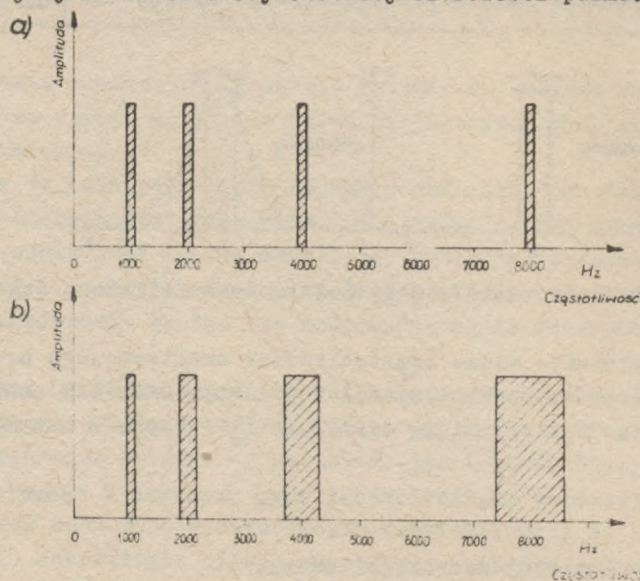
- a/ analizatory o stałej szerokości pasma,
- b/ analizatory o stałej względnej szerokości pasma.



W analizatorach grupy a szerokość pasma  $\Delta f$  nie zmienia się podczas przestrajania częstotliwości, jest więc niezależna od  $f_0$ . W analizatorach o stałej względnej szerokości pasma  $\Delta f$  jest zawsze stałą /procentowo/ częścią  $f_0$ , tzn.  $\frac{\Delta f}{f_0} = \text{const.}$  Zatem absolutna szerokość pasma  $\Delta f$  zależna jest od częstotliwości  $f$ , na którą analizator jest nastrojony.

Wybór systemu analizy zależy od rodzaju analizowanego przebiegu. W przypadku, gdy pomiar polega na analizie drgań okresowych, zawierających dużą ilość całkowicie stabilnych, okresowych składników, korzystny jest wybór analizatora o stałej szerokości pasma. Jeżeli mierzony sygnał nie jest całkowicie stabilny, korzystny jest wybór analizatora o stałej względnej szerokości pasma. Taki przypadek może zaistnieć, gdy mierzone są drgania obracających się części maszyn lub drgania silników, pomp itp. Co więcej, ponieważ "niestabilna" praca powoduje stałe względne zmiany częstotliwości, wybór ten jest tym bardziej uzasadniony.

Chociaż analiza przy stałej względnej szerokości pasma jest, ogólnie rzecz ujmując, korzystniejsza, to jednak jej zdolność rozdzielcza może niekiedy okazać się niewystarczająca. W niektórych bowiem przypadkach badawczych wymagana jest zdolność rozdzielcza częstotliwości mniejsza od 5 %, co przy użyciu analizatorów o stałej względnej szerokości pasma jest trudne do zapewnienia. Taką zdolność rozdzielczą mogą zapewnić jedynie analizatory o stałej szerokości pasma.



Rys. IV-47. Częstotliwościowa analiza drgań. Zasada analizy: a/ o stałej szerokości pasma, b/ o stałej względnej szerokości pasma



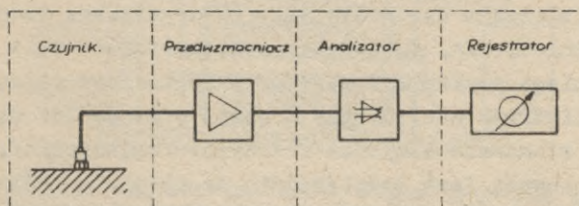
Na rys.IV-47 przedstawiono przebiegi obu rodzajów analiz w funkcji częstotliwości.

Przy wyborze najdogodniejszego dla danego zadania pomiarowego analizatora częstotliwości należy wziąć ponadto pod uwagę następujące czynniki:

- 1/ zakres częstotliwości analizatora musi być na tyle szeroki, by pokrywał mierzone widmo częstotliwości,
- 2/ zdolność rozdzielcza analizatora /tzn. jego właściwości do wyodrębniania różnych składowych częstotliwości/, musi być zadowalająca. Z drugiej strony nie powinna być ona zbyt wysoka, gdyż wydłuża to znacznie czas kompleksowej analizy.

Całość układu pomiarowo-analizującego /rys.IV-48/ do badania drgań można podzielić na dwie części:

- 1/ część pomiarową, w skład której wchodzi:
  - czujnik drgań /akcelerometr/,
  - wzmacniacz elektroniczny /przedwzmacniacz i wzmacniacz całkujący/
- 2/ część analizującą, składającą się z:
  - analizatora częstotliwości,
  - rejestratora /miernika/.



Rys.IV-48. Schemat blokowy układu pomiarowo-analizującego do badania drgań

W praktyce bardzo często drgania mechaniczne mierzone są za pomocą aparatury grupy pierwszej i rejestrowane są na taśmie magnetofonowej. Taśma ta analizowana jest później w warunkach laboratoryjnych przy użyciu aparatury grupy analizującej. Taki sposób realizowania pomiarów drgań umożliwia ponadto analizę drgań o bardzo niskiej częstotliwości, tzn. poniżej 10 Hz. W zakresie tym analiza częstotliwości /z wykorzystaniem aparatury analizującej/ jest utrudniana ze względu na trudności w konstrukcji i użytkowania filtrów niskiej częstotliwości.

Analiza taka staje się możliwa dzięki zastosowaniu metody transformacji częstotliwości, za pomocą taśmy magnetofonowej. Transformację



częstotliwości uzyskuje się poprzez zarejestrowanie na magnetofonie pomiarowym przebiegu badanego przy małej prędkości posuwu taśmy, a następnie odtworzenie go przy odpowiednio większej prędkości. /Poniżej 5 [Hz] mieści się widmo częstotliwości, obejmujące pierwsze harmoniczne drgań takich obiektów, jak ciężkie konstrukcje mostów, suwnic, żurawi, budynków itp./

#### 6.4. Sposoby przeprowadzania pomiaru drgań i dobór czujników

Parametry ruchu drgającego mogą być mierzone przez:

- bezpośrednie naklejenie tensometrów na elemencie drgającym,
- za pomocą czujników przemieszczeń,
- za pomocą czujników inercyjnych /sejsmicznych/.

Pierwszy sposób, czyli pomiar przy użyciu tensometrów, ogranicza możliwości pomiarowe do wyznaczenia amplitudy pulsacji naprężeń i określenia ich częstotliwości. Stosowany jest głównie w badaniach wytrzymałościowych, jak również poza dziedziną wytrzymałości, jeżeli pomiary dotyczą wyłącznie określenia częstotliwości drgań.

Stosowanie czujników przemieszczeń /np. wymienionych w rozdziale II, typu OT, IWT, IWA, WWA itp./ do pomiaru ruchu drgającego jest możliwe wtedy, gdy w najbliższym otoczeniu obiektu drgającego znajduje się nieruchomy punkt odniesienia, do którego przytwierdzona jest ostoja czujnika. Jeżeli takiego punktu nie ma /np. przy badaniu pojazdów w ruchu lub przy pracy ciężkich maszyn, gdy drgania przenoszone są przez fundament/ muszą być stosowane czujniki inercyjne /sejsmiczne/. W tym przypadku czujnik mocowany jest bezpośrednio na obiekcie badanym, a układem odniesienia jest masa "m" połączona więzami sprężystymi z obudową czujnika. Model dynamiczny czujników inercyjnych wraz z podaniem podstawowych zależności opisano w punkcie 6.2 tego rozdziału. Z przeprowadzonej tam analizy wynika, że w zależności od doboru sztywności więzów sprężystych i wartości tłumienia, sygnał tych czujników może być proporcjonalny do różnych parametrów drgań. Wymienić tu należy następujące przypadki:

- gdy układ posiada stosunkowo dużą masę, wiotką sprężynę i słabe tłumienie - sygnał czujnika jest proporcjonalny do przemieszczenia,
- jeżeli masa jest mała, podwieszona na wiotkiej sprężynie, a układ jest silnie tłumiony - sygnał czujnika jest proporcjonalny do prędkości,
- w przypadku małej masy, sztywnej sprężyny i małego tłumienia sygnał jest proporcjonalny do przyspieszenia.

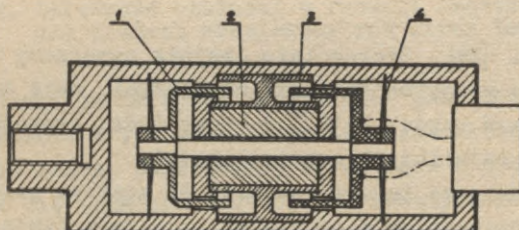


W czujnikach inercyjnych wykorzystywane są różne sposoby przetwarzania przemieszczenia masy sejsmicznej na sygnał elektryczny.

W przypadku pomiaru przemieszczeń ruchu drgającego stosowane są najczęściej inercyjne czujniki indukcyjne i potencjometryczne. Przykładowo wymienić tu można czujniki typu OT-07 produkcji Instytutu Lotnictwa, o zakresie mierzonych przemieszczeń  $\pm 2$  [mm], przy częstotliwościach w zakresie  $(4 \div 110)$  [Hz] oraz czujniki firmy Hottinger typu B 21, B 3, B 4.

Inercyjne czujniki prędkości są zwykle wykonywane w postaci indukcyjnych czujników elektrodynamicznych. W ten sposób wykonywane są m.in. czujniki serii DGA 101 produkcji NRD, których zakres częstotliwości pracy wynosi  $(5 \div 1000)$  [Hz] lub DGA 401 i 501 o zakresie częstotliwości pracy  $(10 \div 2000)$  [Hz].

W pokazanym na rys. IV-49 czujniku DGA 401 masę sejsmiczną stanowią dwie cewki z uzwojeniami i karkasami, zawieszzone na dwóch sprężynach membranowych. Cewka górna jest cewką pomiarową, cewka dolna zaś stanowi tłumienie. Uzwojenie cewki tłumiącej jest zwarte, wyindukowany w nim prąd wytwarza w niej strumień magnetyczny, który współdziałając z polem

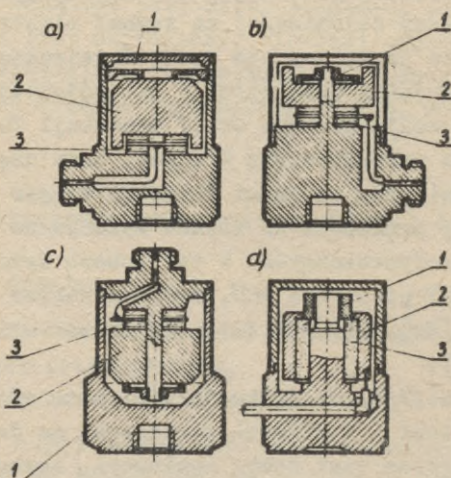


Rys. IV-49. Czujnik do pomiaru prędkości drgań typu DGA 401 firmy RPT :  
1 - cewka tłumiąca, 2 - magnes, 3 - cewka pomiarowa, 4 - sprężyna membranowa

magnesu stałego pociąga za sobą tłumienie drgań układu. Natomiast SEM otrzymana z cewki pomiarowej jest, jak wiadomo, proporcjonalna do prędkości w ruchu drgającym /rozdz. II/. W oparciu o te zasady pracują także zestawy firmowe PR 9265/9253 firmy Philips, pozwalające na pomiar parametrów drgań od częstotliwości  $(0,5 \div 1000)$  [Hz].

Do pomiaru przyspieszeń w ruchu drgającym stosowane są czujniki inercyjne: akcelerometry. W grupie tej znajdują się akcelerometry wyposażone w czujniki tensometryczne metalowe i półprzewodnikowe oraz czujniki piezoelektryczne. Przykładem akcelerometrów z czujnikami tensometrycznymi półprzewodnikowymi jest seria czujników BWH prod. NRD, seria SA, A, firmy Vibrometer. Spośród akcelerometrów z czujnikami piezokwarcowymi wymienić należy serię KD, KB prod. NRD, o dolnej granicy częstotliwości  $2,5$  [Hz] i  $5$  [Hz] lub czujniki firmy Bruel-Kjaer - rys. IV-50, pozwalające na pomiar od

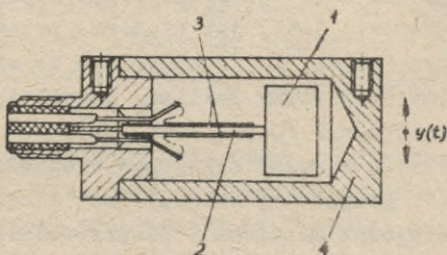




Rys.IV-50. Przekroje różnych rozwiązań konstrukcyjnych akcelerometrów firmy Brüel-Kjaer: 1 - sprężyna, 2 - masa sejsmiczna, 3 - piezoelement

dziesiątych części [Hz]. Szczególnie czujnik oznaczony 8603 charakteryzuje się wyjątkowo wysokimi walorami użytkowymi, daje bowiem możliwość pomiaru przyspieszeń rzędu  $2 \cdot 10^{-6} g$ , przy dużej czułości rzędu 10000 [pC/g] dla najniższych częstotliwości.

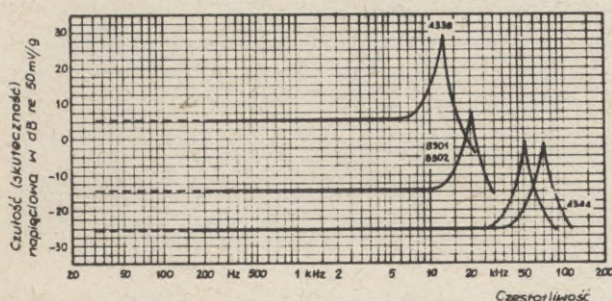
Na rys.IV-51 pokazano budowę czujnika do pomiaru przyspieszeń typu BWH... Elementem sprężystym w przypadku tego typu czujnika jest belka wysięgnikowa z naklejonymi tensometrami półprzewodnikowymi. Na swobodnym końcu tej belki umieszczona jest masa sejsmiczna. Tłumienie realizowane jest przez wypełnienie czujnika olejem o odpowiedniej lepkości.



Rys.IV-51. Akcelerometr tensometryczny typu BWH... firmy RFT : 1 - masa sejsmiczna, 2 - belka wysięgnikowa, 3 - tensometry półprzewodnikowe, 4 - obudowa



Przypomnieć należy, że proporcjonalność wyjściowego sygnału elektrycznego do przyspieszenia zachodzi w akcelerometrach przy częstotliwościach mierzonych, znajdujących się poniżej własnej częstotliwości rezonansowej czujnika. Zjawisko to zilustrowano na rys. IV-52, na którym przedstawiono zależność czułości w funkcji częstotliwości. Na uwagę zasługuje ponadto fakt, że uzyskanie wyższej częstotliwości rezonansowej dla danego czujnika pociąga za sobą zmniejszenie jego czułości.



Rys. IV-52. Zależność czułości w funkcji częstotliwości dla różnych akcelerometrów firmy Brüel-Kjaer

Czyli, innymi słowy, im mniejszy /fizycznie/ jest akcelerometr, tym mniejsza jego czułość i tym samym większa częstotliwość rezonansowa.

Na zakończenie należy podkreślić, że obecnie w technice pomiarowej drgań zarysowała się wyraźna tendencja do zastąpienia czujników przemieszczeń i prędkości akcelerometrami przy jednoczesnym zachowaniu istniejącego elektrycznego systemu wzmacnienia i pomiaru. Sprzyjają temu następujące fakty: produkowane akcelerometry mogą być gabarytowo mniejsze niż czujniki prędkości oraz mają szerszy użyteczny zakres pomiarowy. W przypadku, gdy pożądana jest ze strony pomiarowej znajomość prędkości czy przemieszczenia ruchu drgającego, wielkości te są łatwo osiągalne za pomocą specjalnych elektronicznych wzmacniaczy całkujących.

## 7. P o m i a r   c i ś n i e n i a

Pomiar ciśnienia sprowadza się do określenia wartości ciśnienia statycznego  $p$ , ciśnienia dynamicznego  $p_d$  lub całkowitego  $p_c$ .

Ciśnienie statyczne  $p$  jest to ciśnienie medium znajdującego się w spoczynku lub w ruchu, przy spełnianiu warunku, że prędkość przepływu nie wpływa na wartość mierzonego ciśnienia.

Ciśnieniem dynamicznym nazywa się przyrost ciśnienia pod wpływem zmiany prędkości ruchu cieczy.



Ciśnienie całkowite jest natomiast sumą ciśnienia statycznego i dynamicznego

$$p + p_d = p_c$$

Do pomiaru ciśnienia stosowane są przyrządy zwane ciśnieniomierzami lub manometrami. Dominującą grupą jest tu grupa przyrządów nieelektrycznych.

Często nazwa manometr ma węższe znaczenie, oznacza bowiem przyrząd do pomiaru wyłącznie ciśnienia w odróżnieniu od przyrządu do pomiaru podciśnienia - wakuometru /próżniomierza/. Według zasady działania manometry podzielić można na:

- hydrostatyczne, w których pomiar realizowany jest w oparciu o pomiar wysokości  $h$  i znany ciężar właściwy  $\gamma$  cieczy;  $p = h \cdot \gamma$ ;
- obciążeniowe, czyli manometry, w których ciśnienie mierzone jest poprzez określenie siły  $F$  potrzebnej do zrównoważenia ciśnienia przy znanej i stałej powierzchni  $S$ ;  $p = F/S$  /np. manometry tłokowe/;
- sprężynowe /prężne/, np. z rurką Bourdona, które mierzą ciśnienie na zasadzie pomiaru odkształcenia sprężystego, wywołanego mierzoną ciśnieniem;
- elektryczne manometry, które mierzą ciśnienie jako funkcję parametrów elektrycznych.

Pierwsze dwie grupy manometrów, tzn. manometry hydrostatyczne i obciążeniowe są przyrządami bezpośrednimi, ponieważ mogą być wzorcowane bez pomocy innych urządzeń. Natomiast zarówno manometry sprężynowe jak i elektryczne wymagają wzorcowania /cechowania/. Wzorcuje się je w jednostkach ciśnienia metodą porównawczą, tzn. przez porównanie ich wskazań ze wskazaniami manometrów bezpośrednich.

W tablicy XIII zestawiono ważniejsze typy manometrów z podaniem ich zakresów pomiarowych. Jednakże w opracowaniu tym bliżej omówione zostaną jedynie te typy manometrów, które znajdują zastosowanie w pomiarach MRC. Wymienić tu należy przede wszystkim manometry sprężynowe z rurką Bourdona lub przeponą, oraz różnego rodzaju manometry elektryczne, jak również manometry tłokowe, służące głównie do wzorcowania wyżej wymienionych.



