Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

LABORATORIUM
POMIARU WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH
METODAMI ELEKTRYCZNYMI

POMIARY ODKSZTAŁCEŃ I NAPRĘŻEŃ MECHANICZNYCH

POMIARY ODKSZTAŁCEŃ I NAPRĘŻEŃ MECHANICZNYCH

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości tensometrów oporowych, metod pomiaru odkształceń i naprężeń mechanicznych w materiałach konstrukcyjnych, za pomocą tensometrów oraz przeprowadzenia pomiarów odkształceń statycznych w badanym elemencie.

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Zasada pomiaru odkształceń za pomocą tensometrów rezystancyjnych

Pomiar odkształceń za pomocą tensometru rezystancyjnego opiera się na zjawisku zmiany rezystancji tensometru spowodowanej jego odkształceniem, zgodnym z odkształceniem badanego ciała. Tensometr przykleja się w wybranym miejscu badanego ciała, najczęściej na powierzchni. Pod wpływem obciążenia badane ciało odkształca się wraz z tensometrem, wskutek czego zmieniają się wymiary tensometru, a więc i jego rezystancja. Wydłużenie tensometru powoduje wzrost jego rezystancji, a skrócenie - malenie rezystancji.

Działanie tensometru metalowego można rozważyć wychodząc ze znanego związku między rezystancją przewodnika R, jego długością 1, przekrojem s i rezystywnością ρ

$$R = \frac{l \cdot \rho}{S} \tag{1}$$

Logarytmując powyższą zależność a następnie różniczkując i przechodząc do przyrostów skończonych otrzymamy

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{\Delta s}{s} \tag{2}$$

Wielkość $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$ jest wydłużeniem względnym. Zmiana długości przewodnika powoduje zmianę wymiarów poprzecznych. Stosunek tych zmian określa liczba Poissona ν, dla przewodnika o średnicy d

$$\nu = -\frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} \tag{3}$$

Uwzględniając zależność na przekrój poprzeczny przewodnika $s = \frac{\pi d^2}{4}$ otrzymuje się związek pomiędzy przyrostem względnym przekroju poprzecznego a wydłużeniem względnym

$$\frac{\Delta s}{s} = 2\frac{\Delta d}{d} = -2\nu\frac{\Delta l}{l} \tag{4}$$

Po podstawie wzoru (4) do równania (2) otrzymamy

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\frac{\Delta l}{l}}{1}(1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{5}$$

i dalej

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\nu + \gamma \tag{6}$$

Tak określony współczynnik k, będący miarą względnej czułości tensometru metalowego, w praktyce z wystarczającym przybliżeniem może być uważany za wielkość stałą, dlatego nosi nazwę stałej tensometru.

Wielkość $\gamma_m = \frac{\Delta\rho}{\rho} / \frac{\Delta l}{l}$ zwana jest współczynnikiem elastorezystywności i określa zmiany rezystywności drutu powodowane jego odkształceniem, może być w obszarze odkształceń sprężystych dla wielu metali przyjęta za w przybliżeniu równą zero. Dla tych metali stalą tensometru określa zależność

$$k = 1 + 2\nu \tag{7}$$

Stała Poissona ν dla większości metali i stopów zawiera się w przedziale ν= 0,25÷0,5, to stała tensometrów metalowych winna mieścić się w przedziale k=1,5÷2,0. Doświadczalnie wyznaczone wartości stałych tensometrów wynoszą od -12 do 6,5 (-12÷6,5), co wskazuje na zmianę rezystywności drutu z naprężeniem. W tabeli 1. podano właściwości elektryczne i wartości stałych najczęściej używanych materiałów do wyrobu tensometrów metalowych.

Tabela 1. Właściwości stopów tensometrycznych.

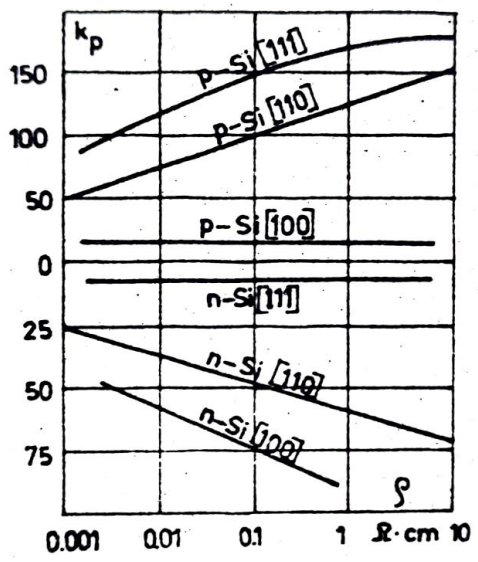
Nazwa stopu	**Skład chemiczny**	**k**	**ρ**	**Temperaturowy współczynnik**		**SEM**	ε_{max}
				rezystywności	**rozszerzalności**		
	%		**Ω mm²/m**	**10^{-5} 1/K**	**10^{-5} 1/K**	**μV**	**%**
Konstyntan	40 Ni 60 Cu	2,1	0,5	-5:5	1,4:1,5	45	~4
Niohrom	80 Ni 20 Cr	2,1	1	15:17	1,4	20	~5
Chromel C	65 Ni 12 Cr 23 Fe	2,5	1	10:50	1,5	17	~5
Elinwar	36 Ni 8 Cr 55 Fe 0,5 Mn	3,6	1,1	30		4	~8
Nikiel	100 Ni	12	0,11	540	1,2		~5

Dużo większe czułości uzyskuje się w tensometrach półprzewodnikowych monokrystalicznych. Dla tego typu tensometrów obowiązuje również zależność (6), określająca stałą tensometru. Zasadnicza różnica polega na tym, że dla metali można było przyjąć wartość współczynnika elastorezystywności $\gamma_m \approx 0$, natomiast dla półprzewodników wartość ta znacznie różni się od zera $\gamma_p \gg 0$, przy czym zwykle zachodzi relacja

$$\gamma_p \gg 1 + 2\nu \tag{8}$$

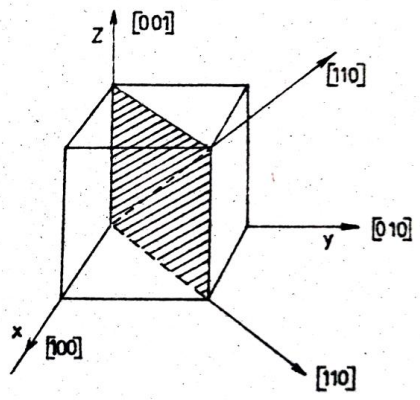
Tak więc współczynnik czułości względnej tensometrów półprzewodnikowych k_p jest określony głównie współczynnikiem elastorezystywności półprzewodnika

$$k_p = \gamma_p \tag{9}$$



Rys. 1. Zależność współczynnika czułości odkształceniowej k_p w funkcji rezystywności tensometru krzemowego dla różnych kierunków cięcia i rodzaju półprzewodnika.

Wartość k_p jest rzędu -130÷220, może być dodatnia lub ujemna, przy czym zależy ona od rodzaju półprzewodnika, koncentracji domieszek, temperatury oraz orientacji osi krystalicznych względem kierunku cięcia w monokrysztale półprzewodnika (rys. 1). Największą czułość odkształceniową k_p wykazują krzem i german zawierające domieszki typu n i p pracujące w obszarze nasycenia. Monokrystaliczne tensometry półprzewodnikowe wykazują właściwości anizotropowe tzn. mają różne właściwości tensometryczne dla różnych kierunków działającego odkształcenia. Najczęściej są stosowane cięcia wzdłuż osi krystalograficznych 111 lub 100 (rys. 2), gdyż dla tych cięć występują maksymalne wartości stałej k_p.



Rys. 2. Osie krystaliczne i główne kierunki cięć w kryształach germanu i krzemu.

Jak wiadomo, zgodnie z prawem Hooke'a w granicach odkształceń sprężystych dla jednoosiowego stanu naprężeń obowiązuje zależność

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{s \cdot E} = \frac{\sigma}{E} \tag{10}$$

w której:

F – siła działająca w przekroju elementu [N],
S – przekrój poprzeczny elementu [m^2],
E – moduł Younga [N/m^2],
σ – naprężenie jednostkowe [N/m^2],
ε – wydłużenie względne.

ε jest wielkością bezwymiarową. W praktyce podawane jest w $^o/_o$, $^o/_{oo}$ lub w umownych jednostkach mikrodeformacji μD (1μD odpowiada $\frac{\Delta l}{l} = 10^{-6}$). Tensometry po naklejeniu na badany element konstrukcyjny, poddany jednoosiowemu stanowi naprężeń, którego odkształcenie ma być określone, umożliwiają proste wyznaczenie tych odkształceń na podstawie znajomości stałej k użytych tensometrów i zmierzonej wartości $\frac{\Delta R}{R}$ z zależności

$$\varepsilon = \frac{1}{k} = \frac{\Delta R}{R} \tag{11}$$

Pośrednio, znając właściwości materiału, z którego wykonany jest badany element (moduł Younga), można wyznaczyć również na podstawi zależności (10) naprężenie istniejące w elemencie w miejscu naklejenia tensometru.

W przypadku ogólnym dwuosiowego stanu naprężeń, w celu określenia wielkości naprężeń głównych oraz kierunków ich działania, zachodzi potrzeba pomiaru odkształceń w trzech różnych obranych dla danego punktu kierunkach. Praktycznie realizuje się to przez naklejenie na badanym elemencie układu trzech lub czterech tensometrów usytuowanych względem siebie pod odpowiednimi kątami, tzw. rozet tensometrycznych.

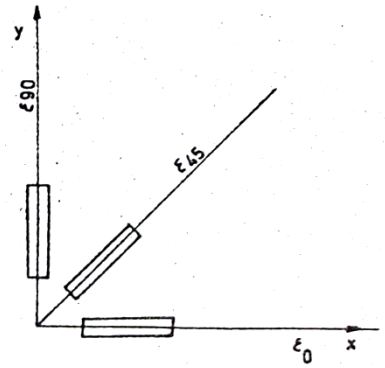
Ze względu na kąty między tensometrami w rozecie, rozróżnia się rozety prostokątne, delta i T-delta. Dla rozety prostokątnej (rys. 3) odkształcenia główne wyznacza się z zależności:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \tag{12}$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \tag{13}$$

Kąt α_g zawarty między kierunkiem ε maxi osią x, wzdłuż której mierzy się odkształcenie ε_0 wyznacza się z zależności

$$\mathrm{tg}2\alpha_g = \frac{2\varepsilon_{45}-(\varepsilon_0+\varepsilon_{90})}{\varepsilon_0-\varepsilon_{90}} \tag{14}$$



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia tensometrów w rozecie prostokątnej.

Naprężenia główne określają zależności:

$$G_{max} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{max} + \gamma\varepsilon_{min}) \tag{15}$$

$$G_{min} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{min} + \gamma\varepsilon_{max}) \tag{16}$$

A wartość maksymalne naprężenia statycznego

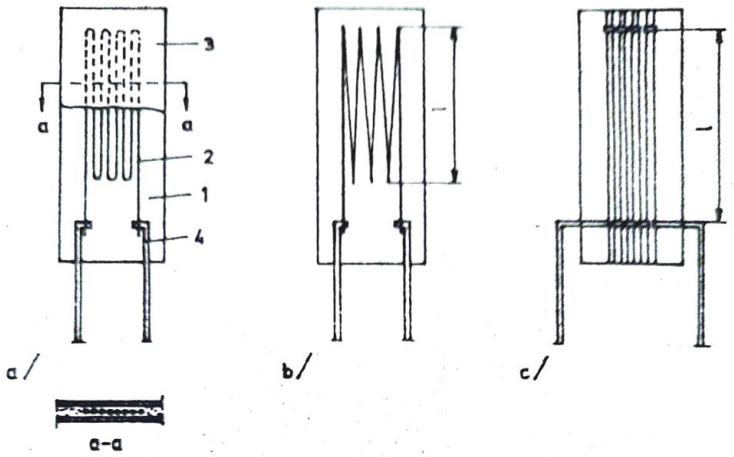
$$T_{max} = \gamma_{max}\frac{E}{2(1+\nu)} \tag{17}$$

$$\frac{\gamma_{max}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{(\varepsilon_0-\varepsilon_{45})^2+(\varepsilon_{45}-\varepsilon_{90})^2} \tag{18}$$

2.2. Budowa i rodzaje tensometrów

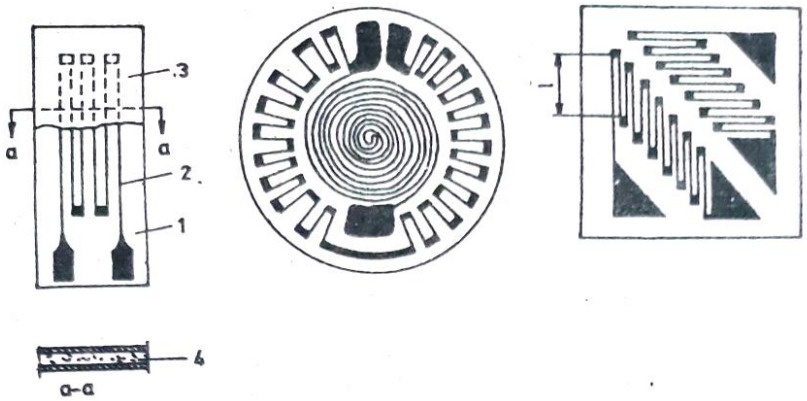
Tensometr rezystancyjny stanowi element tensoczuły z odprowadzeniami elektrycznymi wklejony między dwie warstwy papieru lub odpowiedniej folii. Dolna warstwa papieru lub folii – podkładka, wraz z warstwą kleju spełniają rolę zarówno elementów przenoszących odkształcenie badanego przedmiotu, jak i rolę dielektryka w stosunku do metalowych powierzchni elementu badanego. Górna warstwa papieru lub folii – nakładka, stanowi zabezpieczenie elementu tensoczułego przed uszkodzeniami mechanicznymi i nagłymi zmianami temperatury.

