

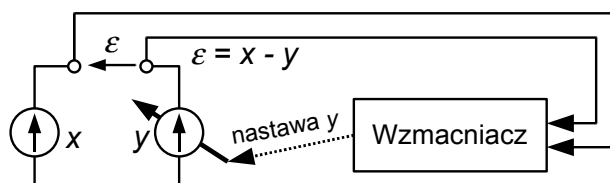
Ćwiczenie nr 12. Waga prądowa**1. Cel ćwiczenia**

Zapoznanie się z budową i działaniem automatycznego, statycznego układu kompensacyjnego typu równoważni prądowej. Przeprowadzenie badań przemysłowego przetwornika typu WT30 - 50 mA współpracującego z czujnikiem do pomiaru masy.

2. Wprowadzenie

Wśród metod stosowanych w pomiarach wielkości fizycznych ważną rolę odgrywa metoda kompensacyjna (pomiar siły, temperatury, ciśnienia, napięcia elektrycznego itp.). Szczególna rola metody kompensacyjnej polega na tym, że pozwala ona na dokonanie pomiaru przy zbliżonym do zera poborze przez czujnik pomiarowy energii z obiektu pomiarowego, skutkiem jest zmniejszenie błędu systematycznego metody pomiaru.

Metoda kompensacyjna pozwala zatem mierzyć wielkości fizyczne, które określają stan energetyczny obiektu pomiaru bez wpływu czujnika pomiarowego na przebieg zjawiska lub stan obiektu mierzonego.



Rys.1. Zasada kompensacyjnego pomiaru napięcia, ε - różnica (odchyłka) pomiędzy wartością mierzoną x , a odtwarzaną przez wzorzec y

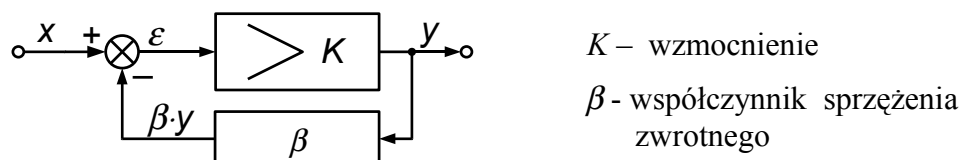
Istota zasady kompensacyjnej (rys.1) polega na takiej regulacji wartości y odtwarzanej przez wzorzec, aby odchyłkę ε sprowadzić do wartości równych lub bliskich zeru.

Ze względu na wartość odchyłki ε układy kompensacyjne dzieli się na dwie grupy:

- układy kompensacyjne astatyczne, dla których w warunkach ustalonych $\varepsilon = 0$
- układy kompensacyjne statyczne, dla których w warunkach ustalonych $\varepsilon \neq 0$

Układ astatyczny charakteryzuje się obecnością w dowolnym miejscu struktury sprzężenia zwrotnego przynajmniej jednego bloku całkującego sygnał wejściowy, która oznacza, że układ dąży do równowagi z prędkością proporcjonalną do stopnia rozstrojenia. Układy astatyczne charakteryzują się stosunkowo powolnym działaniem, ale kompensacja obciążona jest tylko błędem nieczułości i błędem wzorca – różnica ε może mieć dowolnie małą wartość.

W statycznym układzie kompensacyjnym wielkość wyjściowa y powstaje w wyniku wzmocnienia różnicy ε , zatem różnica ta musi mieć zawsze skończoną wartość (układ nie całkuje i nie zapamiętuje jej). Opis matematyczny układu statycznego jest analogiczny jak wzmacniacza z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego – rys.2.



Rys.2. Statyczny układ kompensacyjny - struktura blokowa

Dla tego układu wielkość wyjściowa y opisana jest zależnościami: $y = \varepsilon \cdot K$, $\varepsilon = x - \beta \cdot y$

zatem:
$$y = \frac{K}{1 + K \cdot \beta} \cdot x$$

Ćwiczenie nr 12. Waga prądowa

Zwiększając wzmocnienie $K \rightarrow \infty$ uzyskuje się $y \rightarrow y^\infty = \frac{x}{\beta}$ tzn. dochodzi się do sytuacji, gdy o współczynniku przetwarzania układu decyduje tylko wartość współczynnika sprzężenia zwrotnego β . Zakładając skończoną wartość wzmocnienia K dopuszcza się błąd kompensacji Δy (odwzorowania wielkości x w y) równy

$$\delta y = \frac{\Delta y}{y^\infty} = \frac{1}{1 + k \cdot \beta} \quad (1)$$

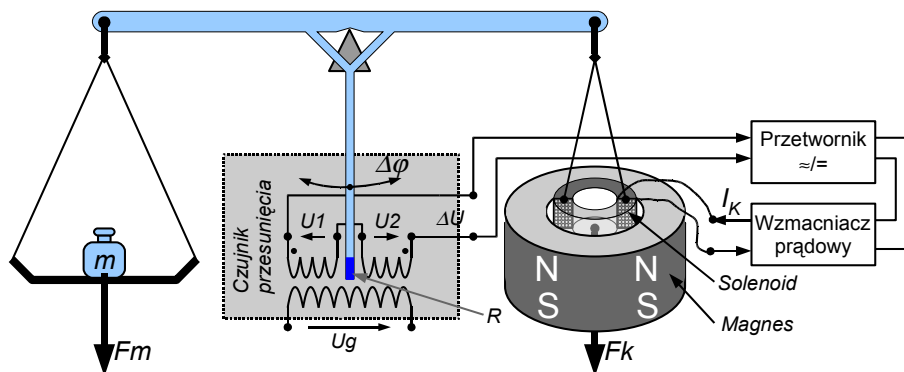
i nazywa błędem statycznym układu. Ten błąd jest cechą charakterystyczną układów statycznych. Istotną cechą kompensacyjnych układów pomiarowych, poza dużą dokładnością pomiaru jest możliwość uzyskania sygnału wyjściowego o dużej energii. W układach statycznych można uzyskać odpowiednio duży prąd wyjściowy, używany do przesyłania wyników pomiarów na odległość, sterowania regulatorami itp.