Tablica XII

| L.p. |                | Nazwa manometru                                     | Zakres pomiarowy<br>$\text{MN/m}^2$          | Najwyższa dokładność | Własności                                                                                          |
|------|----------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Hydrostatyczne | Rurka U                                             | $0 \div 0,3$                                 | 0,5 %                | prosta budowa                                                                                      |
| 2    |                | Manometr szeregowy /kaskadowy/ Mendelejewa          | ograniczony wytrzymałością rurek $0 \div 10$ | 0,2 %                | trudność uszczelniania                                                                             |
| 3    |                | Manometr pochylny                                   | $0 \div 0,01$<br>$p_{st} < 0,05$             | 0,2 %                | duża czułość                                                                                       |
| 4    |                | Manometr pływakowy /Betza, Kinga/                   | $-0,06 \div +1$                              | 1 %                  | zakresy pomiarowe zależne od wypełniającej cieczy                                                  |
| 5    |                | Manometr Prandtla                                   | $0 \div 0,03$                                | 0,2 %                | niewrażliwy na pochylenie                                                                          |
| 6    |                | Manometr z niezmiennym pochyleniem Kralla           | $0 \div 0,1$<br>$p_{st} < 0,05$              | 1 %                  | zależność od ustawienia                                                                            |
| 7    |                | Manometry kompensacyjne Casella, Askania, Choltocka | $0 \div 0,1$                                 | 0,1 %                | do pomiaru ciśnień statycznych                                                                     |
| 8    | Obciążeniowe   | Manometry tłokowe                                   | $0 \div 100$                                 | 0,1 %                | stosowane głównie do wzorcowania                                                                   |
| 9    |                | Manometry dzwonowe                                  | $-0,1 \div +0,02$                            | $0,2 \div 0,5$ %     | stosowane do pomiaru różnicy ciśnień i jako przyrządy wzorcowe                                     |
| 10   |                | Manometry /wagi/ pierścieniowe                      | $0 \div 0,2$                                 | 1 %                  | stosowane głównie do pomiaru różnicy ciśnień                                                       |
| 11   | Sprężynowe     | Manometry puszkowe                                  | $-0,6 \div +0,6$                             | 1 %                  | wysoka czułość                                                                                     |
| 12   |                | Manometry przeponowe                                | $-0,1 \div +2,5$                             | 1,5 %                | typ przepony dobierany w zależności od rodzaju czynnika                                            |
| 13   |                | Manometry z rurką Bourdona                          | $-0,1 \div 1000$                             | $0,5 \div 5$ %       | najczęściej spotykane ze względu na dużą uniwersalność powyżej $10 \text{ MN/m}^2$ - rurki stalowe |
| 14   | Elektryczne    | Manometry tensometryczne                            | $0 \div 100$                                 | $0,5 \div 1,5$ %     | do pomiarów statycznych i dynamicznych w zakresie do 1 kHz                                         |
| 15   |                | Manometry indukcyjne                                | $0 \div 100$                                 | $0,5 \div 1,5$ %     | dogodne w trudnych warunkach pomiarowych, pomiaru statyczne i dynamiczne                           |
| 16   |                | Manometry piezoelektryczne                          | $0 \div 50$                                  | $0,5 \div 1$ %       | do indykacji, przebiegów dynamicz. ok. 50 kHz                                                      |
| 17   |                | Manometry pojemnościowe                             | $-0,1 \div +10$                              | $0,5 \div 1$ %       | duża czułość, dogodne do pomiarów b.mających $\Delta p$                                            |



### 7.1. Manometry sprężynowe

Manometry sprężynowe używane są do pomiaru podciśnienia i ciśnienia i to zarówno gazów, jak i cieczy. Wykonywane są zatem jako manometry, wakuometry lub manowakuometry czyli przyrządy, których zakres pomiarowy leży powyżej i poniżej ciśnienia atmosferycznego.

Cechą charakterystyczną wszystkich manometrów sprężynowych jest to, że mierzą one zawsze różnicę między ciśnieniem panującym w naczyniu  $p_a$  a ciśnieniem otoczenia  $p_o$ . Zatem wartość mierzonego ciśnienia  $p$  wyraża się związkiem:

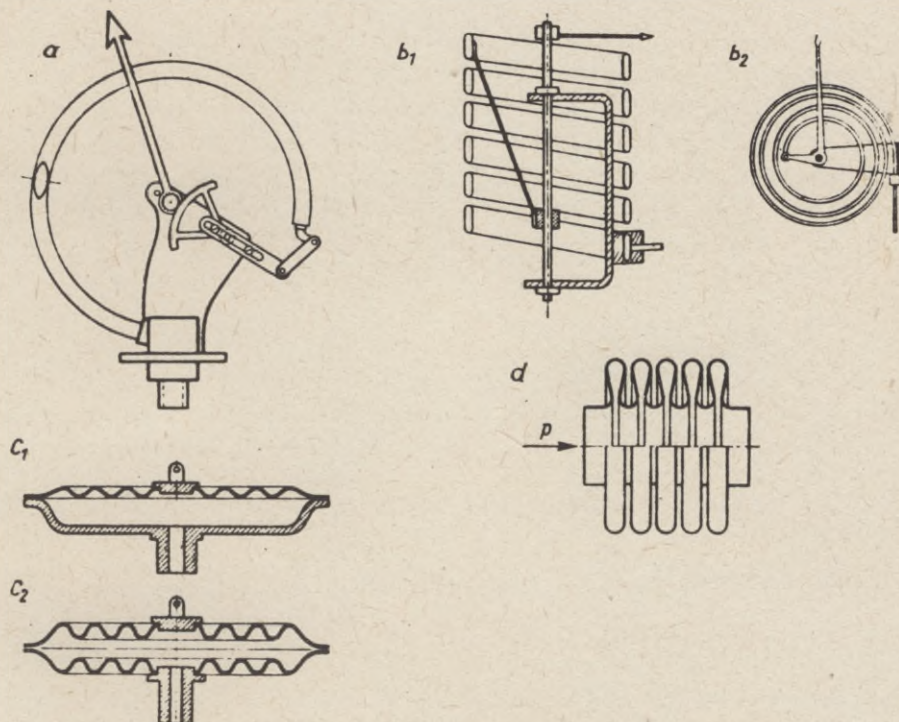
$$p = p_a - p_o$$

Zasada działania tych manometrów polega na wykorzystaniu związku, jaki zachodzi między odkształceniem sprężystym elementu pomiarowego a ciśnieniem wywołującym to odkształcenie.

Elementami pomiarowymi są tu różnego rodzaju naczynia wykonane ze sprężystego materiału o kształtach tak dobranych, aby uzyskać możliwie ściśle liniową zależność między mierzoną zmianą ciśnienia a odkształceniem  $s$ .

Na rys.IV-53 zestawiono kształty typowych manometrycznych elementów sprężystych. W oparciu o te elementy wykonane są dwie odmiany manometrów sprężynowych: przeponowe /membranowe/ i rurkowe. O dokładności manometrów sprężynowych decyduje w głównej mierze zjawisko histerezy sprężystej, które powoduje opóźnienie wskazań zależnie od wartości poprzednio mierzonego ciśnienia. Przykładowo na manometrze, który znajdował się początkowo pod ciśnieniem  $2 \text{ [MN/m}^2\text{]}; (\sim 20 \text{ [kg/cm}^2\text{]})$ , przy zmianie ciśnienia na  $1,0 \text{ [MN/m}^2\text{]}; (\sim 10 \text{ [kg/cm}^2\text{]})$ , odczytywane ciśnienie jest nieco większe i wynosi  $1,02 \text{ [MN/m}^2\text{]}; (\sim 10,2 \text{ [kg/cm}^2\text{]})$ . Przy wzroście ciśnienia od 0 do  $1 \text{ [MN/m}^2\text{]}; (\sim 10 \text{ [kg/cm}^2\text{]})$  odczytywane ciśnienie jest nieco mniejsze i może wynosić np.  $0,97 \text{ [MN/m}^2\text{]}; (\sim 9,7 \text{ [kg/cm}^2\text{]})$ . Zjawisko to zależne jest od wielu czynników, a w szczególności od właściwości i technologii obróbki materiału, z którego wykonany jest element pomiarowy oraz jego stanów naprężenia, jak również temperatury pracy. Błąd histerezy, wynikający ze stanu naprężenia w elemencie pomiarowym można ograniczyć, stosując manometry o zwiększonym zakresie pomiarowym w stosunku do średniego ciśnienia mierzonego. Wpływ pozostałych czynników eliminowany jest w znacznym stopniu przez staranny dobór materiałów i technologii wykonania. Przy pomiarach ciśnień wolnozmiennych i pracy ciągłej wykorzystuje się 2/3 zakresu pracy, a przy szybkich zmianach ciśnienia 1/2 zakresu.





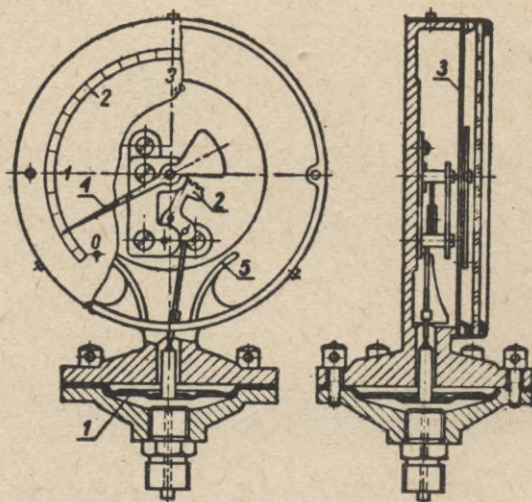
Rys.IV-53. Kształty manometrycznych elementów sprężystych:  
a/ rurka Bourdona, b<sub>1</sub>/, b<sub>2</sub>/ rurki wielokrotne,  
c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>/ przepony, d/ miśszek

Ciśnieniomierze z elementami sprężystymi objęte są polską normą PN-66/M-53500, która określa właściwości miernicze, wymagania eksploatacyjne, wymiary oraz zakresy pomiarowe i klasy dokładności produkowanych przyrządów.

#### 7.1.1. Manometry przeponowe

W manometrach przeponowych ciśnienie działa na sprężystą przeponę, której odkształcenie /ugięcie/ stanowi miarę ciśnienia mierzonego. Przepona jest zwykle koncentrycznie pofalowana. Niekiedy w celu zwiększenia czułości stosuje się puszki przeponowe w postaci dwóch przepon połączonych wzdłuż obwodu /rys.IV-53c<sub>2</sub>/. Odszeiśnienie środka przepony jest przekazywane za pośrednictwem układu dźwigni i przekładni zębatej na wskazówkę, której wychylenie wskazuje mierzoną wartość ciśnienia. Rys.IV-54 przedstawia konstrukcję typowego manometru przeponowego.





Rys.IV-54. Budowa manometru przeponowego: 1 - przepona, 2 - zębatka, 3 - skala, 4 - wskazówka

Manometry przeponowe stosowane są do pomiarów w niskich zakresach ciśnień w granicach  $(-0,1 \div +2,5) [\text{MN/m}^2]$ ;  $(-1 \div 25) [\text{kg/cm}^2]$ . Wykonywane są w różnych klasach dokładności nie przekraczających na ogół kl. 1,5.

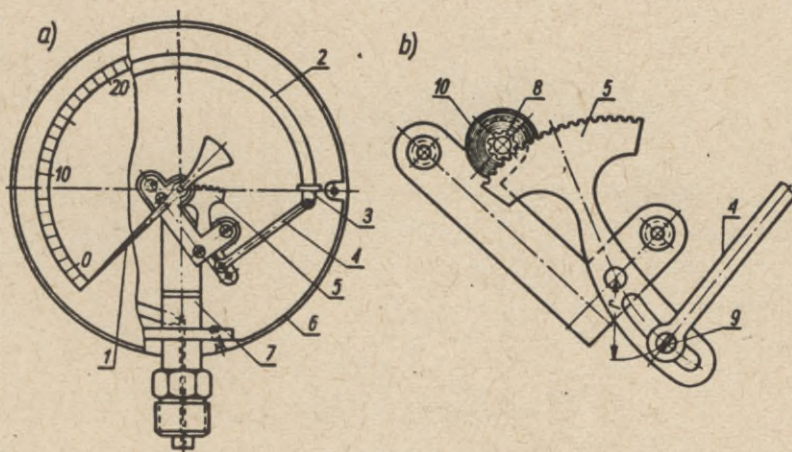
Przy określaniu typu manometru przeponowego konieczna jest znajomość rodzaju ośrodka pomiarowego i jego aktywność - czynnik ten bowiem decyduje o rodzaju stosowanej przepony /membrany/.

#### 7.1.2. Manometry rurkowe /Bourdona/

Manometry z rurką Bourdona należą do najbardziej uniwersalnych i najczęściej stosowanych przyrządów do pomiaru ciśnienia. Elementem pomiarowym jest rurka Bourdona wykonana ze sprężystego materiału /brązu lub stali/. Ma ona postać niepełnej obręczy o przekroju owalnym, zamocowanej jednym końcem, podczas gdy drugi jej koniec jest zaślepiony i może się swobodnie przemieszczać. Rurka pod działaniem doprowadzonego do jej wnętrza medium pod ciśnieniem odkształca się sprężystością /rozprostowuje lub skręca w przypadku podciśnienia/ - rys.IV-55.

Dobór materiału i geometria elementu pomiarowego rurki musi zapewniać zarówno prostowodność, jak i proporcjonalność wychyleń swobodnego końca rurki. Nie bez znaczenia jest także sama technologia jej wykonania.





Rys.IV-55. Budowa manometru sprężystego z rurką Bourdona:

a/ 1 - wskazówka, 2 - rurka Bourdona, 3, 4, 5 - elementy przekładni, 6 - obudowa, 7 - króciec

b - budowa przekładni: 8 - koło zębate, 9 - wkręt ustalający, 10 - sprężyna

Rurki manometryczne wleci się z pełnego materiału, szlifuje i na gorąco nadaje się im przekrój owalny oraz zgina, ponadto poddaje się je sztucznemu starzeniu. Materiałem używanym do produkcji wyż.wym. elementu, przy ciśnieniach do  $10 \text{ [MN/m}^2\text{]}$  ( $100 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ ) są mosiądz, brąz fosforowy i brąz berylowy, a w przypadku ośrodków aktywnych i ciśnień wyższych stale stopowe. Stosowane rzadziej specjalne odmiany konstrukcyjne manometrów rurkowych mogą mieć albo rurki spiralne, dające duże przesunięcie końca pomiarowego, albo rurki śrubowe, stosowane do wysokich ciśnień. Zakres pomiarowy manometrów z rurką Bourdona jest bardzo szeroki i wynosi:

- dla brązu  $(-0,1 \div 0) \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ;  $((-1 \div 0) \text{ [kg/cm}^2\text{]})$   
 $(0 \div 0,06) \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ;  $((0 \div 0,6) \text{ [kg/cm}^2\text{]})/\text{min/}$   
 $(0 \div 10) \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ;  $((0 \div 100) \text{ [kg/cm}^2\text{]})/\text{max/}$
- dla stali  $(0 \div 400) \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ;  $((0 \div 4000) \text{ [kg/cm}^2\text{]})/\text{max/}$

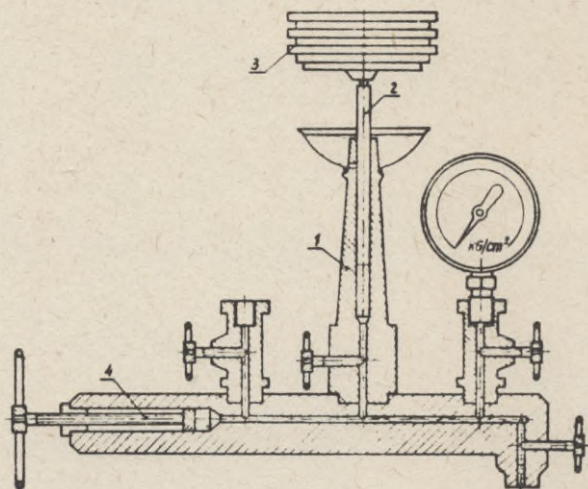
Klasa dokładności tych przyrządów w zależności od wersji konstrukcyjnej zawarta jest w granicach od kl. 0,6 do kl. 4.



## 7.2. Manometry tłokowe

Manometry tłokowe należą do grupy przyrządów bezpośrednich i wyróżniają się wysoką dokładnością i czułością. Własności te zadecydowały, że stosowane są głównie do cechowania innych manometrów.

Zasada działania tych manometrów jest następująca. Na tłok /rys.IV-56/ w pionowym cylindrze (1) działają z jednej strony siły ciężkości tłoka (2) i obciążników (3), a z drugiej strony siły parcia cieczy. Do wytworzenia pod tłokiem ciśnienia cieczy  $p$  służy ręczna pompka tłokowa(4).



Rys.IV-56. Budowa manometru tłokowego: 1 - cylinder, 2 - tłok, 3 - obciążniki, 4 - pompka tłokowa

W chwili gdy te dwie siły są równe, tłok znajduje się w równowadze a wartość mierzonego ciśnienia wynosi:

$$p = \frac{\sum m \cdot g}{S} + p_a \quad (47)$$

gdzie:

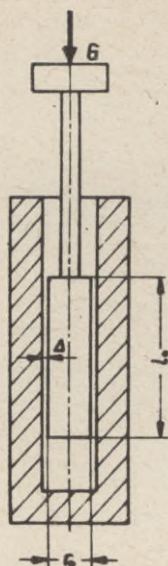
$\sum m$  - suma mas tłoka i odważników,

$g$  - lokalna wartość przyspieszenia ziemskiego,

$S$  - pole powierzchni tłoka,

$p_a$  - ciśnienie barometryczne /przy wzorcowaniu manometrów w jednostkach nadciśnienia  $p_a$  jest pomijane/.





Wzór ten jest słuszny, gdy siły tarcia działające na tłok podczas jego ruchu w cylindrze mogą być pominięte. W celu zmniejszenia siły tarcia między tłokiem a cylindrem zachowuje się niewielką szczelinę na film olejowy, a sam tłok wraz z odważnikami wprowadza się w ruch obrotowy /rys.IV-57/. Między tłokiem a cylindrem wystąpi wtedy tarcie płynne, które wyrazi się wzorem:

$$T = p \pi r_0 \Delta \quad (48)$$

gdzie:

- $r_0$  - promień tłoka,
- $\Delta$  - szerokość szczeliny,
- $p$  - ciśnienie
- $l_0$  - wysokość tłoka

Rys.IV-57. Przekrój cylindra manometru tłokowego

Uwzględniając to, otrzymujemy:

$$p = \frac{\sum m \cdot g - T}{S} = \frac{m \cdot g}{S + \pi r_0 \Delta} \quad (49)$$

Z ostatniego wzoru wynika, że przekrój tłoka, na który działa ciśnienie /przekrój efektywny/, jest większy od przekroju rzeczywistego o wartość równą połowie przekroju poprzecznego szczeliny. Szerokość szczeliny  $\Delta$  określana jest przez uzależnienie jej od wymaganej prędkości opuszczania tłoka  $v$  i lepkości dynamicznej oleju  $\mu$

$$v = p \frac{\Delta^3}{6 \mu r_0 l_0} \quad (50)$$

W oparciu o podane zasady wykonywane są przyrządy dla różnych zakresów pomiarowych, nie przekraczających jednak  $100 \text{ [MN/m}^2\text{]} (=1000 \text{ [kg/cm}^2\text{]})$  przy uzyskiwanej klasie dokładności  $(0,05 \pm 0,2)$ .