W zależności od rodzaju elementu tensoczułego rozróżniamy trzy podstawowe typy tensometrów: drutowe, foliowe i półprzewodnikove. Na rysunkach 4., 5. i 6. przedstawiono wybrane konstrukcje omawianych typów tensometrów.



Rys. 4. Tensometry drutowe: a) wężykowy, b) zygzakowy, c) kratowy; 1 – podkładka nośna, 2 – siatka rezystancyjna, 3 – nakładka ochronna, 4 – odprowadzenia.

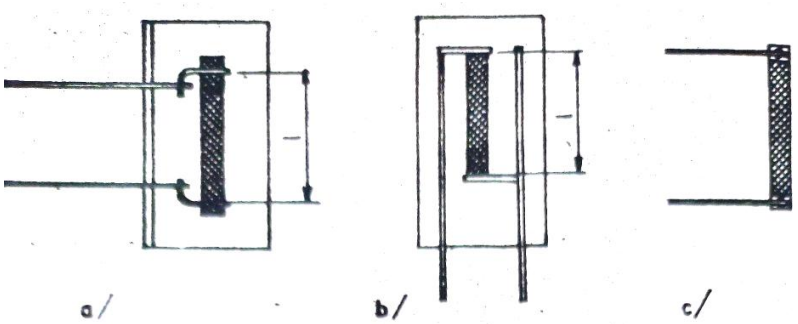
Tensometry drutowe w zależności od rodzaju wykonania siatki rezystancyjnej dzielimy na: wężykowe, zygzakowe i kratowe (rys. 4). Tensometry wężykowe i zygzakowe reagują nie tylko na odkształcenia działające wzdłuż osi podłużnej tensometru, ale także w niewielkim stopniu na odkształcenie poprzeczne. Efekt ten jest spowodowany występowaniem na każdym zagięciu siatki rezystancyjnej odcinka drutu w kierunku poprzecznym i uwidacznia się zmniejszeniem wartości współczynnika czułości odkształceniowej tensometru, szczególnie dla małych wartości baz. Za bazę tensometru przyjmuje się czynną długość elementu tensoczułego. Na rys. 4., 5. i 6. zaznaczono bazy literą 1. Lepsze właściwości kierunkowe mają tensometry kratowe, w których siatka rezystancyjna składa się z pojedynczych odcinków drutu łączonych na końcach taśmą o dużej powierzchni.



Rys. 5. Tensometry foliowe: a) pojedynczy, b) membranowy, c) dwugałęziowy do pomiaru odkształceń przy skręcaniu; 1 – podkładka nośna, 2 – siatka rezystancyjna, 3 – kładka ochronna, 4 – klej.

Tensometry foliowe wykonuje się metodą fotochemiczną, która pozwala na otrzymanie najbardziej skomplikowanych kształtów tensometrów. Tensometry foliowe mają lepsze warunki chłodzenia w porównaniu z drutowymi, można więc do ich zasilania stosować większe wartości prądów. Prócz tego tensometry foliowe są bardziej podatne na deformacje ze względu na lepszą więź z badanym obiektem. Na rys. 5. pokazano przykładowe konstrukcje tensometrów foliowych.

Tensometry półprzewodnikowe wykonuje się najczęściej w postaci pręcików wyciętych z monokryształów krzemu lub germanu wklejonych pomiędzy podkładkę i nakładkę (rys. 6. a), b). Podkładka i nakładka wykonane są z cienkiej folii z żywic epoksydowych. Wytwarzane są również tensometry
w postaci samych pręcików z odprowadzeniami rys. 6. c) (np. WDH 111, 112). Odprowadzenia prądowe od elementu tensoczułego wykonywane są z drutów lub taśm ze złota, niklu lub miedzi. Styki odprowadzeń z półprzewodnikiem, oprócz małej rezystancji i trwałości, winny nie wykazywać właściwości prostujących. Wykonuje się je za pomocą zgrzewania, spawania, napylania, termokompresji lub elektrochemicznie.



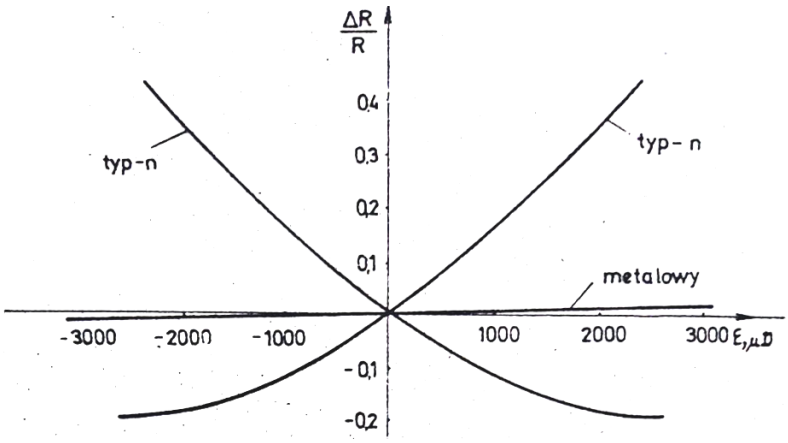
Rys. 6. Tensometry półprzewodnikowe: a), b) – z podkładką c) bez podkładki.

2.3. Właściwości statyczne tensometrów

Podstawowe właściwości statyczne tensometrów różnych typów zestawiono w tabeli 2. Można stwierdzić, że tensometry metalowe wykazują lepszą liniowość i są mniej wrażliwe na zmiany temperatury niż tensometry półprzewodnikowe. Z tych powodów do pomiarów o dużej dokładności stosowane są nadal tensometry metalowe. Bardzo duży współczynnik czułości odkształceniowej tensometrów półprzewodnikowych pozwala na realizację pomiarów bardzo małych odkształceń rzędu 0,001% z wykorzystaniem standardowej aparatury tensometrycznej lub odkształceń o wartościach powyżej 0,1% z zastosowaniem prostych urządzeń pomiarowych.

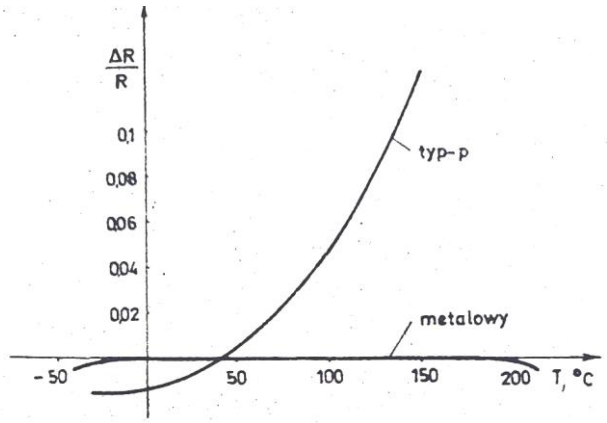
Tabela 2. Właściwości statyczne tensometrów rezystancyjnych.

Typ tensometrów / **Wielkość charakterystyczna**	**Drutowe**	**Foliowe**	**Półprzewodnikowe**
Materiał elementu tensoczułego	Konstantyn Nichrom Elinwar		Ge i Si z domieszkami typu n i p
	Drut ⌀ 12÷50 μm	Folia o grubości 3÷8 μm	Grubość 0,02÷0,1 mm
Rezystancja [Ω]	120÷100 Wartości znormalizowane: 120, 300, 350, 500, 600, 1000		10÷100000
Długość bazy pomiarowej l [mm]	3÷150	0,2÷150	0,2÷20
Współczynnik czułości odkształceniowej k	2,1 – Konstantyn 2,1 – Nichrom 3,6 – Elinwar		-130÷200
Nieliniowość [%]	±0,1 (ε< 4%) ±1 (ε < 1%)		1 (ε < 0,5%)
Próg czułości odkształceniowej ε [μD]	0,1	0,1	0,001
Zakres mierzonych odkształceń ε [%]	±3 ÷ ±5	±5	
Odkształcenia niszczące ε [%]	20	20	3÷5
Prąd dopuszczalny maksymalny [mA]	10÷50	30÷650	1÷35
Trwałość dynamiczna liczby cykli odkształceń	10^7	10^7	10^6
Współczynnik temperaturowy rezystancji $\alpha_R = \frac{\Delta R}{R}/1K$	$3{,}9\ 10^{-6} \div 6\ 10^{-3}$	$\pm 10^5$	$5 \div 9\ 10^3$
Współczynnik temperaturowy czułości odkształceniowej $\alpha_k = \frac{\Delta k}{k}/1K$	$\sim 5\ 10^{-6}$		$-6\ 10^{-6} \div -3\ 10^{-3}$



Rys. 7. Zależności względnej zmiany rezystancji ΔR/R tensometrów półprzewodnikowych typu n i p oraz metalowych od odkształcenia względnego.

Na rys. 7. przedstawiona typowe przebiegi zależności względnych zmian rezystancji $\frac{\Delta R}{R}$ w funkcji odkształcenia ε dla tensometrów półprzewodnikowych i metalowych, a na rys. 8. wpływ na te zmiany temperatury.



Rys. 8. Typowe zależności względnej zmiany rezystancji tensometrów półprzewodnikowych typu p i metalowych od temperatury.

Wartości liczbowe zmian rezystancji tensometru ΔR, jakie występują podczas pomiaru odkształceń można wyznaczyć następująco: załóżmy, że typowe naprężenia w konstrukcji stalowej mają wartość G=500 N/mm^2, przyjmując modul Younga dla stali E = 2·10^5 N/mm^{2}otrzymany

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{G}{E} = \frac{5{\cdot}10^2\ N/mm^2}{2{\cdot}10^3\ N/mm^2} = 2{,}5 \cdot 10^{-3} = 2500\ \mu D \tag{19}$$

Mierząc tą wartość odkształcenia przy pomocy tensometru metalowego o stałej k_m= 2 otrzymany

$$\frac{\Delta R}{R} = k_m \varepsilon = 5 \cdot 10^{-3} = 0{,}5\%$$

Dla wartości rezystancji tensometru wyniesie R_T=120Ω zmiana rezystancji wyniesienie ΔR=0,6Ω. Gdy zastosujemy do pomiaru odkształcenia tensometr półprzewodnikowy o stałej k_p=150 i R_T=120Ω, otrzymamy

$$\frac{\Delta R}{R} = k_p \varepsilon = 37{,}5\%$$

i

$$\Delta R = 45\Omega$$

Przy założeniu dokładności pomiaru odkształcenia 1% winniśmy zagwarantować pomiar zmian rezystancji ΔR dla tensometru metalowego 6 10^{-3}Ω, a dla półprzewodnikowego 0,45Ω.

2.4. Właściwości dynamiczne tensometrów

Tensometry oporowe mają znikomą masę w porównaniu z masą elementów mierzonych. Można je uważać, w szerokim zakresie częstotliwości zmian odkształceń, za przetworniki bezinercyjne. Przy dużych częstotliwościach mierzonych odkształceń istotnym ograniczeniem powodującym powstawanie błędu pomiaru jest baza pomiarowa tensometru. Zagadnienie to przeanalizujemy dla przebiegu odkształcenia o charakterze sinusoidalnym przedstawionym na rys. 9.

Odkształcenie o częstotliwości f rozchodzi się w materiale w postaci fali o długości λ z prędkością v

$$v = f \cdot \lambda \tag{20}$$

Dla stali v = 5000 m/s.

Przebieg czasowy odkształcenia zapiszemy w formie

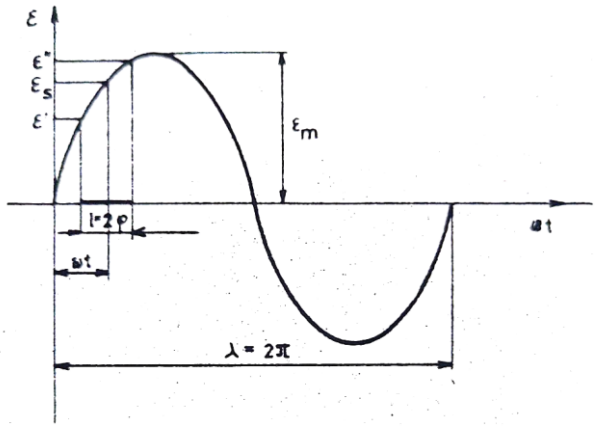
$$\varepsilon = \varepsilon_m \cdot sin\omega t \tag{21}$$

gdzie:

$\omega = 2\pi f$ – pulsacja.

Długość tensometru wyrażona w mierze kątowej jest równa

$$\varphi = \pi\frac{1}{\lambda} \tag{22}$$



Rys. 9. Sinusoidalny przebieg fali odkształcenia mierzony tensometrem o bazie pomiarowej 1.