### 7.3. Manometry elektryczne

Rozwój napędów i sterowań hydraulicznych oraz pneumatycznych narzucił konieczność podjęcia szerokich badań tych układów, ze szczególnym uwzględnieniem występujących w czasie ich pracy zjawisk dynamicznych. Dla tych celów opracowano szereg manometrów elektrycznych, działających na zasadzie bezpośredniego lub pośredniego przekształcenia ciśnienia mierzonego na dowolną wielkość elektryczną. Stosowanie klasycznych przyrządów pomiarowych /np. manometrów z rurką Bourdona/ do badań dynamicznych jest niemożliwe, ponieważ górna granica przenoszonych przez nie częstotliwości jest niska i nie przekracza na ogół 5 [Hz]. Przebiegi występujące w hydraulicznych układach maszyn roboczych /żurawie, koparki itp./ mogą osiągać częstotliwość powyżej 1 [kHz]. Możliwość pomiaru rejestracji i analizy tak szybkich przebiegów stwarza jedynie aparatura oparta na elektrycznym systemie pomiaru i przetwarzania sygnału. Największe zastosowanie znajdują tu zestawy pomiarowe wyposażone w czujniki:

- tensometryczne,
- indukcyjne,
- piezoelektryczne,
- pojemnościowe.

Głównymi czynnikami decydującymi o wyborze metody pomiarowej oraz rodzaju czujnika są: wartość i częstotliwość mierzonego ciśnienia oraz warunki i wymagana dokładność pomiaru.

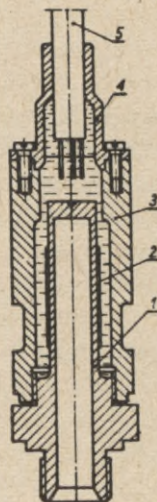
#### 7.3.1. Manometry tensometryczne

Pod pojęciem manometru tensometrycznego należy rozumieć czujnik tensometryczny ciśnienia w zestawieniu z /tensometryczną/ aparaturą wzmacniającą - rejestrującą.

Spośród wielu rozwiązań tensometrycznych czujników ciśnienia najczęściej stosowane są czujniki z cylindrycznym naczyniem cienkościennym. Konstrukcję takiego czujnika przedstawia rys.IV-58. Zasadniczą jego częścią jest element sprężysty (1), tworzący wraz z końcówką gwintowaną korpus czujnika. Na elemencie sprężystym naklejone są tensometry (2). Osłona (3) chroni tensometry przed uszkodzeniami mechanicznymi, natomiast w kołpaku (4) osadzony jest przewód elektryczny (5), łączący czujnik z aparaturą tensometryczną. Tensometry naklejone na elemencie sprężystym tworzą układ "półmostka lub pełnego mostka". Tensometry czynne



naklejone są w kierunku obwodowym, a kompensujące w kierunku wzdłużnym. Ortogonalne naklejenie tensometrów powoduje wprowadzić utratę części sygnału pomiarowego, lecz zapewnia dobrą kompensację temperaturową czujnika. Niekiedy, w celu wyeliminowania mogących występować gradientów temperatury w obrębie czujnika, przestrzeń między elementem sprężystym a osłoną wypełniana jest olejem transformatorowym. Czujniki tego typu budowane są dla różnych zakresów pomiarowych. Zakres pomiarowy decyduje o grubości ścianki elementu sprężystego. Korzystając ze znanych zależności na odkształcenie  $\varepsilon$  dla cylindrycznego naczynia cienkościennego, poddanego wewnątrz ciśnieniu, można zapisać:



Rys. IV-58. Czujnik ciśnieniowy oparty na naczyniu cylindrycznym: 1 - element sprężysty /cylindryczny/, 2 - tensometry, 3 - osłona, 4 - kołpak, 5 - przewód elektryczny

- dla odkształceń obwodowych

$$\varepsilon_{\text{obw}} = \frac{p \cdot D}{2 \delta E} \left( 1 - \frac{1}{2} \nu \right) \approx 0,42 \frac{pD}{\delta E} \quad (51)$$

- dla odkształceń wzdłużnych

$$\varepsilon_{\text{wzd}} = \frac{pD}{2 \delta E} \left( \frac{1}{2} - \nu \right) \approx 0,1 \frac{pD}{\delta E} \quad (52)$$

gdzie:

$p$  - ciśnienie,

$D$  - średnica zewnętrzna naczynia cienkościennego,

$\delta$  - grubość ścianki naczynia cienkościennego,

$E$  - moduł Younga,

$\nu$  - stała Poissona /  $\nu = 0,3$  dla najczęściej stosowanych materiałów/.



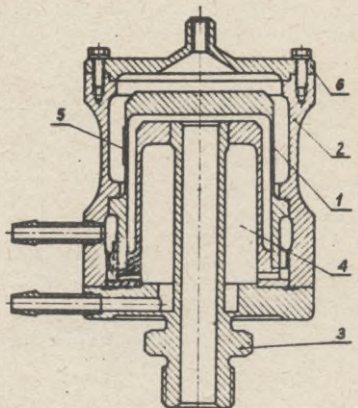
W przypadku tensometrów naklejonych ortogonalnie i połączonych w układ "półmostka" sygnał wyjściowy  $\varepsilon_{wyj}$  jest równy różnicy  $\varepsilon_{obw} - \varepsilon_{wzd}$  /rozdz.II/, zatem:

$$\varepsilon_{wyj} \approx 0,3 \frac{p \cdot D}{\delta \cdot E} \quad (53)$$

Dla "pełnego mostka" sygnał pomiarowy jest dwukrotnie większy. Podana zależność wiąże wymiary geometryczne sprężystego elementu pomiarowego  $D$  i  $\delta$  / z parametrami jego pracy  $p_{nom}$ ,  $\varepsilon_{wyj}$  / oraz właściwościami materiału, z którego został wykonany  $E$ .

Aby zapewnić optymalne warunki pracy tensometrycznej aparatury pomiarowej, wielkość sygnału wyjściowego powinna wynosić  $\varepsilon_{wyj} > 0,5 \%$ . Warunek ten, wobec trudności wykonania ścianki elementu sprężystego o grubości mniejszej od  $0,1$  [mm], ogranicza możliwość zastosowania tych czujników do pomiaru ciśnienia poniżej  $0,5$  [MN/m<sup>2</sup>];  $/5$  [kG/cm<sup>2</sup>]/.

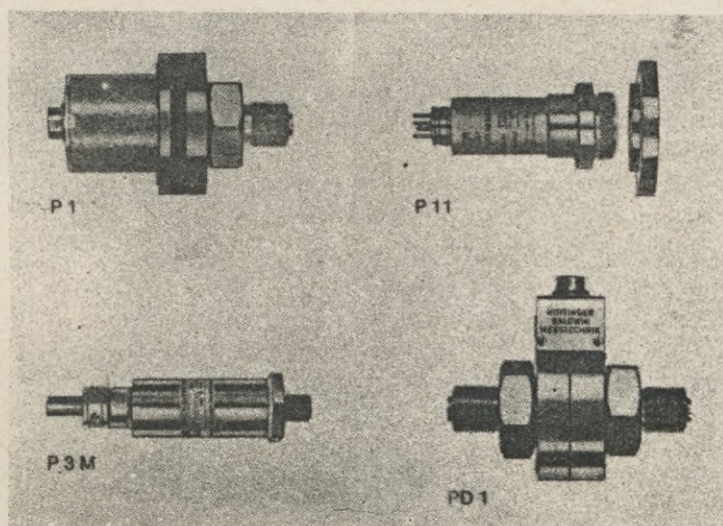
Do pomiarów małych ciśnień ( $0 \div 0,5$ ) [MN/m<sup>2</sup>]; ( $\sim 0 \div 5$ ) [kG/cm<sup>2</sup>] stosowane są rozwiązania konstrukcyjne, w których jako elementy sprężyste wykorzystywane są membrany lub belki zginane. W przypadku pomiaru ciśnienia czynnika o temperaturze wyższej niż  $120$  [°C] stosować należy czujniki chłodzone strumieniem wodnym. Przykład takiego czujnika pokazano na rys.IV-59.



Rys.IV-59. Konstrukcja chłodzonego czujnika ciśnienia o zakresie pomiarowym ( $0 \div 10$ ) [MN/m<sup>2</sup>]; 1 - element sprężysty, 2 - korpus, 3 - dolna pokrywa, 4 - komora wodna, 5 - tensometry, 6 - górna pokrywa



W Laboratorium MRC Politechniki Krakowskiej do pomiarów ciśnienia w układach hydrauliki siłowej stosuje się czujniki z cylindrycznym elementem sprężystym /własnej produkcji/. W laboratoriach badawczych często spotykane są czujniki serii CT prod. krajowej oraz czujniki ciśnienia serii PT i PTC firmy Vibrometer i P1, PD1 firmy Hottinger, odznaczające się wysokimi walorami eksploatacyjnymi. Na rys.IV-60 pokazano wygląd typowych czujników do pomiarów ciśnienia wykonanych przez firmę Hottinger.



Rys.IV-60. Czujniki do pomiaru ciśnienia firmy Hottinger /wygląd zewnętrzny/

### 7.3.2. Manometry piezoelektryczne

Zasada działania manometrów piezoelektrycznych polega na wykorzystaniu zjawiska piezoelektrycznego, wyjaśnionego w rozdz.II. Znikoma inercyjność /ładunki powstają natychmiast po przyłożeniu obciążenia/ czujników piezoelektrycznych czyni z tego rodzaju manometrów niezastąpione przyrządy w pomiarach i badaniach procesów szybkozmiennych, związanych ze zmianami ciśnienia. Konieczność tego typu pomiarów występuje przy badaniach stanów nieustalonych, uderzeń czy też zjawisk kawitacji w układach hydraulicznych lub pneumatycznych. Na rys.IV-61 pokazano roz-



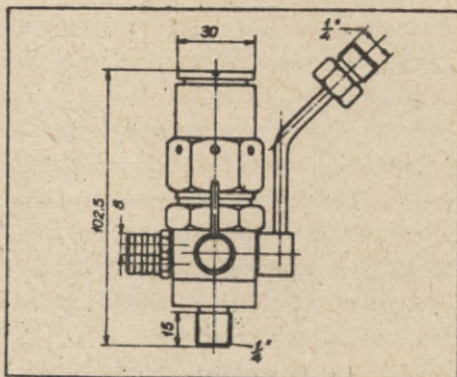
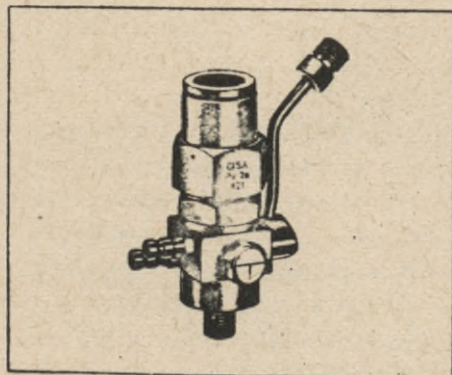


wiązanie konstrukcyjne czujnika o pomiaru ciśnienia w zakresie  $(0 \div 15) [\text{MN/m}^2]$ ;  $(\sim 0 \div 150) [\text{kg/cm}^2]$  o maksymalnej częstotliwości pracy do  $30 [\text{kHz}]$ . Ze względu na specjalne wymagania dotyczące zarówno aparatury i sprzętu towarzyszącego, jak i obsługi manometry piezoelektryczne stosuje się tylko w uzasadnionych przypadkach.

Rys. IV-61. Czujnik piezoelektryczny do pomiaru ciśnienia /chłodzony/: 1 - piezoelement, 2 - elementy pośredniczące, 3 - osłona, 4 - uszczelnienie, 5 - końcówka pomiarowa, 6 - izolator, 7 - końcówki do obiegu chłodzącego

### 7.3.3. Manometry pojemnościowe

W manometrach tych wykorzystywane są czujniki pojemnościowe w wersji przystosowanej do pomiaru ciśnień. Zasada działania tych czujników opisana została w rozdz. II tego opracowania. Z grupy czujników pojemnościowych do pomiaru ciśnienia stosowane są najczęściej czujniki o zmiennej odległości pomiędzy okładkami kondensatora. Współpracują one najczęściej z pomiarowymi przyrządami rezonansowymi o dużej czułości.



Rys. IV-62. Pojemnościowy czujnik ciśnienia firmy DISA, typ Pu2a/421 /wygląd zewnętrzny - wymiarowy/



Na rys. IV-62 przedstawiono pojemnościowy czujnik ciśnienia firmy Disa /Dania/ typ Pu2a/421. Membrana tego czujnika /wykonana z brązu terylowego/ stanowi jedną okładkę kondensatora mierniczego, drugą okładką jest elektroda umieszczona w korpusie czujnika, odizolowana od niego elektrycznie tulejką ceramiczną o bardzo wysokiej dobroci izolacji  $/R > 10 [M\Omega]/$ . Poprzez odpowiedni dobór wymiarów membrany można uzyskać czujniki przystosowane do różnych zakresów pomiarowych.

Na wskazania manometrów pojemnościowych duży wpływ ma temperatura otoczenia i temperatura czynnika mierzzonego. Wpływy te są niekiedy nie tylko trudne do skompensowania, ale nawet trudne do określenia w całym zakresie pomiarowym, z tego to względu w pomiarach prowadzonych przez Laboratorium MRC nie są stosowane.

Wspomnieć jednak należy, że manometry pojemnościowe są szczególnie dogodnie do pomiarów bardzo małych różnic ciśnień nawet rzędu  $10 [N/m^2]$  /czujniki różnicowe, trójelektrodowe/ przy częstotliwości mierzonych przebiegów w zakresie do  $1 [kHz]$ . Omawiany czujnik nadaje się szczególnie do pomiaru ciśnienia mediów niepolarnych, tj. złożonych z cząsteczek o momencie elektrycznym równym zero.

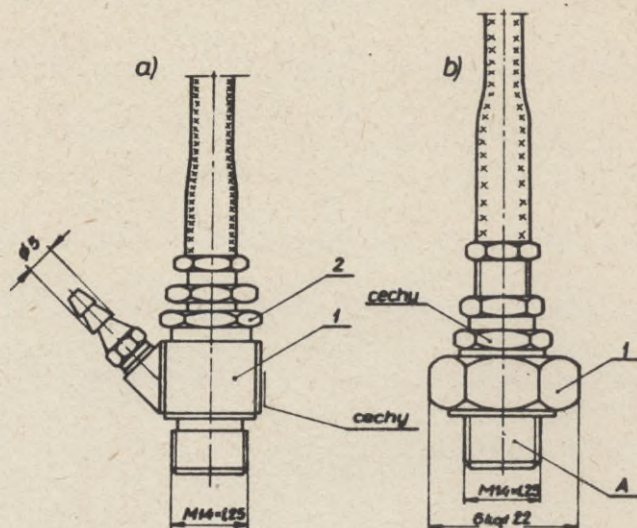
#### 7.3.4. Manometry indukcyjne

W manometrach indukcyjnych wykorzystywane są różnego rodzaju elementy sprężyste, współpracujące z indukcyjnymi czujnikami przemieszczeń. Zmiana położenia elementu sprężystego pod wpływem sygnału pomiarowego za pośrednictwem tych czujników przekazywana jest do odpowiedniej aparatury wzmacniająco - rejestrującej. O dokładności, czułości i przydatności do pomiarów dynamicznych manometrów indukcyjnych decyduje przede wszystkim rodzaj stosowanego w nich elementu sprężystego.

W manometrach tych stosowane są różne typy czujników indukcyjnych. Na rynku krajowym dostępne są indukcyjne czujniki ciśnień typu OT, produkcji Instytutu Lotnictwa /patent PRL nr 51289/ - rys. IV-63. Są to czujniki bierne, których działanie opiera się na zasadzie transformatora różnicowego. Ugięcie membrany wywołane ciśnieniem powoduje przesunięcie rdzenia ferromagnetycznego wewnątrz uzwojeń symetrycznego transformatora, co powoduje pojawienie się napięcia na uzwojeniu o fazie zależnej od kierunku przesunięcia rdzenia.

Czujniki OT służą do pomiaru ciśnień statycznych i dynamicznych cieczy i gazów w zakresie  $(0 \div 60) [MN/m^2]$ ;  $(\sim 0 \div 6000) [kg/cm^2]$ . Współpracują one z uniwersalną aparaturą do pomiaru wielkości mechanicznych typu N 101 prod. ELPO. Dopuszczalny zakres temperatury pracy wynosi  $(-20 \div +60) [^\circ C]$





Rys. IV-63. Indukcyjne czujniki ciśnienia typu OT... prod. Instytutu Lotnictwa: 1 - korpus, 2 - nakrętka regulująca: a/ chłodzony, b/ bez chłodzenia

a zakres częstotliwości  $(0 \div 1) [\text{kHz}]$ . Zastosowanie tych czujników przy pomiarach MRC uzasadnione jest przydatnością do pracy w wyjątkowo trudnych warunkach eksploatacyjnych /odporność na uderzenia, zapylenie/. Dane techniczne indukcyjnego czujnika ciśnienia typu OT /według producenta/ odpowiadają zakresom czułości i dokładności czujników produkcji takich firm zagranicznych, jak Hottinger, Kistler i Vibrometer.

#### 7.4. Manometry różnicowe

W badaniach hydraulicznych i pneumatycznych układów napędowych MRC jednym z ważniejszych zadań pomiarowych jest określenie występujących strat ciśnieniowych /spadków ciśnienia/. Wartość strat ciśnieniowych występujących na danym elemencie lub w badanej części układu jest miarą jego dobroci i przydatności do pracy w założonych warunkach eksploatacyjnych. Wspomniany spadek ciśnienia jest z reguły bardzo mały w stosunku do ciśnienia pracy układu, dlatego też zastosowanie do pomiarów dwu manometrów /nawet o bardzo wysokiej klasie/ nie daje możliwości określenia szukanej różnicy ciśnienia z zadowalającą dokładnością.

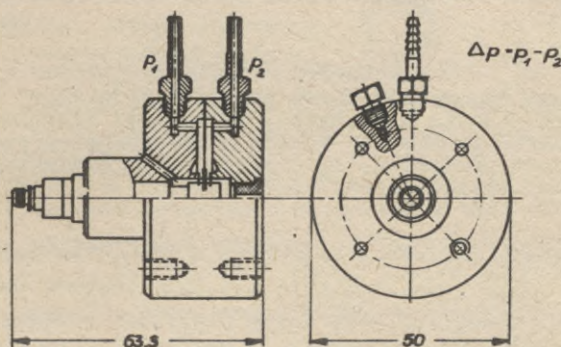


Przykładowo ciśnienie w układzie hydraulicznym wynosi  $16 \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ; ( $\sim 160 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ ), a przewidywany spadek ciśnienia na elemencie badanym, np. filtrze jest rzędu  $0,2 \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ; ( $\sim 2 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ ). W celu zmierzenia tego spadku przy zastosowaniu dwóch manometrów o zakresie pomiarowym  $20 \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ; ( $200 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$ ) i klasie  $0,5$  - niepewność wskazań każdego z manometrów wyniesie  $0,1 \text{ [MN/m}^2\text{]}$ , a więc różnica wskazań manometrów, wynikająca z ich klasy dokładności, będzie tego samego rzędu co przewidywany spadek ciśnienia na elemencie badanym. Dyskwalifikuje to w sposób oczywisty tę metodę pomiaru.