Średnia wartość względnego odkształcenia mierzona przez tensometr wynosi

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2\varphi}\int_{\omega t-\varphi}^{\omega t+\varphi} \varepsilon_m sin\,\omega t d(\omega t) = \varepsilon_m sin\omega t\frac{sin\varphi}{\varphi} \tag{23}$$

Wykorzystując zależności (21) i (23) błąd dynamiczny tensometru można określić w postaci

$$S_d = \frac{\varepsilon-\varepsilon_0}{\varepsilon} = 1 - \frac{sin\varphi}{\varphi} \tag{24}$$

Dla małych wartości kąta φ funkcję sinφ/φ można rozwinąć w szereg Maclaurina uwzględniając tylko dwa wyrazy

$$\frac{sin\varphi}{\varphi} \approx 1 - \frac{\varphi^2}{6} \tag{25}$$

stąd

$$S_d \approx \frac{\varphi^2}{6} \tag{26}$$

Uwzględniając zależności (20) i (22), otrzymany

$$S_d = \frac{1}{6}(\frac{\pi l}{\lambda})^2 = \frac{1}{6}(\frac{\pi l f}{v})^2 \tag{27}$$

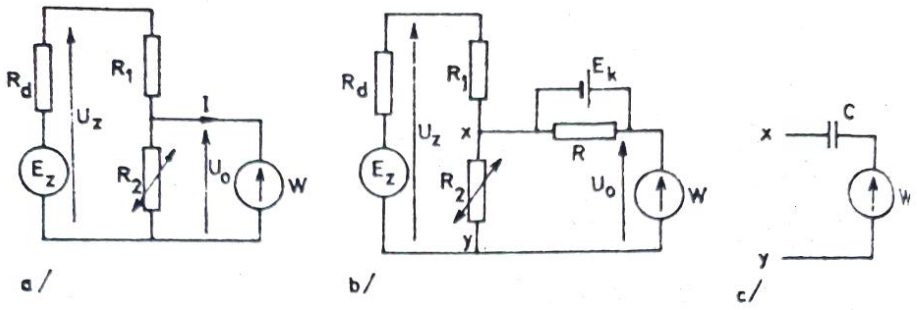
Zakładając: dopuszczalną wartość błędu dynamicznego S_d i wartość bazy tensometru 1, częstotliwość graniczna tensometru wynosi

$$f_g = \frac{v}{\pi l}\sqrt{6 \cdot S_d} \tag{28}$$

Na przykład przy tensometrach o wartości bazy 1=10 min zakres częstotliwości odkształceń mierzonych z dokładnością S_d< 1% wynosi 0 - 40 kHz.

2.5. Układy (pracy) połączeń tensometrów oporowych

Układy połączeń tensometrów umożliwiają przekształcenie niewielkich zmian rezystancji tensometrów na dostatecznie duże wartości prądów lub napięć. Stosowane są w tensometrii dwa typy układów: potencjometryczny (dzielnik napięcia) i mostkowy. Układ potencjometryczny stosowany jest wyłącznie do pomiarów odkształceń stałych jak i zmiennych w czasie. Układ mostkowy jest podstawowym układem połączeń tensometrów, stosowany jest zarówno w pomiarach odkształceń stałych jak i zmiennych w czasie. Pokażemy zasadnicze właściwości tych układów w zastosowaniu do pomiarów tensometrycznych.



Rys. 10. Dzielnik napięcia: a) układ podstawowy, b) kompensacja składowej stałej dodatkowym źródłem E_k, c) oddzielenie składowej stałej kondensatorem.

Na rys. 10. pokazano układ dzielnika napięcia utworzony z rezystora stałego R_1, oraz tensometru o rezystancji R_2. Przy rezystancji wskaźnika $R_w = \infty$ napięcie na wskaźniku U_0 ma wartość

$$U_0 = U_Z \cdot \frac{R_2+\Delta R_2}{R_1+R_2+\Delta R_2} \tag{29}$$

Interesującymi są zmiany rezystancji, podzielny więc licznik i mianownik przez R_2

$$U_0 = U_Z \cdot \frac{1+\frac{\Delta R_2}{R_2}}{1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{\Delta R_2}{R_2}} \tag{30}$$

Dla skończonej wartości rezystancji wskaźnika należy uwzględnić spadek napięcia na rezystorze R_1 od prądu I

$$U_0 = \frac{1+\frac{\Delta R_2}{R_2}}{1+\frac{R_1}{R_2}+\frac{\Delta R_2}{R_2}}(U_Z - R_1 I) \tag{31}$$

Zakładając równość obu rezystorów otrzymany

$$U_0 = \frac{1+\frac{\Delta R}{R}}{2+\frac{\Delta R}{R}} \cdot U \tag{32}$$

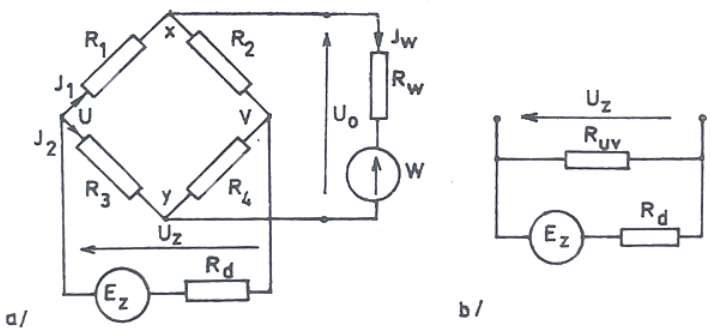
gdzie

$$U = U_z - R_1 \cdot I$$

Rozkładając wyrażenie (32) w szereg potęgowy oraz uwzględniając tylko dwa pierwsze wyrazy otrzymamy

$$U_0 = \frac{U}{2} + \frac{U}{4}\frac{\Delta R}{R} \tag{33}$$

Tak więc gdy by wyeliminować pierwszy człon wyrażenia (33) stanowiący składową stałą napięcia wyjściowego dzielnika napięcia, napięcie wyjściowe byłoby wprost proporcjonalne do względnych zmian rezystancji tensometru. Eliminację składowej stałej realizuje się dwoma sposobami: dla powolnych przebiegów kompensując ją napięciem włączonym przeciwnie (rys. 10. b), a dla przebiegów szybko zmiennych oddzielając ją kondensatorem od wskaźnika (rys. 10. c).



Rys. 11. Układ połączeń tensometrów w mostek Wheatstone'a: a) układ zasadniczy, b) schemat zastępczy dla uwzględnienia rezystancji źródła zasilania.

Mostek Wheatstone'a (rys. 11) stanowi podstawowy układ połączeń dla tensometrów oporowych. Tensometry spełniają rolę rezystorów R_1 – R_4. Napięcie pomiarowe mostka U_0 jest funkcją wartości rezystorów R_1 – R_4 i napięcia zasilania U_Z. Na początek pomińmy rezystancję źródła zasilania $R_d = 0$ a więc $E_Z = U_Z$. Rozważmy dwa przypadki obciążenia mostka mające duże znaczenie praktyczne: pierwszy $R_w = \infty$ i $I_w = 0$ i drugi R_w ma wartość skończoną i prąd wskaźnika $I_w > 0$.
Dla przypadku pierwszego $I_w = 0$ napięcie pomiarowe U_0 wyznaczamy jako różnicę napięć dwu dzielników, z których składa się mostek R_1 / R_2 i R_3 / R_4

$$U_0 = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_3 = U_Z\left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4}\right) \tag{34}$$

$$I_1 = \frac{U_Z}{R_1+R_2} \tag{35}$$

$$I_2 = \frac{U_Z}{R_3+R_4} \tag{36}$$

A po uporządkowania wyrażenia (34) otrzymujemy

$$U_0 = \frac{R_1R_4-R_2R_3}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}U_Z \tag{37}$$

Zależności (34) – (37) są podstawowymi dla układu mostkowego współpracującego z woltomierzem lub wzmacniaczem elektronicznym.

Dla przypadku, w którym wartość rezystancji R_W, nie jest dostatecznie duża, prąd płynący przez wskaźnik można wyznaczyć z twierdzenia Thevenina

$$I_w = \frac{E_{xy}}{R_{xy}+R_w} \tag{38}$$

$$R_{xy} = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} + \frac{R_3R_4}{R_3+R_4} \tag{39}$$

gdzie:

$E_{xy} = U_0$ – napięcie w stanie jałowym przy $R_w = \infty$ określone zależnością (37)

Po uwzględnieniu zależności (37) i (39) w zależności (38) i uporządkowaniu otrzymamy

$$I_w = \frac{R_1R_4-R_2R_3}{R_1+R_2(R_3+R_4)+R_3+R_4(R_1+R_2)+R_w(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \tag{40}$$

Prąd I_w wytworzony na rezystancji R_w spadek napięcia określony

$$U_0 = \frac{R_1R_4-R_2R_3}{R_1R_2(R_3+R_4)R_w+R_3R_4(R_1+R_2)R_w+(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \tag{41}$$

Dla dużych wartości rezystancji R_w wyrażenie (41) przyjmuje formę wyrażenia (37). Zależności (40) i (41) są podstawowymi dla układu mostka współpracującego bezpośrednio z woltomierzem cyfrowym.

Ze względu na powszechność stosowania wzmacniaczy elektronicznych do współpracy z tensometrami oporowymi rozważymy bliżej zachowanie się układu mostkowego pod wpływem zmian

rezystancji tensometrów R_1 – R_4 gdy $R_w \to \infty$. Pod wpływem mierzonej wielkości zmienia się jedna lub więcej rezystancji w gałęziach mostka. Ogólnie rezystancję gałęzi mostka zapiszemy

$$R_n = R_{no} + \Delta R_n \tag{42}$$

W zastosowania praktycznych przyjmuje się najczęściej

$$R_{10} = R_{20} = R_{30} = R_{40} = R \tag{43}$$

Jeżeli przyjąć:

$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R + \Delta R_2 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R + \Delta R_4 \end{aligned} \tag{44}$$

Podstawiając zależność (44) do wzoru (37) po przekształceniach otrzymamy

$$U_0 = \frac{1}{2} \frac{U_Z}{(2+\sum_{n=1}^{4} \frac{\Delta R_n}{R})} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R}\right) \tag{45}$$

Dla małych przyrostów ΔR_n składnik $\sum_{n=1}^{4} \frac{\Delta R_n}{R}$ można pominąć w porównaniu z (2) i zależność (45) przyjmie postać

$$U_0 = \frac{U_Z}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R}\right) \tag{46}$$

Z równania (46) wynika, że dla małych odchyleń od stanu równowagi napięcie U_0 jest proporcjonalne do napięcia zasilania i do sumy algebraicznej względnych zmian rezystancji. Przy większych zmianach względnych $\frac{\Delta R_n}{R}$ charakterystyka przetwarzania mostka niezrównoważonego jest nieliniowa.

Rozważamy kilka charakterystycznych przypadków włączenia tensometrów w układ mostkowych.

I. Jeden tensometr czynny poddany odkształceniu rozciągającemu (rys. 12 a)

$$R_1 = R + \Delta R_1 = R + \Delta R \qquad R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0 \tag{47}$$

Podstawiając zależność (47) do wzoru (45) otrzymany

$$U_0 = \frac{1}{2} \frac{U_Z}{(2+\frac{\Delta R}{R})} \frac{\Delta R}{R} \tag{48}$$

Przy dużej wartości odkształcenia, a więc dla dużych wartości $\frac{\Delta R}{R}$ mostek jest nieliniowy. Jeżeli spełniony jest warunek $\frac{\Delta R}{R} < 2$, to

$$U_0 = \frac{U_Z}{4} \frac{\Delta R}{R} \tag{49}$$

lub

$$\frac{U_0}{U_Z} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \tag{50}$$

Względna zmiana napięcia wyjściowego jest równa ¼ (25%) względnej zmiany rezystancji jednego tensometru.

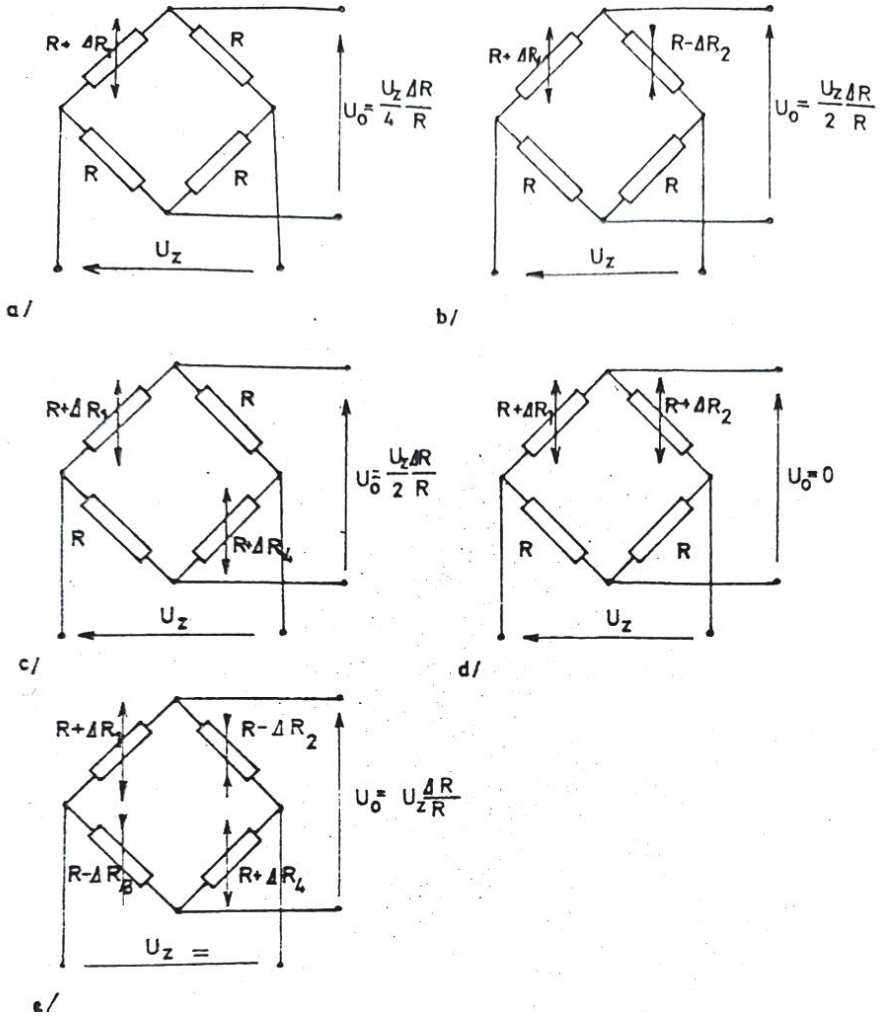
II. Dwa tensometry czynne poddane równym co do wartości, lecz przeciwnym co do znaku odkształceniom, włączone w sąsiednie gałęzie mostka (rys. 12 b)

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R \qquad \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0 \tag{51}$$

Podstawiając zależność (51) do wzoru (45) otrzymamy

$$U_0 = \frac{1}{2}\frac{U_Z}{(2+0)}\left(\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta R}{R}\right) = \frac{U_Z}{2}\frac{\Delta R}{R} \tag{52}$$

Napięcie wyjściowe U_0 jest dwukrotnie większe niż w przypadku I. Układ jest liniowy.



Rys. 12. Sposoby włączenia tensometrów w układ mostka Wheatstone'a.

III. Dwa tensometry poddane jednakowemu co do wartości i znaku odkształceniu (rys. 12c rozciąganie) włączone w przeciwległe gałęzie mostka

$$\Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R \qquad \Delta R_2 = \Delta R_3 = 0 \tag{53}$$

Podstawiając zależność (53) do wzoru (45) otrzymany

$$U_0 = \frac{U_Z}{2+\frac{2\Delta R}{R}}\frac{\Delta R}{R} \tag{54}$$

Jeżeli $\frac{2\Delta R}{R} \ll 2$, to (55)

$$U_0 = \frac{U_Z}{2}\frac{\Delta R}{R} \tag{56}$$

Przy dużych zmianach $\frac{\Delta R}{R}$ układ jest nieliniowy.

IV. Dwa tensometry poddane jednakowemu co do wartości i znaku odkształceniu włączone w sąsiednie gałęzie mostka (rys. 12 d)

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R \qquad \Delta R_3 = \Delta R_3 = 0 \tag{57}$$

Podstawiając zależność (57) do wzoru (45) otrzymamy

$$U_0 = 0$$

V. Cztery poddane jednakowemu co do wartości, lecz przeciwnymi co do znaku parani odkształceniu (rys. 12 e)

$$\Delta R_1 = \Delta R_4 = -\Delta R_2 = -\Delta R_3 = \Delta R \tag{58}$$

Podstawiając zależność (58) do wzoru (45) otrzymamy

$$U_0 = \frac{1}{2}\frac{U_Z}{(2+0)}\frac{4\Delta R}{R} = U_Z\frac{\Delta R}{R} \tag{59}$$

W tym przypadku uzyskujemy czterokrotny wzrost napięcia wyjściowego w porównaniu z jednym tensometrem. Mostek jest liniowy.

Z podanych wyżej zależności wynikają bardzo ważne dla praktyki pomiarowej wnioski. W mostku Wheatstone'a jednakowe zmiany rezystancji tensometrów leżących w przeciwległych gałęziach (np. R_1, R_4) dodają się, natomiast jednakowe zmiany rezystancji tensometrów włączonych w sąsiednie gałęzie (np. ΔR_1, ΔR_2) znoszą się. Te zależności można wykorzystać do zwiększania czułości przetworników i dla kompensacji wielkości wpływowych (np. wpływ temperatury). Jeżeli źródła zasilającego mostek nie można uważać za źródło napięciowe $R_d > 0$, lub gdy rezystancja przewodów łączących mostek z zasilaczem jest duża, wówczas należy uwzględnić wpływ R_d. Schemat zastępczy dla tego przypadku przedstawiono na rys. 11 b).

$$U_Z = E_Z\frac{R_{uv}}{R_d+R_{uv}} \tag{60}$$

W przypadku mostka symetrycznego $R_{uv} = R_{xy} = R$

$$U_Z = E_Z\frac{R}{R+R_d} \tag{61}$$

Taką wartość napięcia należy podstawić do zależności na $U_0 = f(U_Z, R)$, by uwzględnić rezystancję obwodu zasilania.

2.6. Urządzenia pomiarowe tensometrii oporowej

Urządzenia pomiarowe przeznaczone do pomiaru napięcia wyjściowegoz mostków czteroramiennych lub dzielników napięcia, w których włączone są tensometry oporowe noszą nazwę mostków tensometrycznych lub tensometrycznych wzmacniaczy pomiarowych. Urządzenia te wywzorcowane są najczęściej w jednostkach odkształcenia.

Istnieje duża różnorodność typów tych urządzeń. Dokonamy ich podziału przyjmując następujące kryteria: rodzaj napięcia zasilania tensometrów, metodę pomiarową i przeznaczenie. W zależności od napięcia zasilania tensometrów urządzenia pomiarowe dzielimy na stało- i zmiennoprądowe i impulsowe; ze względu na metodę pomiarową na zerowe (mostki zrównoważone) i wychyłowe (mostki niezrównoważone); za względu na przeznaczenie na urządzenia do pomiarów statycznych i dynamicznych.

2.6.1. Mostki tensometryczne prądu stałego

Schematy blokowe niezrównoważonych mostków tensometrycznych prądu stałego przedstawiono na rys. 13. Podstawowymi członami tych mostków są stabilizowane źródła napięcia lub prądu zasilania mostka czujnika i kompensujące oraz wzmacniacz prądu stałego. Pod wpływem mierzonego odkształcenia ε następuje zmiana rezystancji tensometru ΔR_1, powodując wystąpienie napięcia nierównowagi mostka czujnika U_0 określonego zależnością (37). Napięcie U_0 wzmocnione we wzmacniaczu prądu stałego

wskazane przez wskaźnik jest miarą mierzonego odkształcenia. Zmiana znaku odkształcenia ε powoduje zmianę polaryzacji napięcia nierównowagi U_0 a zatem i zmianę kierunku wychylenia wskaźnika. Zgodnie z zależnością (37) napięcie nierównowagi U_0 jest proporcjonalne do napięcia zasilania U_Z, stąd duże wymogi odnośnie stałości źródła zasilania.

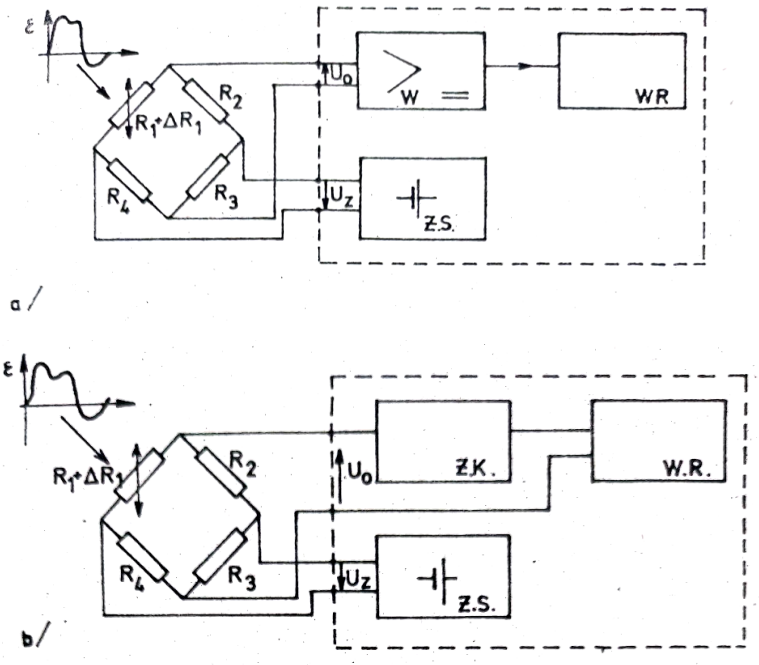
O dokładności mostków prądu stałego decydują w głównej mierze stałość napięć lub prądów zasilających mostek czujnika, a także wahania czułości mostków i wzmacniaczy oraz pełzanie zera (dryft) wzmacniaczy, spowodowane wpływem temperatury.

Stałość napięć i prądów stałoprądowych źródeł zasilania określona jest zwykle stałością parametrów stosowanych diod Zenera. Osiągane stałości wartości napięcia i prądu praktycznie używanych źródeł napięć lub prądów wynosi 10^{-4}/8h – czasowa i 5 10^{-5}/K – temperatura.

Temperaturowy dryft średniej klasy wzmacniaczy prądu stałego jest około dwukrotnie większy niż równoważny dryft średniej klasy wzmacniacza z falą nośną. Stosunek ten jest jeszcze bardziej niekorzystny dla wzmacniaczy prądu stałego przy wyższej klasie porównywanych wzmacniaczy. Wpływ dryftu na dokładność pomiarów jest tym większy, im mniejsze są sygnały uzyskiwane z czujników.

Mostki tensometryczne stałoprądowe mają następujące zalety:

- proste równoważenie mostka czujnika tylko za pomocą regulowanych elementów rezystancyjnych,
- możliwość używania długich kabli do łączenia tensometrów z urządzeniem pomiarowy (nie ma konieczności kompensowania składowych reaktancyjnych),
- szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości (praktycznie ograniczone górną częstotliwością graniczną wzmacniacza dla schematu z rys. 13. a), a dla układu z rys. 13. b) tylko częstotliwością rezonansu własnego czujnika).



Rys. 13. Schematy tensometrycznych mostków stałoprądowych do współpracy:
a) z tensometrami metalowymi, b) półprzewodnikowymi.

Do wad mostków stałoprądowych należą:

- trudności związane ze wzmacnianiem sygnału uzyskanego z pomocą tensometrów metalowych (konieczny jest wzmacniacz o dużym wzmocnieniu i małych dryftach - droższy od wzmacniacze prądu przemiennego),
- zakłócający wpływ sil termoelektrycznych występujących zwłaszcza na stykach miedź-konstantan, napięć o częstotliwości sieci zasilającej oraz szumu wąskopasmowego, mieszczących się w paśmie przenoszenia wzmacniacza.

Mostki prądu stałego są stosowane w przypadkach pomiarów dynąmicznych o dużej szybkości zmian wielkości mierzonych oraz gdy przetworniki tensometryczne są wykorzystywane w zakresie pełnego sygnału znamionowego. Są stosowane chętnie z tensometrami półprzewodnikowymi rys. 13. b). Nie stosuje się ich w pomiarach o dużej dokładności z tensometrami metalowymi.

2.6.2. Urządzenia pomiarowe z falą nośną

Urządzenia pomiarowe, w których tensometry zasilane są napięciem lub prądem sinusoidalnym noszą nazwę urządzeń z falą nośną. Mostek czteroramienny, którego gałęzie (lub gałąź) tworzą tensometry rezystancyjne zasilany napięciem sinusoidalnym jest parametrycznym modulatorem amplitudy. Wynika to bezpośrednio z zależności (11), (49) i twierdzenia o modulacji, które można zapisać:

Jeżeli
$$\mathrm{F}[\varepsilon(\mathrm{t})] = \mathrm{F}(\omega) \tag{62}$$
$$\mathrm{F}[\varepsilon(\mathrm{t})\cos\Omega\mathrm{t}] = \frac{1}{2}[F(\omega+\Omega) + F(\omega-\Omega)] \tag{63}$$

a którego sens można wyrazić następująco: widmo F(ω) dowolnego sygnału ε(t) można przesuwać na osi pulsacji o wartość ±Ω mnożąc ten sygnał przez sygnał sinusoidalny o pulsacji Ω. Jeżeli w równaniu (49) za U_Z wstawimy $U_Z\cos\Omega t$, to otrzymamy lewą stronę równości (63).

Jeżeli mostek nie jest wstępnie zrównoważony, to uzyskuje się w nim modulację amplitudy z falą nośną AM, a jeżeli mostek jest wstępnie zrównoważony, to otrzymujemy w nim modulację amplitudy bez fali nośnej AM/SC.

Niech mierzone odkształcenie ε(t), stanowiące sygnał modulujący, ma przebieg harmoniczny o postaci
$$\varepsilon_\mathrm{x}(\mathrm{t}) = \varepsilon_\mathrm{m}(\mathrm{t})\cos\omega_\mathrm{x}\mathrm{t} \tag{64}$$

Zmiana rezystancji tensometru ma więc postać następującą
$$\frac{\Delta \mathrm{R}_x}{R} = \mathrm{k}\varepsilon_\mathrm{x}(\mathrm{t}) = \mathrm{k}\varepsilon_\mathrm{m}\cos\omega_\mathrm{x}\mathrm{t} \tag{65}$$

Napięcie nierównowagi $U_0(t)$ w mostku wstępnie zrównoważonym wynosi
$$U_0(t) = s\frac{\Delta \mathrm{R}_x}{R}U_Z = \mathrm{sk}\varepsilon_\mathrm{m}\mathrm{U}_\mathrm{zm}\cos\omega_\mathrm{x}\mathrm{t}\cos\Omega\mathrm{t} \tag{66}$$

lub inaczej
$$U_0(t) = U_{om}[\cos(\Omega-\omega_\mathrm{x})\,\mathrm{t} + \cos(\Omega+\omega_\mathrm{x})\,\mathrm{t}] \tag{67}$$

gdzie

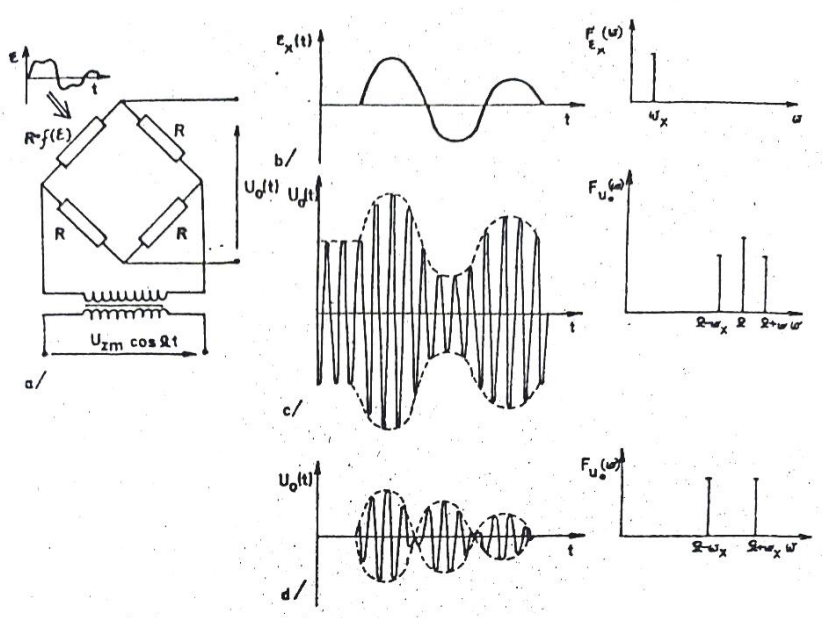
s – współczynnik czułości mostka zależy od ilości czynnych tensometrów, dla jednego tensometru s = ¼, a dla czterech s = 1,

$$U_{om} = \frac{1}{2}s\cdot k\cdot\varepsilon_\mathrm{m}\cdot\mathrm{U}_\mathrm{zm}$$

Tak więc sygnał w przekątnej mostka wstępnie zrównoważonego składa się tylko ze składowych bocznych, widma, a więc jest sygnałem o modulacji AM/SC. Przebiegi czasowe sygnałów i ich charakterystyk widmowe w mostku wstępnie zrównoważonym przedstawiono na rys. 14. Z rys. 14. widać, że zmiana znaku sygnału mierzonego (modulującego) powoduje zmianę fazy sygnału nośnego.