Zarówno w opisanym tu przykładzie, jak również w wielu innych przypadkach pomiarowych sprowadzających się do określenia różnicy ciśnień występującej między dwoma punktami układu, lub dwoma ośrodkami znajdującymi się pod znacznym ciśnieniem w stosunku do szukanej różnicy ciśnień, stosować należy manometry różnicowe.

Zasada działania manometrów różnicowych polega na ciągłym porównywaniu różnicy ciśnień w dwóch naczyniach pomiarowych, przy wykorzystaniu membrany lub cieczy manometrycznej jako elastycznej przegrody. Zmiana położenia membrany lub poziomu cieczy manometrycznej jest miarą mierzonej różnicy ciśnienia.

Manometry cieczowe mają ograniczone zastosowanie ze względu na możliwość przedostawania się cieczy manometrycznej /rtęci/ do ośrodka pomiarowego, jak również nie mogą być stosowane w warunkach zmiennego przyspieszenia. Z tych to względów w badaniach MRC stosowane są głównie manometry różnicowe w wersji membranowej. W manometrach tych ugięcie lub naprężenie membrany pomiarowej mierzone jest przy udziale różnego typu czujników przemieszczeń /elektrycznych, mechanicznych, pneumatycznych/. Z uwagi na znaczne ciężary i niską częstotliwość nośną czujników mechanicznych i pneumatycznych stosowanie ich jest jednak ograniczone. Preferowane są natomiast manometry z czujnikami elektrycznymi.



Rys.IV-64. Różnicowy czujnik ciśnienia typ 7251 firmy Kistler /wygląd zewnętrzny/

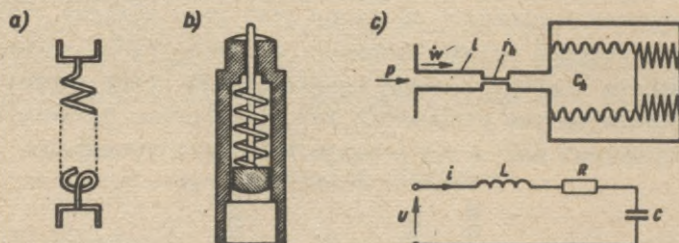


Przykładem nowoczesnego rozwiązania konstrukcyjnego może tu być manometr tensometryczny firmy Kistler /rys.IV-64/, wyposażony w czujnik elektryczny różnicy ciśnienia typu 7251, przeznaczony do pomiaru różnicy ciśnienia  $p = \pm 0,1 \text{ [MN/m}^2\text{]}$  przy ciśnieniu statycznym  $10 \text{ [MN/m}^2\text{]}$  lub czujnik PD1 firmy Hottinger o analogicznych zakresach pomiarowych.

### 7.5. Wyposażenie dodatkowe manometrów

W celu ochrony przyrządów manometrycznych przed niepożądanymi obciążeniami stosuje się wyposażenia dodatkowe. Przy ciśnieniu pulsującym instaluje się odpowiednio zaprojektowane elementy dławiące. Ochrona manometrów przed ciśnieniem pulsującym konieczna jest z uwagi na to, że szybkie i częste zmiany ciśnienia wytwarzają duże obciążenia, które w przypadku wystąpienia rezonansu doprowadzić mogą do uszkodzenia organu ruchowego manometru. Tłumienie i uśrednienie mierzonych przebiegów ciśnień uzyskiwane jest za pomocą pneumatycznych filtrów RC.

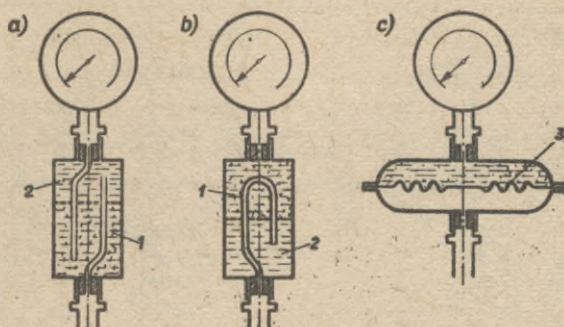
Dobór filtrów RC, tzn. określenie pojemności i impedancji pneumatycznej, realizowany jest w praktyce w drodze empirycznej. W przypadku pomiaru ciśnienia gazu rolę filtra spełnia naczynie o dostatecznie dużej pojemności /pojemności pneumatycznej/. Przy pomiarach ciśnienia cieczy stosowane są naczynia sprężyste lub odpowiednio skonstruowane dławiki. Na rys. IV-65 przedstawiono kilka rozwiązań ochrony manometrów przed ciśnieniem pulsującym.



Rys.IV-65. Ochrona manometrów przed pulsacją ciśnienia: a/ kapilara, b/ przewężenie z tłoczkiem, c/ schemat tłumiącego filtra hydraulicznego i jego analog elektryczny:  $p$  - ciśnienie,  $\dot{w}$  - prędkość przepływu,  $r_h$  - rezystancja hydrauliczna,  $C_h$  - pojemność hydrauliczna,  $l$  - długość

Przy bezpośrednim kontakcie manometru z ośrodkiem agresywnym wywołującym korozję stosuje się izolację w postaci worków wodnych lub izolację przeponową. Natomiast przy dużym zapyleniu ośrodka badanego, jak również przy wysokiej temperaturze ochrona sprowadza się do podobnych rozwiązań izolacyjnych /rys.IV-66/.





Rys.IV.66. Sposoby ochrony manometrów przed agresywnym działaniem ośrodka badanego: a/ izolacja cieczą cięższą, b/ izolacja cieczą lżejszą, c/ izolacja przeponowa: 1 - ciecz izolująca, 2 - ciecz agresywna, 3 - przepona

Przy pomiarach, jak również przy kontroli pracy i sterowaniu maszyn bardzo często okazuje się konieczna centralna rejestracja ciśnienia w wielu niekiedy znacznie odległych od siebie punktach pomiarowych. W tych przypadkach, jak również wtedy, gdy pożądana jest znajomość nie tylko wartości ciśnienia, lecz także jego korelacji z innymi parametrami pracy maszyny, manometry nieelektryczne wyposażone są dodatkowo w urządzenia przekąźnikowe. Do najczęściej stosowanych tu rozwiązań należy zaliczyć:

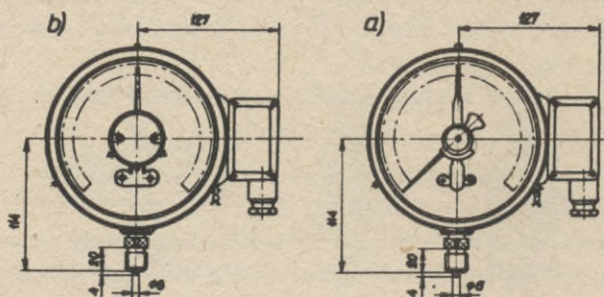
- manometry z wbudowanym nastawnym urządzeniem stykowym, wykorzystywane do sygnalizacji minimalnego lub maksymalnego ciśnienia roboczego lub też do regulacji dwupołożeniowej,
- manometry mechaniczne z wbudowanym dodatkowo czujnikiem potencjometrycznym, pozwalające przy zastosowaniu wskaźnika magnetoelektrycznego na zdalny pomiar ciśnienia.

Przekazywanie wskazań przyrządów manometrycznych na odległość realizowane może być ponadto przy użyciu czujników indukcyjnych lub łącz sełsynowych, a w przypadkach, gdy zachodzi niebezpieczeństwo wybuchu lub pożaru - przekąźników pneumatycznych.

Pokazany na rys.IV-67 manometr z urządzeniem stykowym może współpracować z dowolnym układem elektrycznym, którego pobór mocy nie przekracza 10 [VA] przy napięciu 380 [V]. Układ styków składający się z jednego lub kilku zespołów stykowych /normalnie zamkniętych lub normalnie otwartych/ współpracuje z ustrojem pomiarowym przy wykorzystaniu jako



nadajnika wskazówki manometru. Przesuwne położenie styków na skali zapewnia pełną uniwersalność przyrządu w ramach jego zakresu pomiarowego.



Rys.IV-67. Manometry z urządzeniami przekąźnikowymi: a/ manometr z urządzeniem stykowym, b/ manometr z nadajnikiem potencjometrycznym

Do zdalnego pomiaru ciśnienia służą manometry wyposażone w czujniki potencjometryczne. Zasada ich pracy polega na ciągłym transformowaniu kąta wychylenia wskazówki przyrządu dzięki sprzęgnięciu jej z suwakiem potencjometru. Sygnał prądowy z potencjometru przekazywany jest na odległość za pomocą linii pomiarowej do elektrycznego przyrządu /wtórny/. Przyrząd wtórny ma postać rejestratora lub wskaźnika elektrycznego działającego w oparciu o zasadę logometru lub samorównoważącego się mostka elektrycznego. Przyrządy wtórne są skalowane w jednostkach ciśnienia.

## 8. P o m i a r   t e m p e r a t u r y

W praktyce badawczej mamy do czynienia z bardzo szerokim zakresem kontrolowanych temperatur i różnorodnością warunków zmian temperatury. Jest to powodem stosowania różnorodnych metod pomiaru i różnych przyrządów pomiarowych.

Podział typowych przyrządów do pomiaru temperatury przedstawiono w tabl.XIII. Zestawiono w niej dwa rodzaje termometrów - nieelektryczne i elektryczne.

W termometrach nieelektrycznych wykorzystywana jest zależność rozszerzalności objętościowej ciał stałych, cieczy i gazów od zmian temperatury. Najpowszechniej stosowane są tu szklane termometry cieczowe i termometry manometryczne.



Tablica XIII

|                | ZASADA MIERNICZA                                                                      | NAZWY                                                         | ZAKRES PO-<br>MIARÓW<br>°C                          | GŁÓWNE CZĘŚCI<br>SKŁADOWE                                                                                                                                          |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                |                                                                                       |                                                               |                                                     |                                                                                                                                                                    |
| NIEELEKTRYCZNE | ROZSZERZALNOŚĆ<br>CIECZY W SZKLE                                                      | termometry szklane<br>kvarcowe, rtęciowe,<br>spirytusowe itp. | -200 ÷ 600                                          | zbiornik cie-<br>czy i kapilara                                                                                                                                    |
|                | ROZSZERZALNOŚĆ<br>CIAŁ STAŁYCH                                                        | termometry bimeta-<br>liczne                                  | 0 ÷ 400                                             | spojone dwie róż-<br>ne taśmy meta-<br>lowe,przekaznik<br>i miernik od-<br>kształcenia                                                                             |
|                | ROZPRĘŻLIWOŚĆ<br>GAZÓW                                                                | termometry manome-<br>tryczne                                 | 0 ÷ 500                                             | zbiornik gazu,<br>kapilara meta-<br>lowa i manometr<br>sprężynowy /Bar-<br>dona/ lub Boy-<br>se a                                                                  |
|                | ROZPRĘŻLIWOŚĆ<br>CIECZY                                                               | termometry manome-<br>tryczne keylenowe,<br>rtęciowe          | 0 ÷ 300                                             | zbiornik cieczy,<br>kapilara i ma-<br>nometr spręży-<br>nowy                                                                                                       |
|                | PRĘŻNOŚĆ PAR<br>NASYCONYCH                                                            | termometry manome-<br>tryczne parowe                          | -20 ÷ 350                                           | zbiornik cieczy<br>i pary,kapila-<br>ra i manometr<br>sprężynowy                                                                                                   |
|                | MIĘKNIENIE W<br>OKREŚLONYCH WA-<br>RUNKACH STOŻKÓW<br>CERAMICZNYCH                    | stożki Segera itp.                                            | 600 ÷ 2000                                          | stożki cerami-<br>czne o znorma-<br>lizowanym skła-<br>dzie i kształc.                                                                                             |
|                | ZMIANY TERMI-<br>CZNE OPORU<br>ELEKTRYCZNEGO                                          | termometry oporowe<br>metalowe i termi-<br>story              | -200 ÷ 600                                          | opornik metalo-<br>wy,przewody łą-<br>czące,źródło<br>prądu i miernik<br>oporu                                                                                     |
| ELEKTRYCZNE    | ZMIANY SIŁY TER-<br>MOELEKTRYCZNEJ<br>TERMOELEMENTU                                   | termometry termo-<br>elektryczne /ter-<br>mopary/             | -200 ÷ 1100<br>nieszlach.<br>0 ÷ 1450<br>szlachetn. | termoelement,<br>przewody łącza-<br>ce i miernik si-<br>ły termoelektry-<br>cznej                                                                                  |
|                | FOTOMETROWANIE<br>EMISJI ROZŻARZO-<br>NYCH CIAŁ W ŚWIE-<br>TLE MONOCHROMA-<br>TYCZNYM | pirometry optyczne                                            | powyżej<br>700                                      | luneta, lampa<br>pirometryczna,<br>przewody łącza-<br>ce z regulato-<br>rem oporu,ampe-<br>romierz albo lu-<br>neta fotokomór-<br>ka,przewody i<br>miliamperomierz |
|                | POMIAR STRUMIE-<br>NIA ENERGII EMI-<br>TOWANEJ PRZEZ<br>CIAŁO ROZŻARZONE              | pirometry całkowi-<br>tego promieniowa-<br>nia                | powyżej<br>100                                      | luneta,termoba-<br>teria próżniowa,<br>przewody łącza-<br>ce i miliwolt-<br>mier                                                                                   |
|                |                                                                                       |                                                               |                                                     |                                                                                                                                                                    |



Obecnie istnieje tendencja do stosowania zarówno w pomiarach laboratoryjnych, jak i przemysłowych termometrów elektrycznych. Wynika to zarówno z możliwości dokładnego pomiaru temperatury w szerokich granicach  $(-200 \div +1600)[^{\circ}\text{C}]$ , jak również z łatwości rejestracji i przekazywania wskazań na odległość.

Termometry elektryczne w zależności od sposobu przetwarzania temperatury na parametry elektryczne dzielą się na:

- termometry termoelektryczne /termopary/,
- termometry rezystancyjne, a w tym: termometry metalowe i półprzewodnikowe /termistorowe/.

W opracowaniu tym omówione zostaną jedynie te rodzaje przyrządów, które z racji swych cech eksploatacyjnych i reprezentowanych zakresów pomiarowych znajdują zastosowanie w pomiarach Laboratorium MRC. Z tego względu pominięto np. dużą grupę termometrów optycznych /pirometrów/ stosowanych do pomiarów wysokich temperatur, tj. powyżej  $700 [^{\circ}\text{C}]$ .

### 8.1. Szklane termometry cieczowe

Dzięki prostej budowie, pewności działania oraz znacznej niezawodności przy równocześnie wysokiej dokładności termometry szklane /mimo dużego postępu w technice mierzenia temperatury/ należą ciągle do najpowszechniej stosowanych przyrządów.

Zasada ich działania oparta jest na wykorzystaniu różnicy rozszerzalności cieplnej cieczy termometrycznej i szkła. Obserwowane zatem zmiany wysokości słupka cieczy zależne są od pozornego współczynnika rozszerzalności cieplnej  $\beta'$ , przy czym

$$\beta = \beta_c - \beta_s \quad (54)$$

gdzie:

$\beta_c$  - współczynnik rozszerzalności cieczy /dla rtęci  
 $\beta_{0 \div 100} = 18 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}\text{C}]$ /,

$\beta_s$  - współczynnik rozszerzalności szkła /dla specjalnego szkła termometrycznego  $\beta_{0 \div 100} = 2 \cdot 10^{-5} [1/^{\circ}\text{C}]$ /.

Najczęściej stosowanymi cieczami termometrycznymi są: rtęć  $(-30 \div +500)[^{\circ}\text{C}]$ /, spirytus etylowy  $(-80 \div +70)[^{\circ}\text{C}]$ /, pentan  $(-200 \div +30)[^{\circ}\text{C}]$ /.



Czułość termometrów szklanych jest uzależniona od odpowiedniego stosunku objętości zbiorniczka do średnicy kapilary. Praktycznie granica czułości wynosi  $0,002[^\circ\text{C}]$ . Wynika ona z faktu, że nie można nadmiernie powiększać objętości zbiorniczka, gdyż to powodowałoby wzrost bezwzględności cieplnej termometru. Zbyt mała natomiast średnica kapilary poza trudnościami wykonawczymi mogłaby prowadzić do łatwego przerywania się słupka cieczy.

Dokładność szklanych termometrów cieczowych określa się dla całego zakresu jako bezwzględną wartość błędu, a nie jako klasę dokładności. Dokładność ta wynosi do  $0,2[^\circ\text{C}]$ , natomiast dla termometrów w wykonaniu laboratoryjnym do  $0,01[^\circ\text{C}]$ .

Termometry szklane są produkowane w wielu odmianach i stosuje się je powszechnie głównie w badaniach laboratoryjnych. Na szczególną uwagę zasługują termometry skrócone, termometry Beckmana, termometry maksymalno-minimalne, termometry kontaktowe.

W badaniach ruchowych i kontroli przemysłowej termometry szklane stosowane są rzadko ze względu na małą odporność mechaniczną.

## 8.2. Termometry manometryczne

W termometrach manometrycznych wykorzystywana jest zależność pomiędzy prężnością substancji zawartej w hermetycznie zamkniętym układzie a temperaturą. Układ zamknięty stanowią metalowy czujnik /zbiornik/ - kapilara - sprężysty element manometryczny.

Zmiana objętości lub ciśnienia substancji termometrycznej pod wpływem zmian temperatury wywołuje odkształcenie elementu sprężystego. Odkształcenie to poprzez mechanizm uwielokrotniający powoduje wychylenie wskazówki, podobnie jak w manometrze sprężynowym.

W przyrządach tych mierzona temperatura przekształcana jest na sygnał ciśnieniowy. W zależności od rodzaju stosowanej substancji termometrycznej, rozróżnić można trzy typy termometrów manometrycznych, są to:

- termometry cieczowe wykorzystujące objętościową rozszerzalność cieczy. Napełniane są toluenem, ksylenem lub rtęcią;
- termometry parowe, w których miarą temperatury jest zmiana ciśnienia pary nasyconej w układzie pomiarowym. Napełnione są cieczą będącą w równowadze ze swą parą; stosuje się ciecze niskowrzące, takie jak eter, benzen, alkohol;
- termometry gazowe wykorzystujące objętościową rozszerzalność gazu. Napełniane są azotem lub helem. Termometry te są bardzo rzadko stosowane.