W przypadku mostka wstępnie niezrównoważonego, dla którego przy $\varepsilon_x(t)=0$ dokonano rozstrojenia o wartość zależną od oczekiwanego stosunku sygnałów o wartościach dodatnich i ujemnych, napięcie w przekątnej pomiarowej ma postać
$$u_0(t) = U_{om}[2\sin\Omega\,\mathrm{t} + \cos(\Omega-\omega)\,\mathrm{t} + \cos(\Omega+\omega)\,\mathrm{t}] \tag{68}$$

Zawiera więc oprócz wstęg bocznych dodatkowo składową o częstotliwości Ω. Przebiegi czasowe sygnałów i ich charakterystyki widmowe w mostku wstępnie zrównoważonym przedstawiono na rys. 14. c).



Rys. 14. Modulacja w mostku: a) układ połączeń, b) sygnał modulujący (mierzony) i jego widmo częstotliwościowe, sygnał w przekątnej pomiarowej i jego widmo, c) mostka wstępnie niezrównoważonego, d) mostka zrównoważonego.

Tak więc wynikiem modulacji w mostku jest przesunięcie widma częstotliwości sygnału mierzonego w zakres większych częstotliwości. Dzięki temu możemy stosować w mostkach tensometrycznych wzmacniacze prądu zmiennego także w pomiarach wielkości statycznych. Jeżeli wielkość mierzona ma widmo częstotliwościowe ograniczone pulsacją graniczną ω_{gs}, to wzmacniacz pomiarowy powinien mieć płaską charakterystykę częstotliwościową co najmniej w zakresie $\Omega\pm\omega_{gs}$. Wzmacniacz pomiarowy w mostkach tensometrycznych jest więc wzmacniaczem pasmowym.

W celu odtworzenia modulującego sygnału pomiarowego $\varepsilon_x(t)$ na podstawie sygnału zmodulowanego, konieczne jest przesunięcie widma do jego położenia początkowego na osi częstotliwości. Proces przesuwania widma do jego położenia początkowego nazywa się demodulacją. Demodulację amplitudy można zrealizować mnożąc sygnał zmodulowany przez dowolny sygnał okresowy o pulsacji Ω sygnału nośnego. Demodulatory sygnałów zmodulowanych amplitudowo AM, które można podzielić na prostoliniowe i obwiedniowe są ogólnie znane. Ich zastosowanie w urządzeniach pomiarowych tensometrycznych jest ograniczone.
Sygnały zmodulowane z tłumieniem fali nośnej AM/SC są poddawane demodulacji synchronicznej.

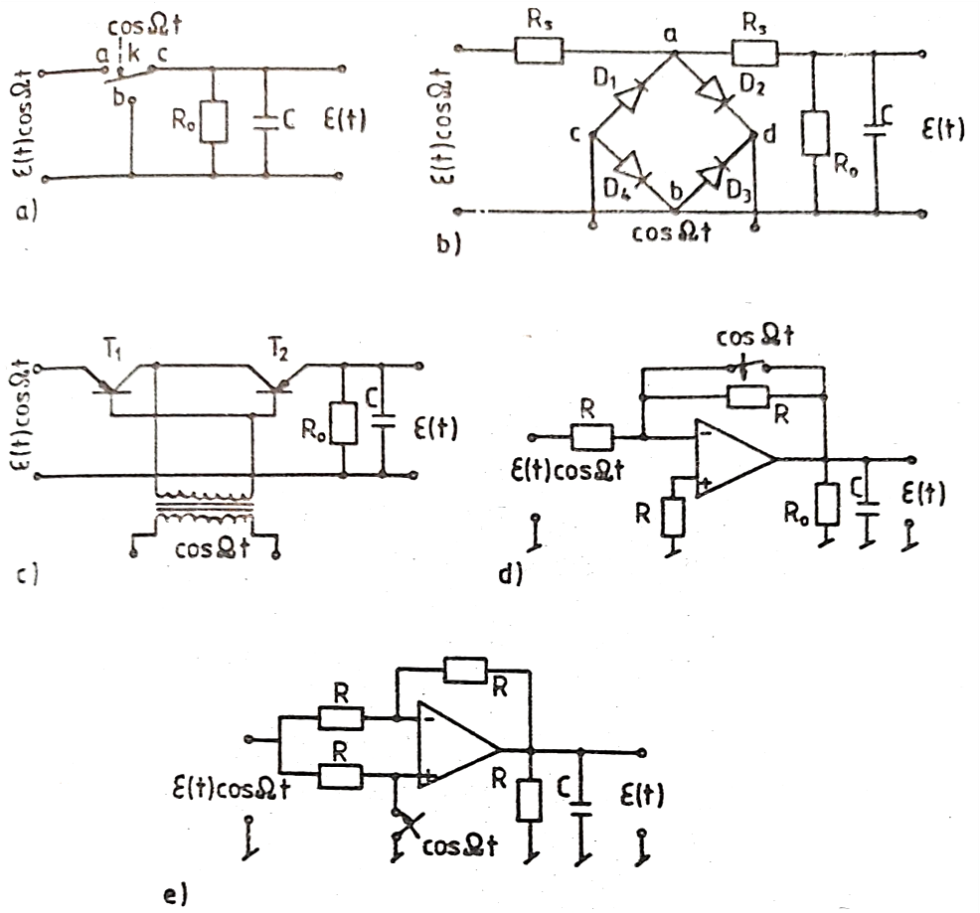
Jeżeli sygnał $\varepsilon(t)\cdot\cos\Omega t$ pomnożyć przez sygnał nośny $\cos\Omega t$, to otrzyma się

$$\varepsilon(t)cos^2\Omega t = \frac{1}{2}[\varepsilon(t) + \varepsilon(t)cos2\Omega t] \tag{63}$$

skoro $F[\varepsilon(t)] = F(\omega)$, to na podstawie (63) otrzymamy:

$$F[\varepsilon(t)cos^2\Omega t] = \frac{1}{2}F(\omega) + \frac{1}{4}[F(\omega + 2\Omega) + F(\omega - 2\Omega)] \tag{64}$$

Tak wic widmo sygnału $\varepsilon(t)\cdot\cos^2\Omega t$ składa się z widma sygnału modulującego $F(\omega)$ oraz dodatkowych składowych, skupionych wokół 2Ω. Dla odtworzenia z tego widma sygnału modulującego $\varepsilon(t)$, należy zastosować filtr dolnoprzepustowy, który przeniesie $F(\omega)$ a stłumi pozostałe składowe widma.



Rys. 15. Układy demodulatorów synchronicznych wykorzystujących kluczowanie: a) z przerywaczem mechanicznym, b) z przerywaczem diodowym, c) z przerywaczem tranzystorowym, d), e) z przerywaczem i wzmacniaczem operacyjnym.

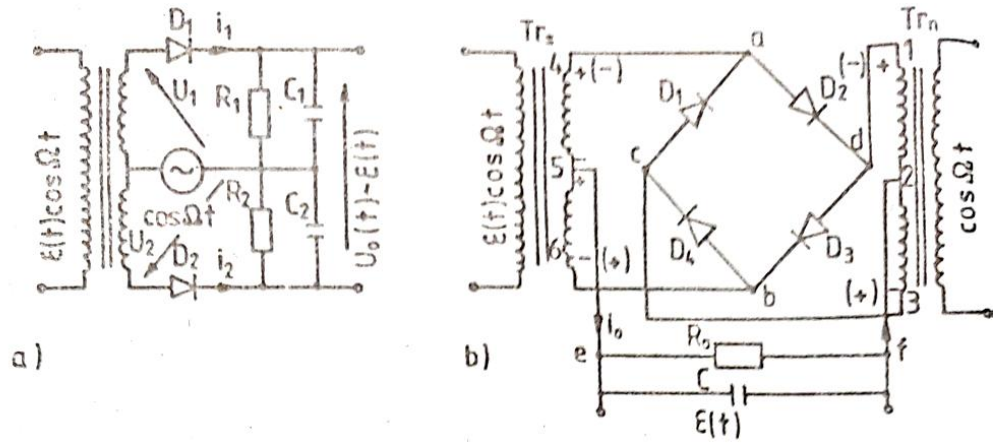
Demodulację synchroniczną można realizować w układach liniowych zmiennych w czasie (np. w układach przełączających lub kluczujących) albo w układach, w których występują elementy nieliniowe. Na rys. 15. a) pokazano układy demodulatorów synchronicznych opartych o kluczowanie. W układzie na rys. 15. a) klucz k przełącza zaciski a i b z częstotliwością Ω. Przez pół okresu przełącznik łączy zacisk c z sygnałem ε(t)·cosΩt, zaś przez pozostałe pól okresu zacisk c jest uziemiony. Przebieg wyjściowy na zacisku c jest zatem kluczowany z czestot1iwością Ω. Kluczowanie można traktować jako mnożenie ε(t)·cosΩt przez sygnał o przebiegu prostokątnym. W układzie na rys. 15. b), diody spełniają funkcję przełącznika. Gdy sygnał cosΩt ma taką polaryzację, ze zacisk c ma potencjał wyższy niż zacisk d, przy przyjęciu amplitudy sygnału cosΩt znacznie większej (w praktyce około 5 razy) niż amplituda sygnału cosΩt, to wszystkie diody przewodzą. W tych warunkach napięcie na diodzie D_1, jest takie samo jak na diodzie D_4 a zatem zacisk a ma taki sam potępiał jak zacisk b. Zaciska jest więc uziemiony. Przy polaryzacji sygnału cosΩt przeciwnej niż poprzednia, wszystkie diody są spolaryzowane zaporowo i stanowią przerwy w obwodzie. W tych warunkach zacisk a jest dołączony do sygnału ε(t)·cosΩt przez rezystor R. Diody przełączają zacisk a na przemian do sygnału ε(t)·cosΩt do masy z częstotliwością Ω.

W układzie na rys. 15. c) funkcje przełącznika spełniają tranzystory. Sygnał cosΩt wprowadza w jednym półokresie tranzystor w stan nasycenia a w drugim półokresie w stan zaporowy. W stanie zaporowy płynie jednak prąd zerowy tranzystora. Dla wyeliminowania w obwodzie zerowego prądu tranzystora, stosuje się jako klucz parę jednakowych tranzystorów, połączonych jak na rys. 15. c).

Układy demodulatorów synchronicznych z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych przedstawiono na rys. 15. d) i rys. 15. e). Układy te charakteryzują się dobrą liniowością, dużą czułością oraz mają te zaletę, że nie wymagają stosowania transformatorów.

W układzie pokazanym na rys. 15. d) sygnał cosΩt steruje kluczem (np. tranzystorowym), który załącza lub wyłącza (zawiera) opór sprzężenia zwrotnego we wzmacniaczu, powodując zmianę jego wzmocnienia miedzy określoną wartością a zerem. Na wyjściu wzmacniacza otrzymuje sie kluczowany przebieg sygnału ε(t)·cosΩt, odpowiednio wzmocniony.

W demodulatorze ze wzmacniaczem różnicowym sygnał cosΩt steruje kluczem, który złącza lub odłącza (zwiera z masą) wejście nieodwracające od sygnału ε(t)·cosΩt. .Powoduje to zmianę wzmocnienia K_u wzmocnienia między wartościami +1 i -1. D1a zwartego z masą wyjścia nieodwracającego K_u=-1. Przy kluczu otwartym, wzmocnienie wzmacniacza dla wejścia odwracającego wynsi K_{u-} = -1, natomiast dla wejścia nieodwracającego K_{u+}=(R/R)+1=+2.Wypadkowe wzmocnienie wzmacniacza, przy kluczu otwartym, wynosi K_u = +1.



Rys. 16. Układy demodulatorów synchronicznych, wykorzystujących nieliniową charakterystykę diod: a) przeciwsobny b) pierścieniowy.

Na rys. 16. przedstawiono układy demodulatorów synchronicznych, wykorzystujących nieliniową charakterystykę diody. Charakterystykę prądowo-napięciową diody półprzewodnikowej można aproksymować szeregiem potęgowym:

$$i = au + bu^2 \tag{69}$$

Dla demodulatora w układzie przeciwsobnym, rys.16. a), napięcie u_1 oraz u_2 są określone

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \cos\Omega t + \varepsilon(t)\cos\Omega t \\ u_2(t) &= \cos\Omega t - \varepsilon(t)\cos\Omega t \end{aligned} \tag{70}$$

Stąd prąd i_1 oraz i_2 można wyrazić wzorami:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= au_1 + bu_1^2 = a[\cos\Omega t + \varepsilon(t)\cos\Omega t] + b[\cos\Omega t + \varepsilon(t)\cos\Omega t]^2 \\ i_2(t) &= au_2 + bu_2^2 = a[\cos\Omega t - \varepsilon(t)\cos\Omega t] + b[\cos\Omega t - \varepsilon(t)\cos\Omega t]^2 \end{aligned} \tag{71}$$

Napięcie wyjściowe u_o jest określone jako:

$$u_o = i_1 R - i_2 R \tag{72}$$

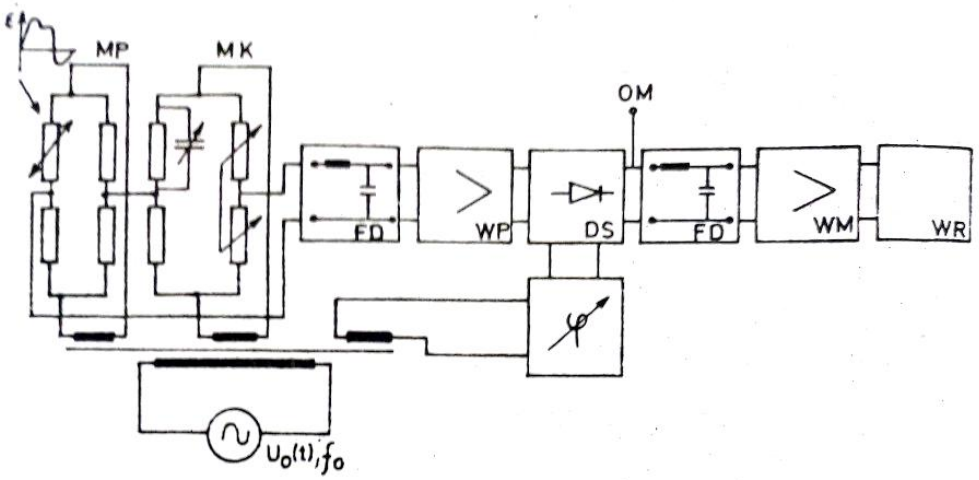
Podstawiając do powyższego równania zależność (71) otrzymuje się

$$u_o(t) = 2R[b\,\varepsilon(t) + a\,\varepsilon(t)\cos\Omega t + b\,\varepsilon(t)\cos 2R t] \tag{73}$$

Na wejściu demodulatora należy zastosować filtr dolnoprzepustowy, który ze złożonego sygnału wyjściowego $u_o(t)$ przeniesie składową stanowiącą przebieg modulujący bε(t) a odfiltruje składową skupioną wokół częstotliwości Ω i 2Ω.

Demodulator pierścieniowy, którego układ przedstawiono na rys. 16. b), umożliwia usunięcie pewnych zniekształceń demodulacji, powstających w układzie demodulatora przeciwsobnego. Dla demodulatora pierścieniowego, analogicznie jak dla przeciwsobnego, obowiązuje warunek, że amplituda sygnału cosΩt powinna być około 5 razy większa, niż amplituda sygnału ε(t)·cosΩt. Sygnał cosΩt decyduje o przewodzeniu diod w demodulatorze. Przy zgodnych fazach sygnałów: cosΩt oraz ε(t)·cosΩt, w pierwszym półokresie (oznaczenia biegunowości sygnałów bez nawiasów) przewodzą diody D_3 i D_4 a prąd wywołany napięciem ε(t)·cosΩt płynie w obwodzie wyznaczonym punktami: 5ef23db65. W następnym półokresie (biegunowość sygnałów oznaczona w nawiasach) przewodzą diody D_1 oraz D_2 a prąd płynie w odwodzie określonymi punktami 5ef23ca45, ma więc ten sam kierunek, w obciążeniu, jak w poprzednim półokresie. Jeżeli jednego

z sygnałów doprowadzonych do demodulatora ulegnie zmianie, w stosunku do drugiego, to kierunek prądu w obciążeniu zmieni się na przeciwny (od f do e).



Rys. 17. Schemat blokowy mostka tensometrycznego z falą nośną
FD – filtr dolnoprzepustowy, WP – wzmacniacz pasmowy, WM – wzmacniacz mocy, WR – urządzenie wskazujące lub rejestrujące, MP – mostek pomiarowy, MK – mostek kompensacyjny, DS – detektor synchroniczny, φ – przesuwnik fazy.

Na rys. 17. przedstawiono schemat blokowy mostka tensometrycznego z falą nośną. Generator fali nośnej zasila, poprzez trzy oddzielne uzwojenia transformatora wyjściowego, mostek pomiarowy MP, mostek kompensacyjny oraz demodulator synchroniczny. Dla właściwej pracy demodulatora synchronicznego otrzymuje on napięcie z generatora poprzez przesuwnik fazowy φ. Filtr dolnoprzepustowy FD przed wzmacniaczem pasmowym WP służy do odfiltrowania częstotliwości nośnej. Stosowane częstotliwości generatora fali nośnej zawierają się w przedziale f_0=1–50kHz, przy czym jako typową wartość stosuje się f_0 = 5kHz.

W pomiarach precyzyjnych przebiegów o małych szybkościach zmian stosowane są małe częstotliwości nośne f_0 = 100–300 Hz.

Podsumowując rozważania dotyczące urządzeń z falą nośną można stwierdzić, że do ich zalet należą:

- łatwość wzmacniania sygnałów (mniejszy koszt wzmacniacza niż wzmacniacza prądu stałego tej samej klasy),
- eliminacja wpływu sil termoelektrycznych, napięć o częstotliwości sieciowej oraz szumu wąskopasmowego.

Natomiast do wad należą:

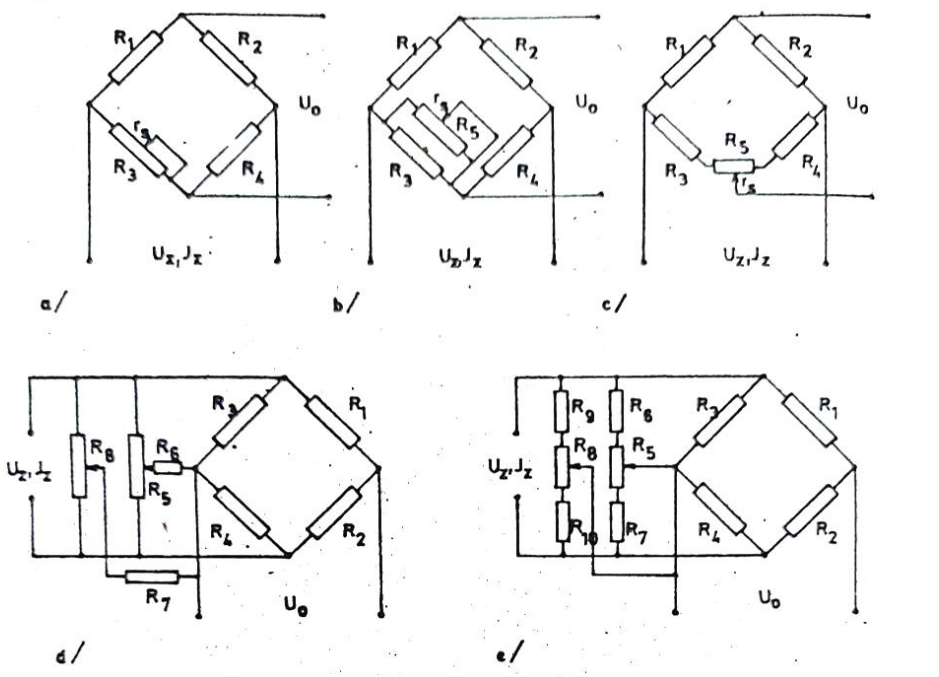
- konieczność równoważenia mostka za pomocą elementów regulacyjnych zarówno rezystancyjnych-amplitudowo, jak i pojemnościowo-fazowo,
- trudność stabilizacji napięć o częstotliwości nośnej (zarówno amplitudy jak i częstotliwości),
- ograniczony zakres mierzonych częstotliwości od 0 – 0,25 f_0,
- konieczność stosowania generatora synchronicznego.

Urządzenia pomiarowe z falą nośną stosuje się w pomiarach statycznych i dynamicznych do częstotliwości <10 kHz oraz wówczas gdy wymagana jest duża dokładność pomiarów.

2.6.3. Sposoby równoważenia mostków tensometrycznych

Rezystancje znamionowe tensometrów mają pewien rozrzut wartości, również po naklejeniu tensometrów na elementy badane ich rezystancje ulegają zmianie. To są przyczyny powodujące, że po włączeniu tensometrów w mostek Wheatstone'a, o podanej przez producenta tej samej rezystancji znamionowej, powstaje napięcie nierównowagi w przekątnej pomiarowej mostka. Aby można było przeprowadzić pomiar, należy na wstępie zrównoważyć mostek czujnikowy. Układy równoważenia

mostków różnią się w zależności od rodzaju zasilania. W przypadku mostków zmiennoprądowych równoważenie tylko rezystancyjne nie wystarcza, gdyż pojemności przewodów doprowadzających i pojemności własne dołączają się równolegle do rezystancji tensometrów. Składowe reaktancyjne gałęzi mostka powodują przesunięcie fazy napięcia pomiarowego w stosunku do napięcia zasilania mostka. Układy równoważne mostków zmiennoprądowych winny zapewnić więc równocześnie równoważenie amplitudowe i fazowe.



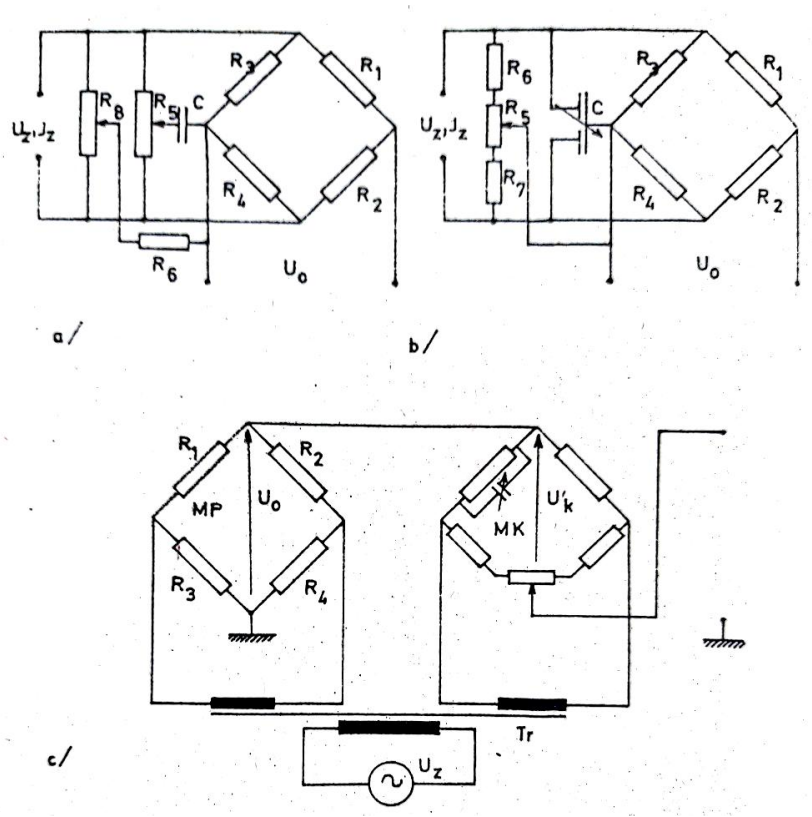
Rys. 18. Układy równoważenia mostków rezystancyjny prądu stałego:
$R_1 – R_4$ – rezystory gałęzi mostka, R_5, R_8 – potencjometry równoważenia, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10} – rezystory ograniczające zakres regulacji.

Na rys. 18. przedstawiono podstawowe układy równoważenia mostków prądu stałego. Najprostszy układ według rys. 18. a) charakteryzuje się niestałością rezystancji kontaktowej r_s suwaka elementu regulacyjnego i nie jest w zasadzie stosowany w układach z tensometrami. Zmniejszony wpływ rezystancji kontaktowej r_s, zapewnia włączenie elementu regulacyjnego R_5 równolegle do rezystancji gałęziowej w rys. 18. b). Przy zastosowaniu do współpracy z mostkiem wzmacniacza dużej rezystancji wejściowej, wpływ rezystancji kontaktowej r_s na równowagę mostka jest do pominięcia w układzie jak na rys. 18. c). Dwustopniowe równoważenie mostka wstępne i dokładne zapewniają układy wg rys. 18 d) i e).

Elementy R_6 i R_7 wg rys. 18. d) i R_6, R_7, R_9, R_{10} wg rys. 18. e) służą do zawężenia zakresu regulacji i zabezpieczają przed możliwością zwarcia jednej z rezystancji gałęziowej w przypadku skrajnego położenia suwaka potencjometru. Dla mostka symetrycznego wg rys. 18. d) zwykle przyjmuje się wartości rezystancji R_6 lub R_7 równe (25–100) R, gdzie R-rezystancja gałęzi mostka. Dla spełnienia wymagań liniowości rezystancje potencjometrów winny spełniać dodatkowo warunki: $R_6 << R_5$ i $R_7 << R_8$.

Mostki prądu przemiennego równoważy się fazowo za pomocą kondensatorów i amplitudowo za pomocą rezystorów. Na rys. 19. przedstawiono najczęściej spotykane w tensometrii układy równoważenia mostków zasilanych napięciem przemiennym. Równoważenie wg rys. 19. a) przeprowadza się kilkakrotnie, gdyż równoważenie fazowe wpływa na równowagę amplitudową.

Zastosowanie kondensatora różnicowego w układzie wg rys. 19. b) pozwala na wyeliminowanie wpływu równoważenia fazowego na równowagę amplitudową mostka. Bardzo często stosowany w tensometrii układ równoważenia przedstawiono na rys. 19. c). Napięcie nierównowagi mostka pomiarowego U_0 jest kompensowane napięciem nierównowagi U_k mostka kompensacyjnego. Obydwa mostki zasilane są przez oddzielne uzwojenia z tego samego transformatora. Układ pozwala na skompensowanie napięć nierównowagi mostków składających się z tensometrów o znacznej różnicy wartości rezystancji znamionowej.



Rys. 19. Układy równoważenia mostków tensometrycznych prądu stałego.