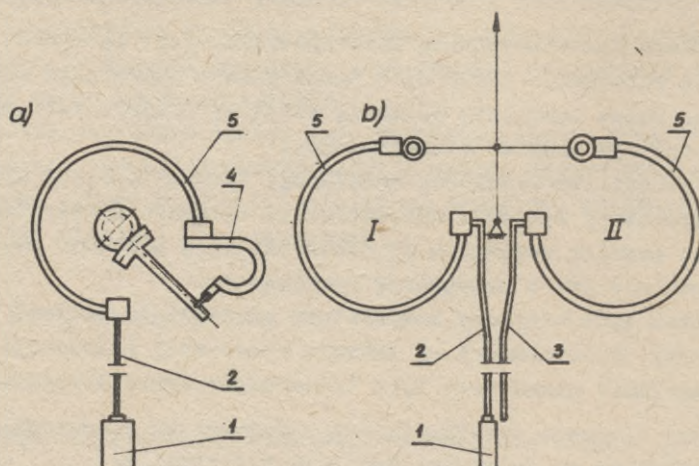


Termometry manometryczne są proste konstrukcyjnie, odporne na wstrząsy i podobnie jak manometry sprężyste mogą być przystosowane do pomiarów zdalnych i automatycznej regulacji.

Klasa dokładności tych termometrów waha się w granicach od 0,5 do 2,5. Natomiast zakres pomiarowy w zależności od typu może być różny i zawarty jest w granicach  $(-100 \div +600)^{\circ}\text{C}$ .

Ze względu na to, że zarówno miernik, jak i kapilara objęte są wpływem temperatury otoczenia, w termometrach tych konieczne jest stosowanie układów kompensacyjnych. Kompensację wpływu temperatury otoczenia uzyskuje się dwoma sposobami:

- przy kompensacji częściowej, rys.IV-68a, stosuje się pasek bimetaliczny, który koryguje położenie wskazówki /kompensacja obejmuje jedynie zmiany objętości cieczy zawartej w manometrze/,
- przy kompensacji pełnej /niezbędnej przy długich kapilarach/ stosuje się dodatkowy manometr i kapilarę bez czujnika ułożoną we wspólnej osłonie z kapilarą pomiarową. Oba manometry, pomiarowy i kompensacyjny, sprzężone są przeciwsobnie układem dźwigni, jak to pokazano na rys.IV-68b.



Rys.IV-68. Kompensacja wpływów temperatury otoczenia w termometrach manometrycznych: a/ kompensacja częściowa, b/ kompensacja pełna: 1 - zbiornik z cieczą, 2 - kapilara pomiarowa, 3 - kapilara kompensacyjna, 4 - pasek bimetalowy, 5 - rurka Bourdona

Wadą termometrów manometrycznych jest ograniczona odległość przyrządu pomiarowego lub rejestrującego od miejsca pomiaru oraz tylko jednopunktowy pomiar. Te względy, jak i brak możliwości dokonywania napraw



przez użytkownika, są powodem malejącego ich stosowania na korzyść termometrów elektrycznych. Są jednakże, ze względu na dużą odporność mechaniczną, bardzo dogodne jako wskaźniki kontrolne w pojazdach lub urządzeniach narażonych na drgania.

### 8.3. Termometry termoelektryczne

#### 8.3.1. Zasada działania

W termometrach termoelektrycznych elementem pomiarowym przetwarzającym temperaturę na wielkość elektryczną jest czujnik termoelektryczny /termopara/, składający się z dwu niejednorodnych elektrycznie względem siebie drutów /termoelektrod/, połączonych ze sobą przez zespawanie lub zlutowanie w miejscu stanowiącym spoinę pomiarową. Jeżeli spoina pomiarowa czujnika znajduje się w innej temperaturze niż jej wolne /zimne/ końce /zimne końce termoelektrod zwane są niekiedy spoiną odniesienia/, między tymi końcami pojawia się siła termoelektryczna STE, o wartości proporcjonalnej do różnicy obydwu temperatur i będąca funkcją tych temperatur. Pojawiająca się siła termoelektryczna STE wynika z różnicy pracy wyjścia elektronów wychodzących /emitowanych/ z połączonych metali w spoinie pomiarowej. Metal o mniejszej pracy wyjścia wysyła więcej elektronów w jednostce czasu i ładuje się dodatnio, natomiast metal o większej pracy wyjścia wysyła mniej elektronów i ładuje się ujemnie.

W stanie ustalonym w punkcie styczności między tymi metalami pojawia się zatem różnica potencjałów, tzw. potencjał stykowy. Ta różnica potencjałów utrudnia przepływ elektronów z metalu o mniejszej pracy wyjścia, natomiast ułatwia ten przepływ z metalu o większej pracy wyjścia. Następuje więc równowaga, przy czym w jednostce czasu tyle elektronów przechodzi z jednego metalu do drugiego, ile z drugiego do pierwszego. Zjawisku temu towarzyszy, jak wspomniano, potencjał stykowy zależny od temperatury i rodzaju stykających się metali.

Gdy wolne końce termoelementu znajdują się w jednakowej i stałej temperaturze, wówczas występująca na nich STE jest funkcją tylko temperatury spoiny pomiarowej. Jeżeli termoelement połączony zostanie z miernikiem lub rejestratorem STE /np. miernikiem magnetoelektrycznym z ruchomą cewką, wycechowanym w jednostkach temperatury/, wskaże on wartość temperatury miejsca, w którym znajduje się spoina pomiarowa.

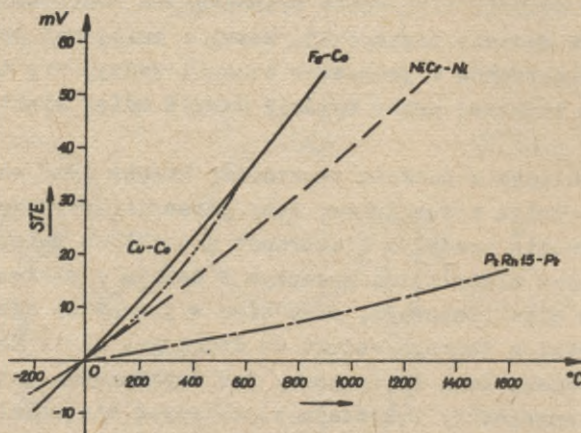


### 8.3.2. Czujniki termoelektryczne /termopary/

Na termopary należy wybierać zestawy metali, które w szeregu termoelektrycznym znajdują się możliwie daleko od siebie, co zapewnia występowanie odpowiednio dużych STE. Ponadto materiały stosowane na termopary powinny się charakteryzować liniowością, powtarzalnością oraz stałością charakterystyki, dużą czułością i odpornością na wpływy zewnętrzne, jak również małą rezystywnością w miarę niezależną od zmian temperatury.

Stosowane zestawy materiałów na termopary stanowią pewien kompromis między tymi wymogami. W praktyce do najczęściej stosowanych zestawów należą: Fe - Co, Cu - Co, NiCr - Ni, PtRh - Pt, przy czym termoelektrodę dodatnią stanowi drut wykonany z metalu lub stopu metali stojącego w oznaczeniu na pierwszym miejscu.

Zależność STE od temperatury spoin pomiarowych wymienionych termopar przy temperaturze odniesienia, tj. temperaturze wolnych końców równej  $0^{\circ}\text{C}$ , podaje norma PN-59/M-53854 w formie tzw. normalnych charakterystyk termometrycznych, co przedstawiono graficznie na rys.IV-69. Ponadto w tablicy XIV zestawiono zalecane zakresy pracy tych termopar.



Rys.IV-69. Charakterystyki normalne termopar



Tablica XIV

| Rodzaj termoelementu                                   | Oznaczenie  | Zakres stosowania /°C/ | Wartość STE przy max.temp. pracy /mV/ |
|--------------------------------------------------------|-------------|------------------------|---------------------------------------|
| Miedź - konstantan<br>/100 % Cu - 60 % Cu/40 % Ni/     | Cu - Co     | -200 ÷ 400             | 80,87                                 |
| Żelazo - konstantan<br>/100 % Fe - 60 % Cu/40 % Ni/    | Fe - Co     | -200 ÷ 800             | 45,72                                 |
| Nikiel, chrom - nikiel<br>/90 % Ni/10 % Cr - 100 % Ni/ | NiCr - Ni   | 0 ÷ 1200               | 48,85                                 |
| Platyna, rod - platyna<br>/85 % Pt/15 % Rh - 100 % Pt/ | PtRh15 - Pt | 0 ÷ 1600               | 18,68                                 |

Jeżeli temperatura odniesienia nie jest równa 0 [°C] lecz  $t_1$ , to STE określona jest zależnością:

$$E = E_0 + k \cdot t_1 \quad (55)$$

gdzie:

$E_0$  - STE [mV] przy temperaturze odniesienia 0 [°C],

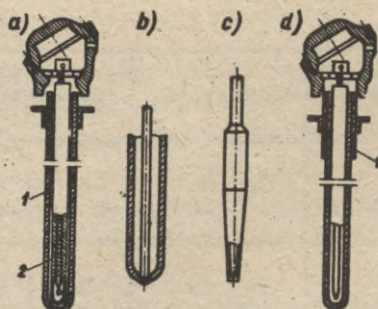
$k$  - współczynnik poprawkowy wynoszący 0,044 dla NiCr-Ni; 0,0532 dla Fe-Co; 0,0406 dla Cu-Co;

$t_1$  - rzeczywista temperatura wolnych końców [°C].

Ten sposób naliczania poprawki zaleca norma, gdy  $0[°C] < t_1 < 50 [°C]$ .

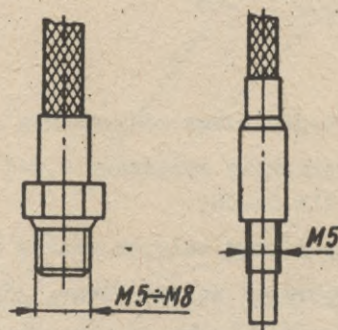
Termopary przystosowuje się do pomiarów technicznych przez umieszczenie ich w specjalnych osłonach, których zadaniem jest ochrona termopary od uszkodzeń mechanicznych oraz od bezpośredniego działania czynników korodujących. Dobór osłony pod względem konstrukcyjnym i materiałowym powinien uwzględniać następujące właściwości: odporność na mierzoną temperaturę, agresywność chemiczną ośrodka, bezwładność cieplną /właściwości dynamiczne/ oraz wpływ na statyczny błąd pomiaru. W zależności od wymogów eksploatacyjnych wykonuje się szereg odmian konstrukcyjnych osłon termopar. Na rys.IV-70 przedstawiono typowe rozwiązania konstrukcyjne czujników termoelektrycznych wraz z osłonami.





Rys.IV-70. Czujniki termoelektryczne typu termopar wraz z osłonami:  
a/ osłona metalowa, b/ ze złączeniem na osłonie, c/ z osłoną metalową wysokociśnieniową, d/ z osłoną ceramiczną;  
1 - osłona metalowa, 2 - izolacja termoelektryczna

Oprócz typowych, produkowane są także konstrukcje czujników dostosowanych do potrzeb specjalnych. Przykładowo w pomiarach temperatury części maszyn i hydraulicznych układów napędowych zachodzi potrzeba miniaturyzacji czujników. Czujnikiem dostosowanym m.in. do tych zadań jest termoelement miniaturowy firmy Dequise'a pokazany na rys.IV-71. W czuj-



Rys.IV-71. Czujniki miniaturowe typu termopar firmy Dequise'a /wygląd zewnętrzny/

niku tym, w celu uzyskania lepszych własności dynamicznych, spoina pomiarowa wstawiana jest w denko osłony.

Na szczególną uwagę zasługują ponadto tzw. termopary płaszczowe wykonane w formie długiej, cienkiej rurki, wypełnionej masą izolacyjną z tlenku magnezu, w której znajdują się elektrody. Termopary płaszczowe

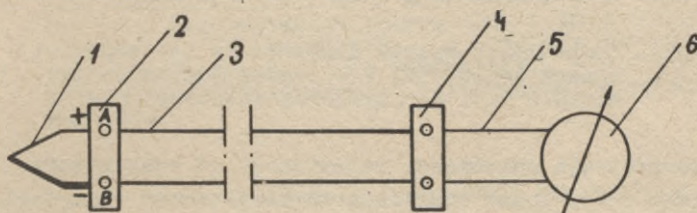


we są odporne na wstrząsy i dają się wyginać bez obawy zwarcia elektrod /średnica czujnika wynosi  $0,5 \div 10$  [mm]/. Termopary płaszczone wykonywane w zakresach do  $1000$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] są wyjątkowo przydatne w ekstremalnie trudnych warunkach i agresywnym otoczeniu oraz wszędzie tam, gdzie istnieje konieczność punktowego pomiaru temperatury. Ponadto znajdują zastosowanie do pomiaru temperatury w miejscach trudno dostępnych, gdzie wymagane jest użycie czujników giętkich o małych średnicach.

W przypadkach, gdy czujnik nie jest narażony na uszkodzenia mechaniczne, jak również na działanie chemiczne, możliwe jest zastosowanie termopar bez osłon. Uzyskuje się wtedy bardzo dobre właściwości dynamiczne czujnika przy równoczesnym punktowym pomiarze temperatury. Złącze pomiarowe stanowi w tym przypadku spojenie termopary z powierzchnią badaną.

### 8.3.3. Kompensacja wpływu temperatury wolnych końców termopary

Ponieważ wartość STE indukowanej w termoparze jest funkcją różnicy temperatury złącza pomiarowego i wolnych /zimnych/ końców, te ostatnie muszą bezwzględnie znajdować się w jednakowej i stałej temperaturze, równej temperaturze odniesienia /tzn. temperaturze, w której znajdowały się w czasie wzorcowania/. Realizowane jest to przez przedłużenie wolnych końców termopary do miejsca, gdzie temperaturę tę można ustalić /rys.IV-72/. Przedłużenia termopar dokonuje się za pomocą przewodów kompensacyjnych.



Rys.IV-72. Kompensacja temperatury wolnych końców: 1 - gorące końce, 2 - głowica termopary, 3 - przewody kompensacyjne, 4 - naczynie termostatyczne, 5 - przewody Cu, 6 - miernik STE

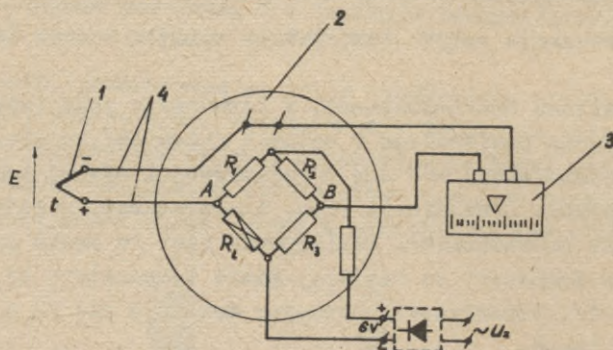
Przewody kompensacyjne wykonuje się z takich samych materiałów, jak termopara lub równorzędnych pod względem elektrycznym. Jeżeli przewody kompensacyjne są wykonane z tych samych materiałów co termopara, wówczas w miejscach ich połączeń z termoparą nie powstają żadne STE. W przypadku, gdy przewody kompensacyjne wykonane są z innych materiałów niż



termopara, zachowana musi być równość temperatury w punktach (A), (B), rys.IV-72, co powoduje wzajemne znoszenie się STE powstających w miejscach łączeń termopary z przewodami kompensacyjnymi.

Dzięki zastosowaniu przewodów kompensacyjnych można spoiny odniesienia przenieść do dowolnego miejsca o nie zmieniającej się temperaturze. Jeżeli pragnie się uzyskać wysoką dokładność pomiaru, temperaturę spoin odniesienia ustala się przez umieszczenie wolnych końców w elektrycznym termostacie lub w naczyniu Dewara /termosie/ wypełnionym lodem lub olejem /o temperaturze równej nominalnej temperaturze odniesienia  $20[^\circ\text{C}]$  lub  $0[^\circ\text{C}]$ .

W warunkach przemysłowych stałość temperatury wolnych końców uzyskuje się przez zastosowanie tzw. puszek kompensacyjnych czyli mostkowego układu kompensacyjnego - rys.IV-73. Działanie takiego układu oparte



Rys.IV-73. Kompensacja wpływu temperatury otoczenia: 1 - termopara pomiarowa, 2 - puszka kompensacyjna, 3 - miernik STE, 4 - przewody kompensacyjne

jest na wykorzystaniu zależności rezystancji od temperatury. W układzie mostkowym przez dobór odpowiednich rezystancji oraz dobór współczynników temperaturowych poszczególnych oporów uzyskuje się w przekątnej AB powstanie SEM o takiej wielkości, że zrównoważy ona STE powstającą na skutek zmiany temperatury odniesienia.

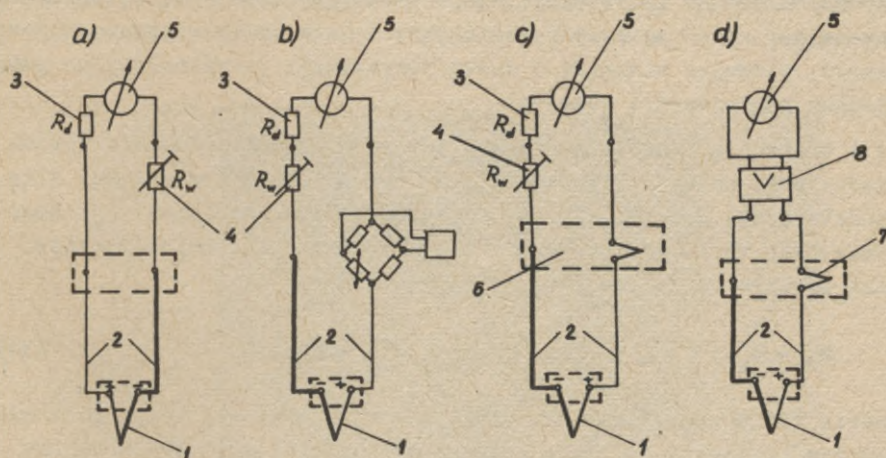
Przy mniej dokładnych pomiarach wahania temperatury wolnych końców w granicach kilku stopni nie odgrywają większej roli i można nie stosować układu kompensacyjnego.



### 8.3.4. Układy pomiarowe

Siłę termoelektryczną wytworzoną w termoparze mierzyć można metodą wychyłową lub kompensacyjną.

- **M e t o d a   w y c h y ł o w a.** W metodzie tej pomiar realizowany jest przy użyciu miliwoltomierza podłączonego do wolnych końców termopary zgodnie z jednym z pokazanych na rysunku IV-74 schematów.