3. Błędy występujące w pomiarach tensometrycznych

Błędy występujące w pomiarach tensometrycznych powodowane są błędami tensometrów oraz błędami urządzeń pomiarowych (mostków tensometrycznych). Dokładność typowych mostków tensometrycznych zawiera się w przedziale (1–2)% przy liniowości (0,1–1)%. Aby w pełni wykorzystać dokładność urządzeń pomiarowych, błędy tensometrów winny być sprowadzone do możliwie małych wartości.

Przeanalizujemy przyczyny (źródła) powstawania błędów przetwarzania tensometrami oraz sposoby ich zmniejszania. Na dokładność przetwarzania tensometrów mają wpływ zarówno czynniki wewnętrzne, wynikające bezpośrednio z ich właściwości, takie jak: różnica rezystancji, stałych tensometrów czy obciążenie prądowe, jak również czynniki zewnętrzne, takie jak: temperatura, wilgotność, pełzanie, rezystancje i pojemności przewodów doprowadzających.

Zasadniczy wpływ na błąd przetwarzania tensometrów w pomiarach wytrzymałościowych ma niedokładność określenia stałej tensometrów. Wyznaczenie stałej k tensometru zastosowanego w pomiarze jest niemożliwe: tensometr jest przetwornikiem jednorazowego użytkowania, a wyznaczenia stałej można dokonać po naklejeniu tensometru. Przyjmuje się więc w pomiarach wartości stałej tensometru podawane przez producenta, wyznaczane na podstawie statystycznej analizy wyników pomiarów wybranych na próbkach z danej serii produkcyjnej. Dokładność określenia stałej k wynosi 1–2%.

Wpływ pozostałych czynników wewnętrznych na błąd przetwarzania można zmniejszyć do wartości pomijalnych. Producenci na ogół zapewniają nierównomierność wartości rezystancji tensometrów w partii 0,1Ω. Pozwala to dobrać tensometry (przy przestrzeganiu instrukcji klejenia) z dokładnością lepszą niż 0,1% dla tensometrów o rezystancjach R > 100 Ω.

Błędy powodowane obciążeniem prądowym tensometrów można zaniedbać nie przekraczając dopuszczalnych prądów obciążenia dla danych typów tensometrów.

Przeanalizujemy główne wpływy zewnętrzne. Wpływ temperatury jest dwojaki: powoduje powstanie pozornego wydłużenia oraz zmniejszenie czułości. Jeżeli tensometr z materiału o temperaturowych współczynnikach: α_R rezystancji oraz wydłużenia liniowego siatki rezystancyjnej tensometru α_t jest przyklejony na podłożu o współczynniku wydłużenia α_P, to pomijając wpływ kleju, wskutek zmiany temperatury Δt powstaje zmiana rezystancji tensometru

$$\Delta R = R[\alpha_R + k(\alpha_P - \alpha_t)]\Delta t \tag{74}$$

a stąd błąd w postaci pozornego wydłużenia

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}\frac{1}{k} = [\frac{1}{k}\alpha_R + (\alpha_P - \alpha_t)]\Delta t \tag{75}$$

W tabeli 3. zestawiono kilka typowych wartości błędów ε dla różnych wartości podłoży i materiałów siatki tensometrów dla t = 1°C, k = 2.

Tabela 3. Błędy temperaturowe tensometrów naklejonych na różnych podłożach.

Podłoże	**Materiał tensometru**	α_R	α_P	α_t	ε	$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} * 100$
		10^{-6} K	10^{-6} K	10^{-6} K	10^{-6} K	%
Stal	Konstantan	3	12	15	-1,5	-0,01
Aluminium	Konstantan	3	25	15	+11,5	+0,111
Stal	Nichrom	300	12	7	1,55	+1,55

Kompensację wpływu temperatury można uzyskać przez takie dobranie współczynników temperaturowych aby spełniony był warunek

$$\alpha_R + k(\alpha_P - \alpha_t) = 0 \tag{76}$$

Kompensację błędów temperaturowych można zrealizować następującymi sposobami:

a) zastosować tensometry samokompensujące, których siatki rezystancyjne wykonane są ze specjalnych stopów; taka kompensacja jest skuteczna dla określonego podłoża np. stali, stopów miedzi, aluminium, dla których spełniona jest zależność (76);
b) umieścić w sąsiednich gałęziach mostka pomiarowego tensometry kompensacyjne, zainstalowane w identycznych warunkach termicznych na takim samym podłożu jak tensometry czynne; często są to jednocześnie tensometry czynne;
c) zamontować w bezpośrednia sąsiedztwie mostka pomiarowego termoelementy, których napięcie dodaje się do napięcia wyjściowego mostka kompensując sygnał błędu.

Wzrost temperatury powoduje zmniejszenie współczynnika czułości odkształceniowej tensometrów, głównie z powodu stopniowego pogarszania się sprężystości kleju. Większą odpornością na zmiany temperatury odznaczają się kleje utwardzalne (bakelitowo i inne polimeryzowane).
Wpływ wilgoci na pracę tensometrów może być znaczący szczególnie w długotrwałych pomiarach polowych, gdy na tensometry oddziaływują zmienne warunki atmosferyczne. Nie wnikając szczegółowo w zjawiska, jakie zachodzą w samym tensometrze i jego elementach budowy pod działaniem wilgoci, za kryterium zawilgocenia tensometru można przyjąć wartość rezystancji izolacji siatki rezystancyjnej w stosunku do obiektu, na którym naklejony jest tensometr. Przy dobrze naklejonych i wysuszonych tensometrach rezystancja izolacji osiąga wartość (50–200)MΩ. Przy wysokim stopniu zawilgocenia tensometru wartość ta może spaść do 0,1MΩ, co uniemożliwia pomiar. Rezystancja izolacji tensometru R_i, bocznikuje jego własną rezystancję R. Gdy jeden z końców tensometru jest uziemiony, a rezystancję izolacji potraktujemy jako równomiernie rozłożoną wzdłuż siatki rezystancyjnej tensometru, to rezystancja zastępcza R_Z tensometru określona jest zależności (5)

$$R_Z \approx R(1 - \frac{R}{3R_i}) \tag{77}$$

a dla tensometru nieuziemionego

$$R_Z \approx R(1 - \frac{R}{12R_i}) \tag{78}$$

Niech spadek rezystancji izolacji z R_{i1} do R_{i2} powoduje zmianę rezystancji zastępczej z R_{Z1} do R_{Z2}, to znaczy zmianę względną

$$\frac{\Delta R_Z}{R_Z} = \frac{R_{Z1} - R_{Z2}}{R_{Z1}} \tag{79}$$

Dla dużej początkowej wartości izolacji, tj. gdy $R_{Z1} > R_{Z2}$ oraz przy pominięciu w mianowniku wyrażenia $R/3R_i << 1$ otrzymuje się z zależności (77) i (79)

$$\frac{\Delta R_Z}{R_Z} = \frac{1}{3}\frac{R}{R_{i2}} \tag{80}$$

Aby nie przekroczyć dopuszczalnego błędu pomiaru δ [%] przy zakresie pomiarowym Ɛ i stałej tensometrów k musi być

$$\frac{\Delta R_Z}{R_Z} \leq \frac{\delta\varepsilon}{k} \tag{81}$$

a stąd

$$R_{i2} \geq \frac{\mathrm{R}*\mathrm{k}}{3\delta\varepsilon} \tag{82}$$

Dla typowego przypadku δ=1%, $\varepsilon=1\cdot10^{-3}$, k=2, R=300Ω otrzymujemy R_{i2}=20MΩ. Dla tensometrów nieuzmiennionych wartość ta jest czterokrotnie mniejsza (zależność (78)).

Zabezpieczenie tensometrów przed zawilgoceniem realizuje się przy pomocy powłok ochronnych z wosków naturalnych i syntetycznych, lakierów ochronnych, gumowych ochraniaczy, taśm przylepnych lub różnych kombinacji tych środków. Wpływ rezystancji i pojemności przewodów (łączeniowych) w pomiarach tensometrycznych przejawia się głównie w zmniejszaniu wartości współczynnika czułości odkształceniowej k tensometrów. Zmiany rezystancji przewodów łączeniowych pod wpływem temperatury są kompensowane dzięki stosowaniu trójprzewodowego układu połączeń tensometrów (w przypadku półmostka).

Dodatkowa rezystancja przewodów R_P powoduje zmniejszenie stałej k tensometrów do wartości k'. Możemy zapisać:

$$\frac{R}{R+R_P} = k'\varepsilon \tag{83}$$

Ponieważ $\frac{\Delta R}{R}/\varepsilon = \mathrm{k}$, wyrażenie (83) można zapisać w postaci

$$k' = k\frac{R}{R+R_P} \tag{84}$$

W celu zmniejszenia wartości R_P należy stosować przewody o niezbyt dużej długości i niezbyt cienkie. Jeżeli użyto do pomiarów przewodów miedzianych o długości 2·15 m i przekroju 0,5 mm^2, których rezystancja R_P = 1Ω, to zgodnie z (84) stała tensometrów k zmniejszy się o 1%.

Wpływ pojemności przewodów doprowadzających może wystąpić przy zasilaniu mostków pomiarowych napięciem zmiennym. Praktycznie wpływy pojemności przewodów dają się odczuć przy dużych częstotliwościach napięcia zasilającego lub przy dużych długościach kabli doprowadzających. Pojemność C przewodów doprowadzających powoduje zmniejszenie stałej k tensometrów zgodnie z zależnością

$$k' = k(1-\omega^2C^2R^2) \tag{85}$$

Przyjmując dwuprzewodowy kabel o pojemności 200 pF/m i długości 15m dla f=5kHz, R=300Ω otrzymuje się spadek wartości stałej k o ~0,1%. Taki spadek wartości k w porównaniu z dokładnością określenia stałej przez producenta jest do pominięcia.

Zjawisko pełzania tensometrów stanowić może istotny problem w długotrwałych pomiarach wytrzymałościowych lub w pomiarach prowadzonych w podwyższonych temperaturach. Zjawisko to polega na zmianie rezystancji tensometrów w czasie, przy stałym stanie odkształcenia obiektu, na którym zostały naklejone tensometry. Kierunek pełzania jest przeciwny do kierunku obciążenia. Za miarę pełzania jednostkowego przyjmuje się wyrażenie

$$\frac{\varepsilon}{\Delta\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{to}-\varepsilon_t}{\varepsilon_{to}} \tag{86}$$

gdzie:

Δε–wartość pełzania wykazywanego przez tensometr po czasie t,

$\varepsilon_{to}, \varepsilon_t$ – odkształcenie wykazywane przez tensometr odpowiednio po czasie t = 0 i t,

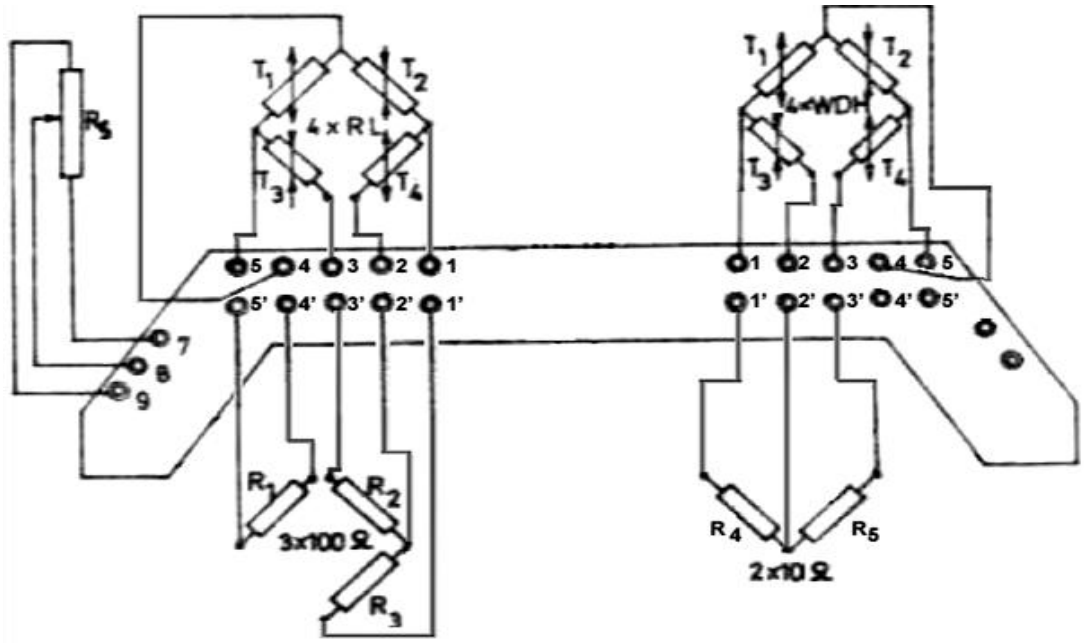
ε – odkształcenie rzeczywiste badanego obiektu.

Podstawową rolę w procesie pełzania odgrywają czas i temperatura. Przestrzeganie instrukcji klejenia i instalowania tensometrów, zabezpieczenie przed wilgocią, utrzymanie dobrej izolacji tensometrów pozwala na zadawalające zmniejszenie wpływu pełzania na dokładność pomiarów.

4. Pomiary

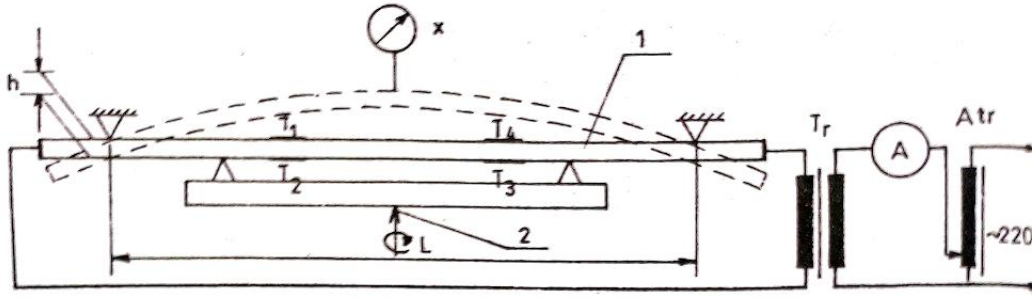
4.1. Wyznaczanie współczynnika czułości odkształceniowej tensometrów

Należy wyznaczyć współczynnik czułości jednego z tensometrów drutowych typu RL/120 i jednego z tensometrów półprzewodnikowych typu WDH 101 zainstalowanych na belce pomiarowej urządzenia do wzorcowania tensometrów. Sposób połączenia tensometrów, rezystorów manganinowych do tworzenia mostka pomiarowego oraz termoelementu Cu - Konst. w urządzeniu wzorującym przedstawiono na rys. 20.



Rys. 20. Sposób połączenia tensometrów w urządzenie wzorującym.

Schemat urządzenia do wzorcowania tensometrów przedstawiono na rys. 21.



Rys. 21. Sposób urządzenia do wzorcowania tensometrów.

Dokręcając śrubę 2 powodujemy zginanie belki pomiarowej l. Wartość odkształcenia zewnętrznego włókien belki określa zależność

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot h}{l^2} x \tag{87}$$

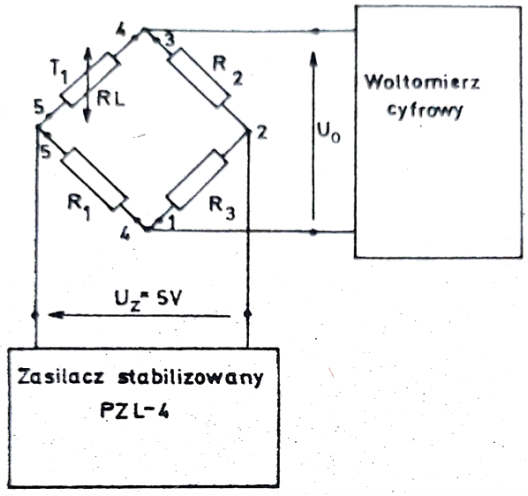
gdzie:

x – zmierzona czujnikiem zegarowym strzałka ugięcia belki,
h – wysokość prostokątnego przekroju belki,
l – długość cięciwy belki, na której zmierzono strzałkę x.

Belka pomiarowa zastosowana w ćwiczeniu ma następujące wymiary l=499 mm, h=7 mm. Belka może być podgrzewana przez przepływający przez nią prąd, którego natężenie można regulować w zakresie 0 – 200 A. Temperaturę powierzchni belki mierzy się przy pomocy przyklejonego w pobliżu tensometrów termoelementu miedź-konstantan wykonanego z tensometru drutowego.

Wybrany jeden z tensometrów podłączamy w układ mostka, którego pozostałe gałęzie stanowią rezystory manganinowe $R_1 – R_3$. Mostek pomiarowy zasilany napięciem stałym o wartości 5 V z zasilacza stabilizowanego, a napięcie nierównowagi mostka mierzymy woltomierzem cyfrowym (rys. 22).

Odkształcenie Ɛ belki pomiarowej, a więc i naklejonego na nią tensometru badanego, zadajemy zmieniając strzałkę ugięcia x kresie 0-2 mm co 0,1 mm. Wartość zadanych odkształceń wyznacza się z zależności (87).



Rys. 22. Układ pomiarowy do wyznaczania współczynnika czułości odkształceniowej tensometrów.

Dla ustalonych wartości strzałek ugięcia (odkształceń) belki odczytujemy wartość napięcia nierównowagi U_O i zależności (50) wyznaczamy względną zmianę rezystancji jako

$$\frac{\Delta R}{R} = 4\frac{U_O}{U_Z} \tag{88}$$

Jeżeli dla zerowego odkształcenia belki pomiarowej napięcie nierównowagi mostka $U_O \neq 0$, to należy zrównoważyć mostek wykorzystując jeden z układów z rys. 18. lub przyjmując do wyznaczenia względne zmiany rezystancji przyrost napięcia nierównowagi mostka U_O, określony jako różnica napięcia nierównowagi U_{Of} mostka dla danej strzałki ugięcia x i napięcia nierównowagi U_{OO} dla f=0. W tym przypadku zależność (88) ma postać

$$\frac{\Delta R}{R} = 4\frac{U_O}{U_Z} = 4\frac{U_{Of}-U_{OO}}{U_Z} \tag{89}$$

Na podstawie pomiarów wyznaczamy charakterystykę $Ɛ = f(\frac{\Delta R}{R})$ a jej nachylenie stanowi wartość współczynnika czułości odkształceniowej k badanego tensometru.

4.2. Wyznaczenie wpływu temperatury na stałą k tensometrów

Wyznaczyć wpływ temperatury na stałą k tensometru drutowego i półprzewodnikowego, w zakresie temperatur 20 - 50°C. Układ połączeń jak w punkcie 4.1. Ustawić zerowe odkształcenie belki pomiarowej, podgrzać ją do zadanej temperatury, zrównoważyć mostek pomiarowy. Temperaturę belki mierzyć termoelementem miedź-konstantan i woltomierzem cyfrowym.

Zależność wartości SEM termoelementu miedź - konstantan od temperatury w zakresie 20 - 50°C podano w tabeli 4. Uwzględnić temperaturę odniesienia zimnych końców termoelementu zgodnie z zasadą podaną w ćwiczeniu "Pomiary temperatur" punkt. 2.4. Dla wybranych 4 - 5 wartości temperatur w zakresie 20 - 50°C wyznaczyć zależność $\frac{\Delta R}{R} = f(Ɛ)$ jak w punkcie 4.1. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczyć zależność k = f(T).

Tabela 4. Charakterystyka termometryczna termoelementu CU – Konst. wg PN-81/M-5385405

t	E	T	E
°C	µV	°C	µV
0	0	32	1279
10	391	33	1320
15	589	34	1361
16	629	35	1403
17	669	36	1444
18	709	37	1486
19	749	38	1528
20	789	39	1569
21	830	40	1603
22	870	41	1653
23	911	42	1695
24	951	43	1738
25	992	44	1783
26	1032	45	1822
27	1073	46	1865
28	1114	47	1907
29	1155	48	1950
30	1196	49	1992
31	1237	50	2035

4.3. Wyznaczenie wpływu temperatury na powstawanie pozornego sygnału pomiarowego (błąd zera)

Należy wyznaczyć wpływ temperatury na zero mostka pomiarowego dla tensometrów metalowych i półprzewodnikowych dla przypadków:

a) jeden czynny tensometr w mostku,
b) jeden czynny tensometr i jeden kompensacyjny.

Odciążyć belkę, zrównoważyć mostek pomiarowy według wybranego układu z rys. 18. Podgrzewając belkę pomiarową poprzez zwiększanie przepływającego przez nią prądu (wskazanie amperomierza nie powinno przekroczyć 2A, rys. 21) mierzyć napięcie nierównowagi mostka U_O i wartość SEM termoelementu Cu-Konstanran. Z tabeli 4. odczytać wartość temperatury dla danej wartości SEM, uwzględniając poprawkę na temperaturę wolnych końców termoelementu.

Wyznaczyć zależność napięcia nierównowagi mostka U_O w funkcji temperatury tensometrów (belki) $U_O=f(T)$. Dla przypadku a) układ połączeń jak w punkcie 4.1. Dla przypadku b) włączyć w układ mostka jeden czynny tensometr, a w sąsiednią gałąź tensometr kompensacyjny (może to być również czynny tensometr mierzący odkształcenie przeciwne niż pierwszy np. T_1 i T_2), pozostałe gałęzie mostka utworzyć z rezystorów R_1 i R_2.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczyć błąd zera jako wartości pozornego odkształcenia odniesione do zakresu na stopień temperatury przy napięciu zasilania U_Z w [%/K].

4.4. Wyznaczenie charakterystyk różnych układów pacy tensometrów

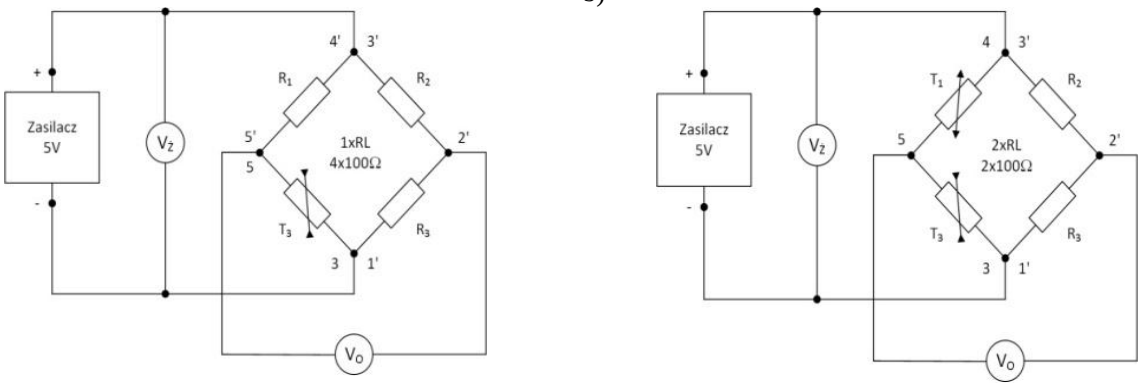
1. Dla tensometrów metalowych połącz układy:
   a) z jednym czynnym tensometrem (ćwierćmostek) rys. 23. a),
   b) z dwoma czynnymi tensometrami (półmostek) rys. 23. b),
   c) z czterema czynnymi tensometrami (pełny mostek) rys. 23. c),

za każdym razem mierząc napięcie wyjściowe Uo zmieniając strzałkę ugięcia w zakresie 0 - 2 mm co 0,1mm. Przed wykonaniem pomiarów dokonaj równoważenia mostków prądu stałego jednym z zaproponowanych układów.

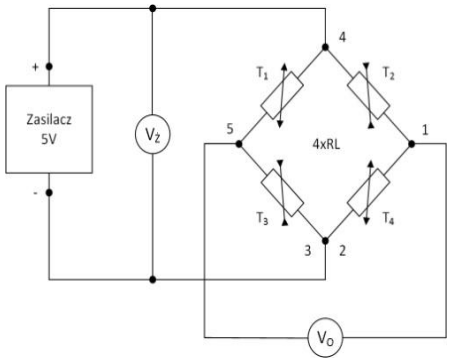
Dla wszystkich przypadków narysuj charakterystykę $Uo=f(\varepsilon)$.

Dla układu z jednym tensometrem czynnym wyznaczyć charakterystykę $\varepsilon=f(\frac{\Delta R}{R})$ oraz czułość odkształceniową k badanego tensometru.

a) b)



c)

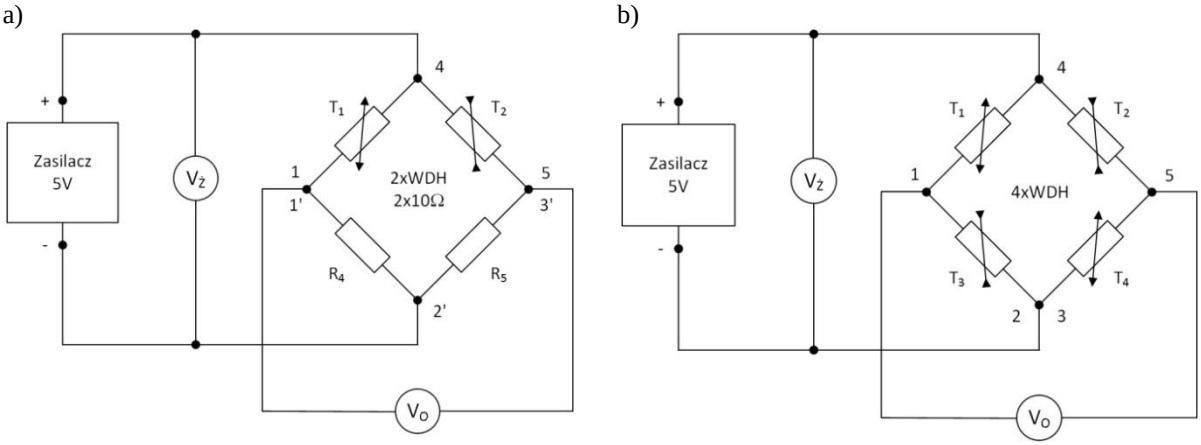


Rys. 23. Schemat połączenia a) ćwierćmostka, b) półmostka, c) pełnego mostka.

2. Dla tensometrów półprzewodnikowych połącz układy:
   a) z dwoma czynnymi tensometrami (półmostek) rys. 24. a),
   b) z czterema czynnymi tensometrami (pełny mostek) rys. 24. b),

za każdym razem mierząc napięcie wyjściowe Uo zmieniając strzałkę ugięcia w zakresie 0 - 2 mm co 0,1mm. Przed wykonaniem pomiarów dokonaj równoważenia mostków prądu stałego jednym z zaproponowanych układów.

a) b)



Rys. 24. Schemat połączenia a) półmostka, b) pełnego mostka.

Dla wszystkich przypadków narysuj charakterystykę $U_o=f(\varepsilon)$.

Literatura:

1. Tumański S.: Technika pomiarowa, WNT, Warszawa, 2016, ebook – 2013;
2. Piotrowski J. (red.): Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego, wyd. I, WNT, Warszawa, 2009; wyd. II, PWN, Warszawa, 2017;
3. Zakrzewski J.: Czujniki i przetworniki pomiarowe, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004;
4. Kampik M., Zakrzewski J: Sensory i przetworniki pomiarowe, wyd. I, Wyd. Politechniki Śląskiej 2013;
5. Miłek M., Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006;
6. Hagel R., Miernictwo dynamiczne. Warszawa; WNT, 1975;
7. Rolinski Z., Tensometria oporowa, Warszawa: WNT 1981;
8. Styburski W., Przetworniki tensometryczne. Warszawa: WNT, 1976;
9. Szumidlewicz B. i inni, Pomiary elektroniczne w technice. Warszawa: WNT, 1982;