Rys.IV-74. Schematy podstawowe termometrów termoelektrycznych wychyłowych: a/ bez kompensacji, b/ z kompensacją przy użyciu pułki kompensacyjnej, c/ z kompensacją przy użyciu termostatu, d/ z zastosowaniem wzmacniacza i kompensacji przy użyciu termostatu: 1 - termopara, 2 - przewody kompensacyjne, 3 - opór dodatkowy, 4 - opór wyrównawczy, 5 - miernik STE, 6 - naczynie termostatyczne, 7 - termopara kompensacyjna, 8 - wzmacniacz

Termometry pracujące w układzie wychyłowym są proste w obsłudze. Wskazania miernika są tu proporcjonalne do wartości prądu płynącego w obwodzie pomiarowym, a ten zależy nie tylko od wartości STE, lecz również od wartości rezystancji obwodu pomiarowego, zatem od długości i przekrojów przewodów łączących termoparę z miernikiem. W celu uniezależnienia wskazań miernika od długości linii przy wzorcowaniu tego miernika zakłada się pewną znamionową wartość rezystancji zewnętrznego obwodu pomiarowego, tj. termoelementu i przewodów łączących. Przy montowaniu układu pomiarowego włącza się w obwód zewnętrzny opornik wyrównawczy  $R_w$ , za pomocą którego dokonuje się wyrównania rzeczywistej rezystancji obwodu do wartości znamionowej.



W celu uzyskania rejestracji termoparę łączy się z rejestratorem o działaniu bezpośrednim lub pośrednim przez wzmacniacz pomiarowy. W pierwszym przypadku, ze względu na mały moment napędowy układu pomiarowego wychylenie miernika rejestrowane jest przez periodyczne odbijanie na taśmie /zapis punktowy/, w drugim przypadku rejestracja odbywa się w sposób ciągły i pisak nie odrywa się od taśmy.

Zasadniczą wadą metod wychyłowych jest, że układy te wykazują dużą wrażliwość na zmiany rezystancji obwodów zewnętrznych /linia, przewody kompensacyjne/. Błąd pomiarowy wynikający z tego można w pewnym stopniu ograniczyć, stosując mierniki o dużej rezystancji wewnętrznej, co powoduje jednak zmniejszenie czułości.

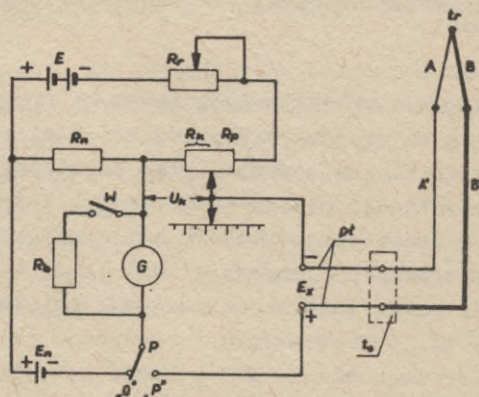
**Metoda kompensacyjna.** Zasada działania układu kompensacyjnego polega na zrównoważeniu lub porównaniu mierzonej siły termoelektrycznej o wartości  $E_x$  z napięciem kompensującym  $U_k$ . Zrównoważenie tych wielkości odbywać się może ręcznie lub automatycznie. W chwili pomiaru spełniona jest zatem równość:

$$E_x - U_k = 0 \quad (56)$$

W metodzie tej pomiar siły termoelektrycznej odbywa się zatem w stanie bezprądowym termoelementu, a w związku z tym unika się błędów zmiany rezystancji termopary i przewodów łączących.

Zależnie od sposobu uzyskania napięcia kompensacyjnego rozróżnia się dwa typy kompensatorów: napięciowe i prądowe.

Na rys. IV-75 przedstawiono schemat kompensatora napięciowego /wg Poggendorfa/.

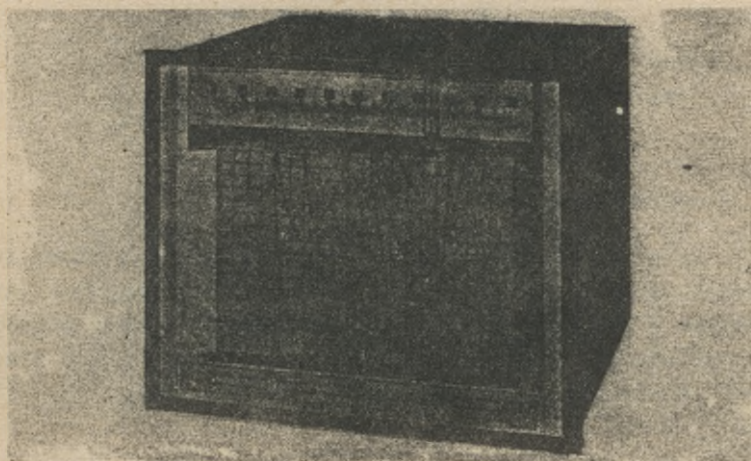


Rys. IV-75. Schemat kompensatora napięciowego /wg Poggendorfa/



Precyzyjne kompensatory laboratoryjne osiągają dokładność  $\pm 0,001 [mV]$ . Typowe kompensatory napięciowe mają kilka zakresów pomiarowych, przy czym górna granica najwyższego zakresu nie przekracza na ogół 50  $[mV]$ .

Obecnie w pomiarach temperatury coraz szerzej stosowane są samoczynne kompensatory rejestrujące, wykonywane jako śledzące układy pomiarowe /patrz rozdz.I/, przeznaczone do pomiaru temperatury w kilku punktach. Są to przyrządy drukujące z nastawnym czasem wybierania punktów. Na rys.IV-76 pokazano samoczynny kompensator firmy Hartmann and Braun /NRF/, przeznaczony do pomiaru temperatury w 24 punktach /klasa przyrządu 0,2/.



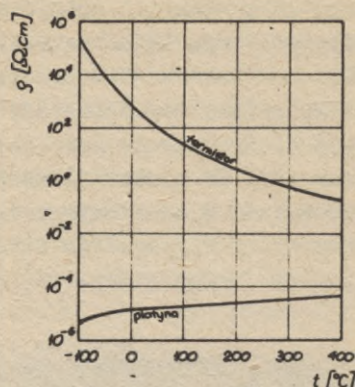
Rys.IV-76. Kompensator firmy Hartmann and Braun /wygląd zewnętrzny/

#### 8.4. Termometry oporowe

W termometrach oporowych wykorzystane jest zjawisko zmiany rezystancji przewodników /metali/ i półprzewodników pod wpływem temperatury. Zmiana rezystancji opornika lub termistora jest funkcją jednoznaczną temperatury, określoną jako jego charakterystyka termometryczna.

Jak widać z rys.IV-77, czujniki metalowe odznaczają się dużą czułością i nieliniowością, przy czym posiadają one dodatni współczynnik temperaturowy /rezystancja ich rośnie ze wzrostem temperatury/, a termistory - ujemny.





Rys.IV-77. Rezystywność platyny i typowego termistora w funkcji temperatury

#### 8.4.1. Czujniki metalowe

Czujniki metalowe wykonywane są z drutu platynowego, miedzianego lub niklowego, o średnicy  $(0,05 \div 0,1)$  [mm], nawiniętego bifilarnie na rdzeń wykonany z różnego rodzaju mas ceramicznych. Wybór rodzaju drutu oporowego uzależniony jest m.in. od maksymalnej temperatury pracy czujnika i tak dla miedzi  $t_{\max} = 150$  [°C], dla niklu  $t_{\max} = 200$  [°C], dla platyny  $t_{\max} = 500$  [°C].

Druty oporowe wykonywane są z czystych metali bez domieszek, ponieważ zanieczyszczenia obniżają współczynnik temperaturowy  $S$ , który wyraża się stosunkiem względnej zmiany rezystancji  $\frac{\Delta R}{R}$  do przyrostu temperatury  $\Delta t$

$$S = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\Delta t} \quad [1/^{\circ}\text{C}] \quad (57)$$

Miarą m.in. czystości metalu, z którego wykonany został czujnik i technologii jego wytwarzania jest wartość stosunku rezystancji czujnika w temperaturze  $100$  [°C] do rezystancji w  $0$  [°C]. Wartość tego stosunku decyduje o przydatności danego czujnika do pomiarów dokładnych.

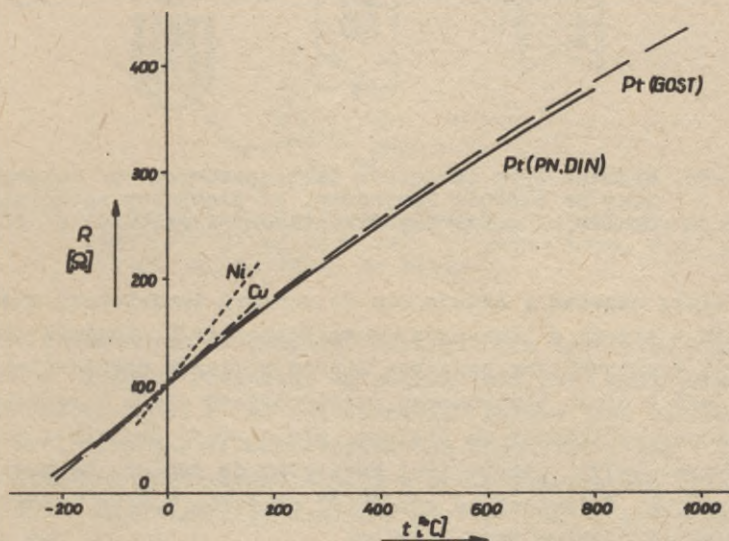
Z tych to względów najdokładniejsze czujniki wykonywane są z platyny, która nie tworzy związków chemicznych i można ją uzyskać w postaci bardzo czystej. Dla platyny wartość wspomnianego stosunku jest stała i wynosi:

$$\frac{R_{100}}{R_0} = 1,391.$$



Metalowe czujniki rezystancyjne wykonywane są w wielu odmianach konstrukcyjnych. Cechą charakterystyczną tych czujników jest to, że posiadają one powtarzalną charakterystykę, dzięki czemu możliwa jest ich całkowita zmiennność.

Wartość rezystancji metalowych czujników do pomiaru temperatury przyjmowana jest w większości przypadków w odniesieniu do temperatury  $0^{\circ}\text{C}$  i wynosi  $R_0 = 100[\Omega]$ . Wynika to z kompromisu między czułością /tj. zmianą rezystancji na  $1^{\circ}\text{C}$ / a wpływem zmiany rezystancji przewodów i wymiarami czujnika. Normalne charakterystyki termometryczne wraz z określeniem odchyłek są podane przez normy /rys.IV-78/.



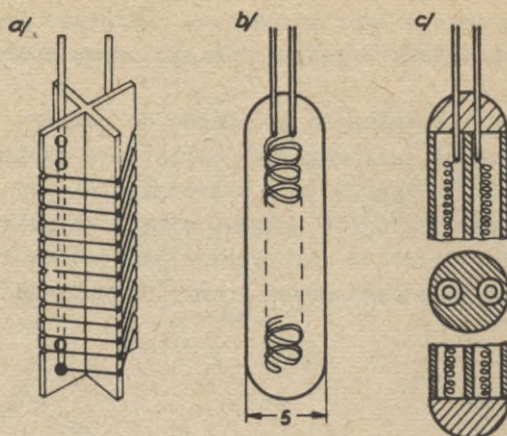
Rys.IV-78. Charakterystyki typowych termometrów rezystancyjnych

O wyborze konstrukcji metalowych czujników rezystancyjnych decydują następujące wymagania:

- dostosowanie do mierzonego zakresu temperatur,
- zabezpieczenie przed ewentualną agresywnością ośrodka,
- niewrażliwość na wstrząsy i drgania obiektu, w którym prowadzony jest pomiar,
- ewentualne spełnienie dodatkowych wymogów, jak np. dotyczących stałej czasowej, czułości lub zdolności do punkтового pomiaru temperatury.

Na rys.IV-79 pokazano trzy wybrane wersje konstrukcyjne czujników, różniące się cechami użytkowymi. Czujnik pokazany na rys.IV-79a ma naj-





Rys.IV-79. Wybrane typy czujników termoporowych: a/ wolnouzwojony na rdzeniu krzyżowym, b/ platynowy zatopiony w szkłe, c/ platynowy miniaturowy w osłonie z  $Al_2O_3$

mniejszą stałą czasową i nadaje się do pomiaru temperatury nieagresywnych gazów i cieczy o izolacyjnych właściwościach. Czujnik - rys.IV-79b jest wersją konstrukcyjną nadającą się do pomiarów agresywnych ośrodków. Wykonany jest z drutu platynowego zatopionego w szkłe o współczynniku rozszerzalności zbliżonej do platyny. Miniaturowy czujnik w osłonie ceramicznej-rys.IV-79c często jest korzystny ze względu na małe wymiary i stałą czasową. Natomiast na rys.IV-80 pokazano budowę typowego termometru rezystancyjnego wraz z osłoną.

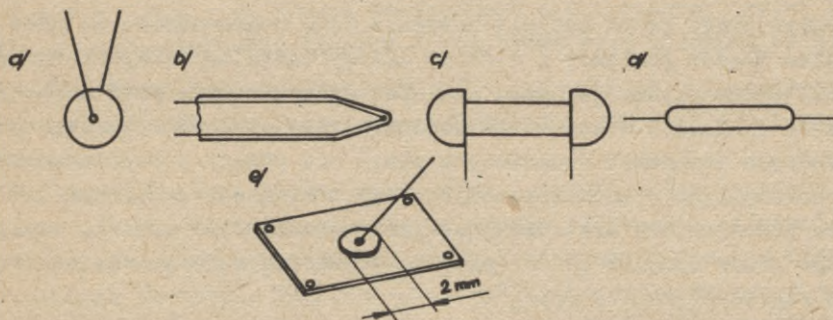


Rys.IV-80. Typowy termometr rezystancyjny: 1/ pakiet płytek mikowych z uzwojeniem, 2/ rurka aluminiowa, 3/ wkładka metalowa do zmniejszenia bezwładności cieplnej, 4/ osłona, 5/ głowica z zaciskami



### 8.4.2. Czujniki półprzewodnikowe /termistory/

Termistory wykonywane są w postaci perełek, płytek i pręcików z tlenków różnych metali: Fe, Ni, Ti, Mn - techniką prasowania i spiekania. Dla ochrony przed wpływami chemicznymi pokrywane są szkliwem lub umieszczone są w szklanych osłonach. Na rys.IV-81 przedstawiono kilka odmian



Rys.IV-81. Typowe wykonania termistorów służących do pomiaru temperatury: a/ płytkowy, b/ bagietkowy, c,d/ pręcikowy, e/ płytkowy na blaszce

termistorów stosowanych do pomiaru temperatury w zakresie  $(-200 \div +120)^{\circ}\text{C}$ . Z racji dużej czułości przydatne są szczególnie przy pomiarach małych temperatur rzędu  $0,001^{\circ}\text{C}$ . Dodatkową ich zaletą jest stosunkowo mała bezwładność cieplna. Wysoka rezystancja termistorów (od  $1\text{ [k}\Omega\text{]}$  do  $2\text{ [M}\Omega\text{]})$  eliminuje praktycznie zupełnie wpływ rezystancji przewodów na wynik pomiarów. Małe wymiary /średnica  $(0,5 \div 3)\text{ [mm]}$  i stała czasowa rzędu  $0,1\text{ [sek]}$  pozwalają na stosowanie ich do punktowych pomiarów temperatur w procesach szybkozmiennych.

Wadą utrudniającą powszechne stosowanie czujników termistorowych jest ich nieliniowość oraz znaczny rozrzut własności termoelektrycznych w poszczególnych egzemplarzach. Ponadto wykazują one zmianę własności termoelektrycznych w czasie długotrwałej pracy mimo stosowania specjalnych zabiegów technologicznych i starzenia, co wymaga okresowego ich przecechowywania.

### 8.4.3. Przyczyny powstawania błędów pomiarowych

#### 1. Zmiana rezystancji przewodów doprowadzających

Główną przyczyną zmiany rezystancji przewodów jest /oprócz złych połączeń/ zmienność temperatury otoczenia. Wpływa to na dokładność pomiarów. Dla przykładu, dla typowego czujnika platynowego i rezystan-



cji  $R_0 = 100[\Omega]$  zmiana temperatury przewodów o  $20 [^{\circ}\text{C}]$  przy rezystancji przewodów  $R_{cu} = 5[\Omega]$  powoduje powstawanie błędu temperaturowego rzędu  $1 [^{\circ}\text{C}]$ . Błędu tego można uniknąć, stosując metodę kompensacyjną lub tzw. układ trójprzewodowy.

## 2. Samopodgrzewanie się czujników na skutek przepływu prądu elektrycznego

Przepływ prądu przez czujnik powoduje jego nagrzewanie, co może być źródłem błędów pomiarów i dlatego należy dążyć do maksymalnego zmniejszenia prądu płynącego przez czujnik. Jednakże mały prąd zasilający stwarza trudności w uzyskaniu zadowalającej czułości. Dlatego przy dokładnych pomiarach uzasadniony staje się pomiar z użyciem mostków kompensacyjnych /czujnik pracuje wtedy w stanie bezprądowym/. W praktyce przemysłowej wystarczające jest ograniczenie prądu przepływającego przez czujnik do  $10 [\text{mA}]$ , co powodować może zmiany temperatury w zakresie  $0,1 \div 0,5 [^{\circ}\text{C}]$ .

## 3. Opóźnienie i uśrednianie wyników pomiarów

W przypadku pomiarów temperatur zmiennych działanie czujnika odbywa się z opóźnieniem i uśrednieniem. Pomiar temperatury chwilowej przy użyciu czujników rezystancyjnych metalowych jest utrudniony ze względu na ich znaczną bezwładność cieplną.

# 9. P o m i a r p r z e p ł y w u

W zakresie pomiarów natężenia przepływu /ilość czynnika przepływającego w jednostce czasu/ rozróżnia się:

- natężenie przepływu objętościowe  $Q_v [\text{m}^3/\text{s}]; [\text{l}/\text{min}]$ ,
- natężenie przepływu masowe  $Q_m [\text{kg}/\text{s}]$ .

W zależności od warunków eksploatacyjnych stosowane są różne metody pomiarowe, wśród których wymienić należy:

- M e t o d y o b j ę t o ś c i o w e, gdzie elementami pomiarowymi mogą być komory o ścianach stałych bądź ruchomych albo łopatk wirnika hydrometrycznego. "Porcje" czynnika przepływającego przez urządzenie pomiarowe są określone przez objętość komory lub przez jeden obrót wirnika. Są one na bieżąco dodawane i wskazywane w postaci chwilowej wartości sumy objętości przepływającego czynnika.

- M e t o d y m a n o m e t r y c z n e, polegające na spiętrzeniu i dławieniu przepływu. Przez wbudowanie do rurociągu różnorodnych zwężeń wywołuje się powstanie w nim spadku ciśnień. Ta różnica ciśnień stanowi miarę natężenia przepływu.



- Metody rotametryczne, wykorzystujące napór przepływającej cieczy na specjalnie ukształtowane elementy pomiarowe.

- Metody elektryczne, w których wykorzystuje się zasady indukcji elektrycznej.

- Metody oparte na zasadzie lokalnego pomiaru prędkości przepływu za pomocą anemometrów elektrycznych, rurki spiętrzającej, pomiaru prędkości dźwięku /przepływomierze ultradźwiękowe/.

Ponadto istnieje szereg innych metod opartych np. na pomiarze czasu relaksacji rezonansu magnetycznego, korelacji zaburzeń stochastycznych, ruchu jonów itp.

Przy pomiarach przepływów w układach hydrauliki i pneumatyki siłowej, z racji określonych zakresów natężenia, lepkości, ciśnienia, temperatury i średnic przewodów, znajdują zastosowanie jedynie niektóre z wymienionych tu metod. Ponadto specyfika pomiarowa narzuca w tym przypadku szereg istotnych wymogów, dotyczących urządzenia pomiarowego.

Urządzenie pomiarowe /przepływomierz/ powinno zapewniać:

- pomiar bez zakłóceń mierzonego przepływu i bez strat ciśnienia,
- pomiar w przewodach o średnicy od kilkunastu do kilkudziesięciu [mm],
- pomiar przepływów szybkozmiennych,
- liniowość charakterystyki w szerokim zakresie natężenia przepływu ( $0 \div 2,5$ ) [dm<sup>3</sup>/s] i lepkości ( $10 \div 300$ ) [cSt] /dotyczy układów hydraulicznych/,
- możliwość prowadzenia pomiarów w warunkach normalnej eksploatacji maszyny,
- zadowalającą dokładność.

W praktyce spełnienie jednocześnie wszystkich postawionych tu wymagań okazuje się bardzo trudne. W celu ułatwienia wyboru typu przepływomierza z dużej grupy tych przyrządów wybrano i zestawiono w tabeli XV jedynie te, które mogą być przydatne przy badaniach maszyn roboczych. Jak widać z przytoczonego zestawienia nie znajdują zastosowania klasyczne przepływomierze /typu zwężek, kryz i rurek spiętrzających itp./, co wynika z poprzednio postawionych wymagań. Do szczegółowego omówienia wybrano najciekawsze rozwiązania konstrukcyjne. Wypada tu wspomnieć, że wg danych zebranych przez Instytut Lotnictwa, w ostatnich latach ukazało się ponad 600 patentów dotyczących przepływomierzy.



Tablica XV

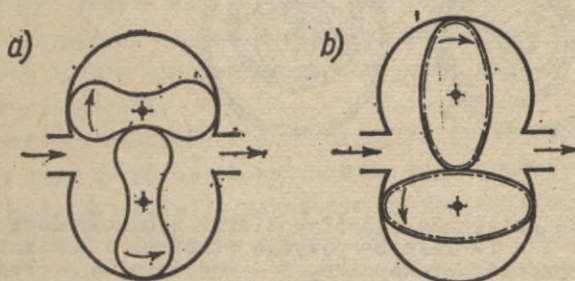
| Rodzaj przepływomierza | Ciecz<br>Gaz                   | Zakres<br>[l/min]                 | $\rho$ nom.<br>przewodu<br>[mm] | Spadek<br>ciśnienia<br>[MN/m <sup>2</sup> ] | Klasa<br>dokładności | Uwagi                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| komorowe               | z miodrodową komorą wirnikową  | 0 0,2÷500                         | 20±80                           | $\sim 2 \cdot 10^{-2}$                      | 0,2±0,5              | pomiary w układach niskociśnieniowych<br>1 [MN/m <sup>2</sup> ] cieczy o lepkości 200 [cSt]<br><br>może być stosowany do pomiarów w ośrodkach agresywnych przy temp. -160÷+160 [°C]<br>Pomiary w układach wysokociśnieniowych do 10 [MN/m <sup>2</sup> ] |
|                        | z owalnymi tarozami szpatylami | 0 0,4÷8000                        | 10±300                          | $\sim 5 \cdot 10^{-2}$                      | 0,2±0,5              |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                        | z tarozkami rotacyjnymi        | 0 $3 \cdot 10^3$ ÷ $4 \cdot 10^4$ | 100±1000                        | $\sim 2 \cdot 10^{-4}$                      | ±1                   | do pomiaru gazów przemysłowych                                                                                                                                                                                                                           |
|                        | tłokowe                        | 0 10÷2000                         | 20±200                          | $\sim 5 \cdot 10^{-4}$                      | 0,2                  | do pomiaru średniego natężenia przepływu cieczy lepkich znajdujących się pod ciśnieniem poniżej 63 [MN/m <sup>2</sup> ] w zakresie temperatur -20 ÷ +150 °C                                                                                              |
| wirnikowe              | skrzydełkowe                   | 0 0,7÷500                         | 10±150                          | $\sim 2 \cdot 10^{-4}$                      | ±1                   | do pomiaru cieczy o lepkości poniżej 100 [cSt] w układach niskociśn.                                                                                                                                                                                     |
|                        | śrubowe                        | 0 10÷4000                         | 50±150                          | $\sim 5 \cdot 10^{-2}$                      | ±0,5                 | do pomiaru cieczy o lepkości poniżej 300 [cSt] przy ciśnieniu do 50 [MN/m <sup>2</sup> ]                                                                                                                                                                 |
|                        | żopateckowe                    | 0 200÷400000                      | 50±300                          | $\sim 1 \cdot 10^{-6}$                      | ±0,5                 | do pomiaru przepływów gazów przemysłowych                                                                                                                                                                                                                |
|                        | ultradźwiękowe                 | 0,6 1÷20000                       | 40±1000                         | -                                           | ±0,2                 | najbardziej uniwersalna metoda pomiaru pozwalająca także na pomiar przepływu płynów wielofazowych                                                                                                                                                        |



### 9.1. Przepływomierze komorowe /objętościowe/

Przepływomierze komorowe działają na zasadzie zliczania liczby "porcji" czynnika odmierzanych w odpowiednich komorach o nieziennej objętości. Odmierzanie to odbywa się zwykle w sposób ciągły. Typowym przedstawicielem tej grupy są przepływomierze bezzaworowe z wirującymi lub oscylującymi elementami odcinającymi odmierzoną objętość oraz przepływomierze zaworowe, np. tłokowe.

Wśród przepływomierzy bezzaworowych największe zastosowanie znajdują przepływomierze owalno-kołowe /rys.IV-82/, w tym głównie przepływo-

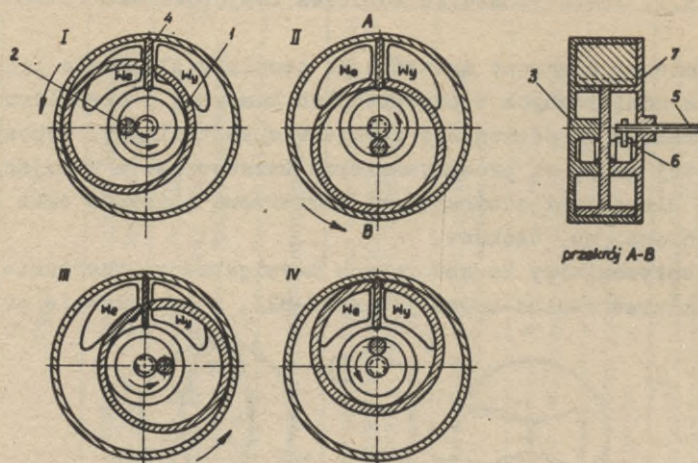


Rys.IV-82. Schematy przepływomierzy owalno-kołowych: a/ typu Roots'a, b/ owalno-zębate

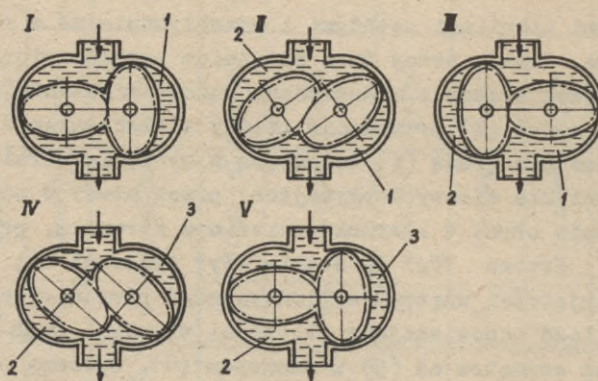
mierze z owalnymi wirnikami zębatymi i przepływomierze z mimośrodową komorą wirnikową. Zasadę pracy tych ostatnich przedstawiono na rys. IV-83. W przepływomierzach z mimośrodową komorą wirnikową ruch wirnika (1) ogranicza sworzeń (2) prowadzony między pierścieniem a sworzniem podstawy (3) oraz przegrodą (4) wchodzącą w wycięcie wirnika. Wirnik pod wpływem ciśnienia cieczy dopływającej przez otwór w podstawie /oznaczony  $We$ / wykonuje obrót w kierunku wskazanym strzałką, przy czym za każdym obrotem z otworu " $We$ " do otworu " $Wy$ " przenosi się ilość cieczy odpowiadająca objętości wnętrza cylindrycznego pierścienia obudowy, zmniejszona o ilość odpowiadającą objętości wirnika. Ruch obrotowy wirnika przenosi na zewnątrz oś (5) z zaczepem (6). Opisany przyrząd, wbrew pozornie zawiłej konstrukcji, ma wiele zalet, takich jak: mały spadek ciśnienia, duża niezawodność i trwałość.

W oparciu o podobne zasady działają przepływomierze z owalnymi wirnikami zębatymi. Przy ruchu obrotowym wirników owalnych okresowo jest zamykana określona objętość cieczy w przestrzeni ograniczonej przez owal wirnika i ścianki komory. W położeniu I /rys.IV-84/ ciecz wprawia w ruch obrotowy prawy wirnik, który obracając się napędza wirnik lewy.





Rys.IV-83. Zasada działania przepływomierza z mimośrodową komorą wirnikową: I - IV-kolejne pozycje wirnika: 1 - wirnik, 2 - swożeń prowadzący wirnika, 3 - podstawa, 4 - przegroda nieruchoma, 5 - oś wirnika, 6 zaczep, 7 - pokrywa

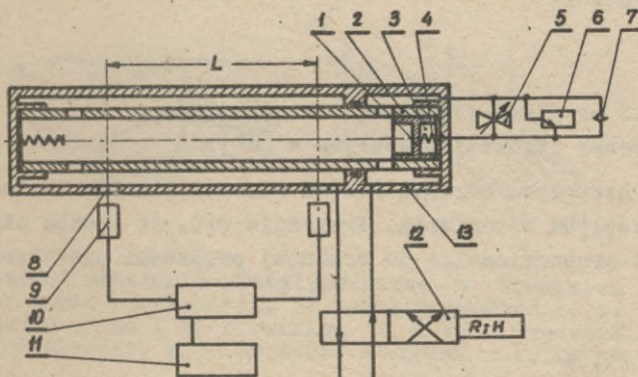


Rys.IV-84. Zasada działania przepływomierza z owalnymi wirnikami zębatymi: I - V-kolejne pozycje wirnika



W tym położeniu prawy wirnik odmierza określoną objętość /porcję cieczy /1/. W położeniu II lewy wirnik rozpoczyna zamykanie nowej porcji /2/, a prawy wytłacza określoną porcję /1/ do króćca wypływowego. W tym położeniu moment obrotowy jest przenoszony przez obydwa wirniki. W położeniu III wirnikiem napędzającym będzie wirnik lewy, który w tym czasie zamkna już odmierzoną objętość cieczy /2/. Łatwo zatem zauważyć, że w czasie jednego obrotu wirników są odmierzane cztery określone objętości /porcje/ cieczy. Przepływomierze z owalnymi wirnikami są produkowane dla różnych zakresów pomiarowych i w odróżnieniu od przepływomierzy z komorą mimośrodową znajdują zastosowanie przy pomiarze natężenia przepływu cieczy lepkich znajdujących się pod znacznym ciśnieniem /do  $20 \text{ MN/m}^2$ /. W przypadku stosowania przepływomierzy z wirnikami owalno-zębatymi należy liczyć się jednak ze znacznymi spadkami ciśnienia oraz błędem pomiaru rzędu 1 %.

Wśród przyrządów zaworowych na szczególną uwagę zasługuje przepływomierz tłokowy typu PW 08/63 skonstruowany w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Gdańskiej i przeznaczony do pomiaru średniego natężenia przepływu oleju w układach hydrauliki siłowej MRC. Konstrukcja ta, rys.IV-85, umożliwia eliminację błędów systematycznych spowodowanych



Rys.IV-85. Konstrukcja przepływomierza tłokowego typu PW 08/63: 1 - tłok, 2 - cylinder, 3 - komora, 4 - sprężyna, 5 - dławik, 6, 7 - system zaworów, 8 - okienko, 9 - czujniki fotoelektryczne, 10 - przystawka sterująca impulsy, 11 - elektronowy czasomierz, 12 - rozdzielacz

zmianami temperatury i ciśnienia mierzonego strumienia oleju. W przepływomierzach tłokowych średnie natężenie przepływu określone jest poprzez pomiar czasu, w którym ciecz wypełni objętość pomiarową. W opisywanym przepływomierzu sprowadza się to do pomiaru czasu, w którym tłok /1/



poruszając się z uśrednioną prędkością cieczy w cylindrze /2/ na odcinku 1, wyznaczonym czujnikami /9/, sygnalizującymi jego przejście, odmierzy objętość skokową  $V_0$ . Sygnały z czujników /9/ przekształcane są za pomocą przetwornika /10/ na impulsy sterujące czasomierz liczący /11/. Dławik /5/, komora /3/ i system zaworów /6/ i /7/ spełniają funkcję przekaźnika czasowego zabezpieczającego układ pomiarowy przed wzrostem ciśnienia w początkowej i końcowej fazie ruchu tłoka. Czujniki użyte do sygnalizacji przejścia tłoka oparte są na elementach fotoelektrycznych. Rozdzielacz obrotowy umożliwia sterowanie ręczne lub hydrauliczne. Szacuje się, że błąd pomiaru opisywanym przepływomierzem nie przekracza 0,1 % przy następujących parametrach pracy:  $p_{\max} = 63 \text{ [MN/m}^2\text{]}$ ,  $Q_{\max} = 100 \text{ [l/min]}$ ,  $\Delta t = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

## 9.2. Przepływomierze prędkościowe - wirnikowe

Prędkościowe przepływomierze pracują w oparciu o zasadę pomiaru średniej prędkości przepływającego strumienia cieczy. Objętość przepływającej cieczy jest związana z prędkością przepływu zależnością:

$$Q = \bar{w} \cdot A \quad (58)$$

gdzie:

$\bar{w}$  - średnia prędkość przepływu cieczy w  $[\text{m/s}]$ ,

$A$  - poprzeczny przekrój przepływu w  $[\text{m}^2]$ .

Natężenie przepływu określa liczba obrotów wirnika, umieszczonego na drodze przepływu strumienia. Przyjmuje się, że liczba obrotów wirnika "n" jest proporcjonalna do średniej prędkości przepływu strumienia:

$$n = k \cdot \bar{w} \quad (59)$$

zatem

$$n = k \frac{Q}{A} \quad (60)$$

gdzie:

$k$  - współczynnik proporcjonalności charakteryzujący mechaniczne i hydrodynamiczne własności przyrządu.



Z ostatniego wzoru wynika, że liczba obrotów wirnika jest proporcjonalna do natężenia przepływu cieczy.

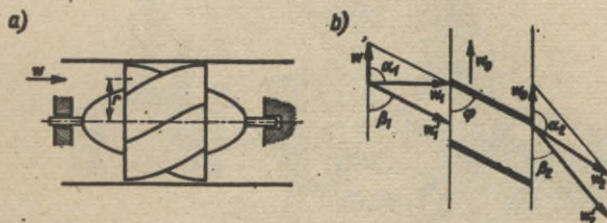
W zależności od ukształtowania wirnika przepływomierze prędkościowe dzielą się na dwie grupy: przepływomierze z wirnikami śrubowymi i przepływomierze z wirnikami skrzydełkowymi. Przepływomierze z wirnikami śrubowymi stosowane są do pomiaru dużych przepływów cieczy w szerokim zakresie ich lepkości. Liczba obrotów wirnika śrubowego, pokazanego na rys. IV-86a, jest proporcjonalna do średniej prędkości przepływu  $\bar{w}$  i odwrotnie proporcjonalna do skoku łopatki  $l$ :

$$n = k \cdot \frac{\bar{w}}{l} \quad (61)$$

czyli

$$n = k \cdot \frac{Q}{l \cdot A} \quad (62)$$

gdzie:  $l = r \cdot \operatorname{tg} \varphi$



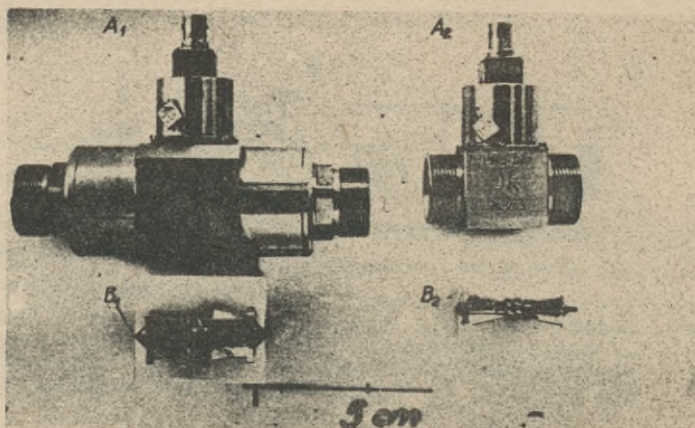
Rys. IV-86. Zasada działania przepływomierza z wirnikiem śrubowym: a/ szkic konstrukcji, b/ rozkład prędkości,  $w_1$  i  $w_2$  prędkość płynu przed i za wirnikiem,  $w_1$  i  $w_2'$  - prędkości płynu względem wirnika,  $w_0$  - prędkość obwodowa wirnika na promieniu  $r$

Na rys. IV-86b pokazano rozkład prędkości z uwzględnieniem kąta nachylenia łopatki wirnika w rozwiniętej płaszczyźnie cylindrycznej o promieniu  $r$ , przecinającej wirnik. W rozumowaniu powyższym pominięto wpływ sił tarcia, jak również wpływ charakteru przepływu. W rzeczywistości na wirnik działają siły tarcia mechanicznego i hydraulicznego zależne głównie od ukształtowania wirnika, jego masy, naporu hydraulicznego, lepkości i współczynnika tarcia. Z analizy pracy tego typu przepływomierzy wynika, że na ich wskazania największy wpływ mają zmiany lepkości. Z tych to względów przepływomierze wirnikowe poddawane są ce-



chowaniu dla danego rodzaju cieczy przy określonych warunkach temperaturowych.

Stała czasowa przepływomierzy wirnikowych zależy od masy i konstrukcji wirnika, od lepkości czynnika oraz od natężenia przepływu /maleje ze wzrostem  $Q$ /. Wartość stałej czasowej typowych konstrukcji leży poniżej  $0,1$  [s], co umożliwia zastosowanie wyż.wym. przepływomierzy przy badaniach procesów nieustalonych. Pomiar obrotów wirnika przepływomierzy wirnikowych dokonywany jest najczęściej przy wykorzystaniu czujników tachometrycznych indukcyjnych lub impulsowo-cyfrowych metod pomiaru liczby obrotów. Wśród wielu rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy wirnikowych szczególnie wysokimi walorami użytkowymi wyróżnia się cyfrowy przepływomierz elektroniczny typu LMP-446 prod. Instytutu Lotnictwa. W przepływomierzu tym zastosowano czujniki typu PMB, które są wirnikowymi turbinkami indukcyjnymi. Budowę tych czujników pokazuje rys. IV-87. Czujniki te składają się z trzech zasadniczych części: korpusu wykonanego ze stali niemagnetycznej, wirnika wykonanego z permalloyu ułożyskowanego na łożyskach ślizgowych teflonowych oraz zespołu cewki umieszczonego w rdzeniu wykonanym z magnesu stałego.



Rys.IV-87. Czujniki typu PMB... prod.Instytutu Lotnictwa,  $A_1, A_2$  - widok ogólny,  $B_1, B_2$  - wirniki wraz z kierownicami

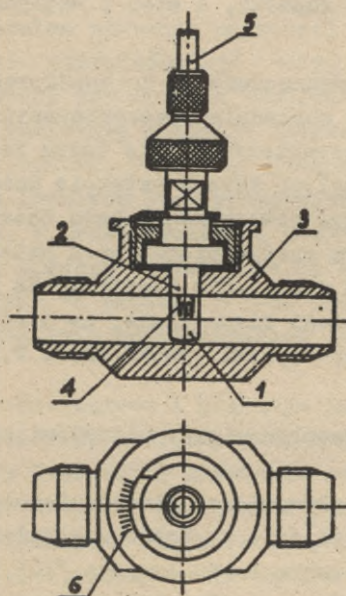
Ciecz przepływając przez kierownicę czujnika uzyskuje określony kierunek strug przed wlotem na łopatki wirnika. Obrót wirnika wywołuje określoną zmianę indukcji magnetycznej w szczelinie między łopatkami wirnika a rdzeniem cewki. Uzyskana w ten sposób zmiana indukcji w szczelinie powoduje indukowanie się na zaciskach cewki SEM, której częstotliwość jest proporcjonalna do liczby łopatek wirnika i jego prędkości kątownej. Uzyskany w ten sposób sygnał jest przekazywany do zliczająco-



analogowego miernika przepływu, który umożliwia jednoczesny pomiar chwilowego i średniego natężenia przepływu. Wyniki pomiaru średniego i całkowitego przepływu ujawnione są w postaci cyfrowej. Przedstawiony przepływomierz przeznaczony jest do pomiaru natężenia przepływu w zakresie  $(1 \div 1000) [l/min]$  /zależnie od zastosowanego czujnika/, przy ciśnieniu do  $32 [MN/m^2]$ . Błąd pomiaru przy użyciu tego typu przepływomierzy sięga 5 %.

### 9.3. Przepływomierze tensometryczne - naporowe

Budowę czujników tej grupy ilustruje schematycznie rys.IV-88. Zasadniczą częścią czujnika jest sprężysta łopatką /1/ zamocowana wspornikowo we wkładce /2/. Łopatką wykonana jest zwykle z brązu berylowego, wkładka zaś z tekstolitu. Elementy te umocowane są w korpusie czujnika



Rys.IV-88. Tensometryczny czujnik do pomiaru przepływu: 1 - łopatką, 2 - wkładka mocująca, 3 - korpus, 4 - tensometry, 5 - kabel elektryczny, 6 - podziałka do ustawienia kąta natarcia łopatki



/3/ w ten sposób, aby możliwe było ustawienie różnych kątów natarcia łopatk. U nasady łopatk. naklejone są dwa tensometry foliowe o bazie pomiarowej 1 [mm] i rezystancji 120[Ω], połączone w układ półmostka. Zasada działania czujnika wykorzystuje zależność wyrażoną wzorem:

$$P_n = C_1 \cdot \bar{w}^2 \quad (63)$$

gdzie:

$C_1$  - współczynnik zależny od gęstości cieczy badanej, powierzchni łopatk., profilu łopatk., kąta natarcia oraz kształtu i średnicy otworu przelotowego w korpusie czujnika,

$\bar{w}$  - prędkość przepływu cieczy,

$P_n$  - siła normalna.

Siła ta wywołuje ugięcie łopatk., a więc i względną zmianę rezystancji tensometru.

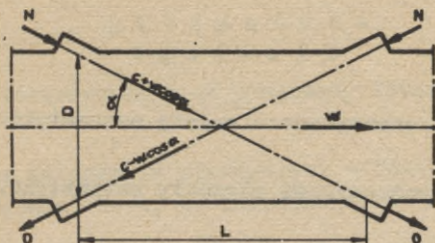
Czujniki tego typu przeznaczone są do współpracy z uniwersalną aparaturą tensometryczną po uprzednim przecechowaniu.

Opisany tu czujnik charakteryzuje się dużym zakresem mierzonych przepływów, przy czym przy małych kątach natarcia można mierzyć duże natężenia przepływu, a w miarę powiększania kąta natarcia czułość czujnika wzrasta przy jednoczesnym spadku mierzalnych natężeń przepływu /dopuszczalnych ze względu na obciążenie łopatk./ . Za pomocą opisanego czujnika mierzyć można przebiegi nieustalone, co jest jego dużą zaletą. Częstotliwość drgań własnych łopatk. wynosi około 2,5 [kHz].

#### 9.4. Przepływomierze ultradźwiękowe

Zasada działania przepływomierzy ultradźwiękowych oparta jest na pomiarze różnicy czasów przejścia sygnałów przesyłanych w kierunku zgodnym i przeciwnym do kierunku ruchu czynnika /lub pod kątem do tego kierunku/, tak że do prędkości sygnału ultradźwiękowego dodaje się lub odejmuje się odpowiednia składowa prędkości przepływu, rys. IV-89. Metody pomiarów różnicy czasów przejścia sygnałów emitowanych "z prądem" i "pod prąd" mogą być różne i rzutują w sposób zasadniczy na podstawowe własności metrologiczne przepływomierza i jego konstrukcję. W tym aspekcie przepływomierze ultradźwiękowe podzielić można na impulsowe, fazowe oraz z krążącym impulsem, zwane także przepływomierzami impulsowo-częstotliwościowymi.





Rys.IV-89. Schemat działania przepływomierza ultradźwiękowego: N, O - nadajniki i odbiorniki sygnałów ultradźwiękowych, w - prędkość przepływu, c - prędkość ultradźwięków w ośrodku badanym,  $\alpha$  - kąt promieniowania sygnału, D - średnica wewnętrzna rurociągu, L - odległość między środkami wiązek sygnałowych na poziomie ścianek rurociągu

Metoda krążącego impulsu wykazuje najwięcej zalet i znana jest pod nazwą /wg terminologii amerykańskiej/ "sing - around". Polega ona na pomiarze częstotliwości powtarzania impulsów w układzie, w którym ultradźwiękowy impuls pomiarowy z chwilą dotarcia do odbiornika umożliwia emisję następnego impulsu. Dla danej długości toru akustycznego częstotliwość powtarzania impulsów jest proporcjonalna do prędkości dźwięku w mierzonym ośrodku. W przepływomierzu ultradźwiękowym, działającym w oparciu o tą zasadę, pracują niezależnie od siebie dwa układy emitujące impulsy w kierunkach "z prądem" i "pod prąd". Średnia prędkość przepływu jest w przybliżeniu proporcjonalna do różnicy częstotliwości powtarzania impulsów.

Przepływomierze ultradźwiękowe z krążącym impulsem wykazują szereg bardzo istotnych zalet, wśród których, jako najważniejsze uznać należy: niewrażliwość na zmiany lepkości i ciśnienia czynnika oraz możliwość przeprowadzenia pomiaru w sposób nie zakłócający przepływu.

Wadą tego typu urządzeń jest skomplikowany układ elektroniczny, jednak gwałtowny rozwój elektroniki w dziedzinie obwodów scalonych pozwala spodziewać się coraz szerszego ich zastosowania.

Przykładem może tu być opracowany przez SARATOGA SYSTEM, IMC /USA/, przepływomierz typ 321, przy użyciu którego można mierzyć przepływ wszelkich czynników płynnych, przy dokładności pomiaru 0,5 %.

W Polsce prace nad konstrukcją przepływomierza ultradźwiękowego prowadzone są obecnie w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, w ramach problemu węzłowego 06.6.1.2.



## K a t a l o g i

1. Katalog 28-R Elektromaszynowe elementy automatyki. WPM "WEMA", Warszawa 1970.
2. Katalog 34-R Elektromaszynowe elementy automatyki. WPM "WEMA", Warszawa 1970.
3. Katalog Disa Uniwersal Induktor, 1973.
4. Katalog firmy Vibrometer AB Fiborg. Szwajcaria 1972.
5. Katalog firmy Brüel-Kjaer 1974.
6. Katalog informacyjny firmy Hottinger 1974.
7. Katalogi i prospekty firmy A.U.Philips, Siemens, Hartmann and Braun, Hottinger.
8. Maszyny elektryczne małej mocy. Selsyny. Wymagania i badania techniczne BN/66/3016-02.
9. Katalog firmy Schlumberger 1973-1974 "Instruments and Systems".



## L i t e r a t u r a

- [1] A.Ambroziak: Półprzewodnikowe przyrządy fotoelektryczne. MON, Warszawa 1962.
- [2] Biuletyn Mera: Automatyka przemysłowa - Aparatura pomiarowa - Maszyny matematyczne, nr 4, 5, Warszawa 1970.
- [3] Z.Orłóś, Z.Dyląg: Pomiar naprężeń metodą miejscowego odciążenia. Biuletyn WAT, nr 4, 1958.
- [4] Prace Instytutu Mechaniki Precyzyjnej w dziedzinie elektrycznej tensometrii oporowej. Biuletyn IMP nr 21/22, 1960.
- [5] S.Bućko, S.Mazurkiewicz: Laboratorium z wytrzymałości materiałów. Wyd.Polit.Krak., Kraków 1974.
- [6] R.Ciesielski, M.Pieronek: Aparatura do pomiarów drgań budowli o bardzo niskich częstościach. "Czasop. Techn." nr 1, 1970.
- [7] J.S.Czeczot: Mikromaszyny elektryczne w automatyce. WNT, Warszawa 1969.
- [8] O.Dahle: The pressduktor - a high output load-cell for heavy industry ASEA -J32, 1959.
- [9] W.Findeisen: Technika regulacji automatycznej. PWN, Warszawa 1965.
- [10] Z.Faust: Przetworniki fotoelektryczne. Zasada działania, budowa i zastosowanie. WKiŁ Warszawa 1963.
- [11] Z.Gajewski: Termometry. Warszawa 1957.
- [12] H.F.Grawe: Elektrische Messung Nichtelektrischen Grossen. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1962.
- [13] M.N. Gumaniuk: Czujniki magnetosprężyste w automatyce. WNT, Warszawa 1967.
- [14] Z.Hellwig: Elementy rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. PWN, Warszawa 1967.
- [15] R.Hagel: Czujniki magnetoelastyczne do kontroli nacisków walców. IMŻ, sprawozdanie nr 785, 1960.
- [16] A.A.Hruszczew: Fotoelementy. Izd. "Iskusstwo", Moskwa 1965.
- [17] M.Pieronek: Pomiar drgań budynków. "Inż. i Budown.", nr 12, 1969.
- [18] L.Szuwalski, M.Abramowicz: Zastosowanie żywic epoksydowych do klejenia czujników oporowych na betonie i do innych prac w technice laboratoryjnej. "Inż. i Budown.", nr 5, 1963.



- [19] R.G.Kloeffer: Elektronika w przemyśle i automatyce. WNT, Warszawa 1963.
- [20] S.F.Koribow: Osnowy elektroizmierienij elektronnoj techniki i elektroawtomatiki w priborostrojenii. Maszgiz 1959.
- [21] S.Kreczmar: Oscyloskopy magnetoelektryczne. WNT, Warszawa 1970.
- [22] P.P.Kremlewskij: Dinamiczeskije charekterystiki dinamometrow. Wyd.-IV, Maszgiz, 1959.
- [23] R.Kretzman: Zastosowanie elektroniki w przemyśle. PWT, Warszawa 1956.
- [24] W.Krzyś, M.Życzkowski: Sprężystość i plastyczność. Wybór zadań i przykładów. PWN, Warszawa 1962.
- [25] M.W.Kużakow: Pomiarы technologiczne i aparatura kontrolno-pomiarowa w przemyśle chemicznym. NOT, Warszawa 1972.
- [26] T.Kuratow: Pomiarы przepływów cieczy, par i gazów. Wyd. "Śląsk", 1965.
- [27] K.Lebson: Podstawy miernictwa elektrycznego. Warszawa 1966.
- [28] K.Leibler: Zastosowanie metod fizycznych w badaniach technicznych. PWN, Warszawa 1959.
- [29] K.S.Lion: Przyrządy do badań naukowych. WNT, Warszawa 1962.
- [30] A.Lisowski, A.Siemieniec: Podstawy doświadczalnej analizy naprężeń i odkształceń. PWN, Warszawa 1966.
- [31] M.Łapiński: Czujniki pomiarowe, budowa i zastosowanie. PWT, Warszawa 1957.
- [32] M.Łapiński: Miernictwo teleelektryczne. Wzorce i mierniki. Warszawa 1960.
- [33] M.Łapiński: Miernictwo teleelektryczne. Pomocniczy sprzęt pomiarowy. WKiŁ, Warszawa 1962.
- [34] M.Łapiński, W.Włodarski: Miernictwo elektryczne wielkości nieelektrycznych. Warszawa 1970.
- [35] Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Instytutu Lotnictwa w Warszawie, Warszawa 1964.
- [36] Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Instytutu Lotnictwa w Warszawie, 1968.
- [37] Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Instytutu Lotnictwa w Warszawie, 1972.



- [38] M.Pieronek: Osobliwości pomiarów drgań budynków. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Komisji Nauki PZITB w Krakowie, 1971.
- [39] M.Pieronek: Aparatura do pomiarów drgań budynków. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Komisji Nauki PZITB w Krakowie, 1972.
- [40] S.Mazurkiewicz: Laboratorium doświadczalnej analizy naprężeń i odkształceń. Wyd. Polit.Krak., Kraków 1972.
- [41] J.Massalowa, T.Massala: Elektryczne pomiary wielkości mechanicznych. PWN, Warszawa 1971.
- [42] L.Michalski, K.Eckersdorf: Pomiary temperatury. WNT, Warszawa 1969.
- [43] A.Morecki: Miernictwo mechanicznych parametrów maszyn metodami elektrycznymi. PWN, Warszawa 1972.
- [44] J.Nizioł: Metodyka rozwiązywania zadań z mechaniki. Wyd. Polit. Krak., Kraków 1972.
- [45] P.Nawicki, L.Szklarski, H.Górecki: Podstawy teorii układów automatycznej regulacji. T.II. PWN, Warszawa 1960.
- [46] J.Obalski: Podstawy metrologii. Wyd.Polit. Wrocł., Warszawa 1966.
- [47] J.Oderfeld: Podstawy prac doświadczalnych. Wyd.Polit.Warsz., Warszawa 1968.
- [48] S.Osiecki, S.Ziemba: Podstawy pomiarów drgań mechanicznych. PWN, Warszawa 1968.
- [49] P.M.Pflieger: Pomiary elektryczne wielkości mechanicznych. PWT, Warszawa 1953.
- [50] K.Piszczek, J.Walczak: Drgania w budowie maszyn. PWN, Warszawa 1973.
- [51] Automatyzacja w przemyśle maszynowym. Praca zbiorowa autorów czechosłowackich, niemieckich i polskich. Poradnik 1970.
- [52] Podstawowe pomiary w technice cieplnej. Praca zbiorowa. WNT, Warszawa 1962.
- [53] Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Polit. Wrocł., nr 14, Wrocław 1971.
- [54] Z.Kalewicz, Z.Roliński: Badania nad nowymi klejami oraz materiałami ochronnymi w zastosowaniu tensometrii oporowej. Prace Instytutu Mechaniki, z.30, 1970.
- [55] Z.Roliński: Elektryczne tensometry oporowe. Niektóre praktyczne i teoretyczne uwagi o ich budowie i zastosowaniu. "Prz. Mechan.", nr 9, 1955.



- [56] S.Stryczek: Zastosowanie tensometrii oporowej do badań hydraulicznych układów napędowych. "Prz. Mechan.", nr 123, 1962.
- [57] I.D.Rider: Engineering Electronics. McGraw-Hill, New York 1967.
- [58] Z.Roliński: Zarys elektrycznej tensometrii oporowej. WNT, Warszawa 1963.
- [59] E.Romer: Miernictwo przemysłowe. PWN, Warszawa 1970.
- [60] E.Romer: Pomiar temperatury w technice. Wrocław 1971.
- [61] J.Sawicki: Układy elektroniczne. PWSZ, Warszawa 1969.
- [62] J.Siwiński: Teoria regulacji automatycznej. WNT, Warszawa 1962.
- [63] B.Schmidt, E.Kuźma: Termistory. PWT, Warszawa 1961.
- [64] B.Schor: Termometry elektryczne. PWT, Warszawa 1952.
- [65] A.Sowiński: Cyfrowa technika pomiarowa. WKiŁ, Warszawa 1970.
- [66] S.Steindel: Pomiar ciśnienia. Wyd.Polit.Krak., Kraków 1970.
- [67] I.T.Szefier: Termistory. MON, Warszawa 1959.
- [68] L.Szklarski, W.Pończewski, J.Kolendowski: Dynamika układów elektromechanicznych. PWN, Warszawa 1963.
- [69] W.M.Szliandin: Elementy awtomatiki i telemechaniki. Moskwa 1954.
- [70] W.Makulski: Pomiar drgań w technice lotniczej. "Technika Lotnicza i Astronautyczna", z.3, 1963.
- [71] S.S.Tichmenew: Elementy tocznych przyborów. Moskwa 1966.
- [72] A.M.Turiczin: Elektriczeskije izmierienija nieelektriczeskich wieliczin. Moskwa 1966.
- [73] J.Walczak: Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. T.I, II, III, IV. PWN, Kraków 1971.
- [74] S.Węgrzyn: Podstawy automatyki. PWN, Warszawa 1963.
- [75] H.Wiedmar: Pomiar, sterowanie, regulacja. WNT, Warszawa 1968.
- [76] C.Woźniak: Podstawy dynamiki ciał odkształcalnych. PWN, Warszawa 1969.
- [77] T.Zagajewski, S.Malzacher, A.Kwieciński: Elektronika przemysłowa. WNT, Warszawa 1972.
- [78] J.Zawadzki: Drgania układów liniowo sprężystych. PWN, Wrocław 1953.
- [79] R.Ciesielski, A.Gumiński, M.Pieronek: Doświadczenia z badań dynamicznych mostów. Zesz.Nauk.Polit.Śląs., nr 20, 1967.
- [80] Wstęp do pomiarów dynamicznych. Zesz.Nauk.Polit.Szczec., nr 48,



- [81] S. Ziemia: Analiza drgań. PWT, Warszawa 1957.
- [82] R. Zimmermann: Pomiar naprężeń i drgań metodami elektrycznymi. PWT, Warszawa 1959.
- [83] R. Zimmermann: Przyrządy do rejestracji i analizy wielkości elektrycznych i nieelektrycznych. WKiŁ, Warszawa 1971.



10,00









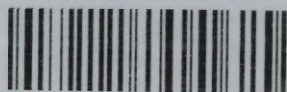
Archiwum

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



A-717

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000334617