W wadze prądowej wykorzystuje się zjawisko działania siły Ampera¹ na przewód przewodzący prąd elektryczny, umieszczony w polu magnetycznym. Ta siła jest proporcjonalna do długości przewodu, indukcji pola magnetycznego i natężenia prądu. Waga prądowa to klasyczny wzorzec² prądu odtwarzający jego jednostkę w sposób definicyjny.

Przykładem statycznego układu kompensacyjnego jest rozpatrywany w ćwiczeniu przetwornik WT30 - 50mA zwany wagą prądową, który przetwarza siłę F (pośrednio masę ponieważ $F = m \cdot g$) na natężenie prądu elektrycznego I . W tej konstrukcji pole magnetyczne wytwarzane przez jeden solenoid zastąpiono polem magnetycznym stałego magnesu – układ magnetoelektryczny. W tym układzie występuje liniowa zależność siły F i natężenia prądu I .

Zasadę działania przetwornika WT30 (wagi prądowej) zilustrowano na rys.3. Jest to zmodyfikowana waga szalkowa. Przyjmuje się, że układ jest w stanie równowagi ($\Delta\phi = 0$) przy braku masy ($m = 0$). Obecność masy powoduje powstanie siły $F_m = m \cdot g$, która powinna być skompensowana (zrównoważona) siłą F_K , tak aby układ powrócił do stanu równowagi. Prąd stały I_K przepływający przez solenoid generuje pole magnetyczne, które w interakcji z polem magnetycznym magnesu wytwarza siłę kompensującą F_K .

$$F_K = C \cdot I_K \quad ; \text{gdzie } C - \text{stała konstrukcyjna układu solenoid-magnes.}$$



Rys.3. Zasada działania wagi prądowej, R – rdzeń z ferromagnetyku

Istotnym elementem układu jest czujnik przesunięcia. Składa się z trzech cewek. W wyniku zasilania jednej z nich napięciem zmiennym U_g , na dwóch pozostałych indukują się napięcia U_1 i U_2 . Cewki są połączone szeregowo w taki sposób, że wypadkowe napięcie ΔU jest ich różnicą: $\Delta U = U_1 - U_2$. W stanie równowagi, ferromagnetyczny rdzeń R znajduje się pośrodku ww. dwóch cewek, wtedy indukowane napięcia są sobie równe: $U_1 = U_2$. Brak równowagi oznacza przesunięcie się rdzenia R o kąt $\Delta\phi$ i w efekcie powstanie różnicy napięć: $\Delta U \neq 0$. Prąd I_K

¹ Nazwa pochodzi od francuskiego fizyka André Marie Ampère'a

² Obecnie nie stosuje się wagi prądowej do odtwarzania jednostki prądu z uwagi na jej stosunkowo małą dokładność.

Ćwiczenie nr 12. Waga prądowa

zasilający solenoid powstaje w wyniku przetworzenia różnicy napięć ΔU na prąd stały i jego wzmocnienia:

$$I_K = K \cdot \Delta U \quad \text{zatem} \quad F_K = C \cdot K \cdot \Delta U \approx Fm$$

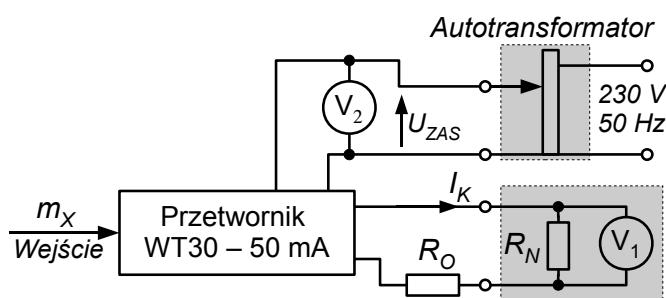
Zapewniając odpowiednio dużą wartość wzmocnienia K można zminimalizować błąd odwzorowania do siły do żądanej wartości (patrz wzór 1) i w efekcie uzyskać liniową zależność natężenia prądu I_K od siły F_K , a tym samym od masy m .

$$I_K = F_K \cdot C_U = m \cdot g \cdot C_U; \quad \text{gdzie } C_U - \text{stała konstrukcyjna układu, } g - \text{przyśpieszenie ziemskie.}$$

Zwiększenie wzmocnienia K nie ma sensu powyżej wartości, przy której o liniowości i dokładności przetwarzania zaczyna wyraźnie decydować liniowość i dokładność przetwarzania prądu I_K na siłę F_K , złe wyważenie układu dźwigni, luzy, tarcia, itp. W tego typu konstrukcji można więc bez większych trudności zapewnić dokładność lepszą od 0,5%. Obecność tarcia i luzów może spowodować, że charakterystyka będzie nieliniowa w zakresie małych mas.

3. Program ćwiczenia

1. Wyznaczyć statyczną charakterystykę przetwornika: $I_K = f(m)$ dla $U_{ZAS} = 220 \text{ V}$,
2. Wyznaczyć błąd pobudliwości dla: $m_P = 0$ (próg pobudliwości), $m_P = 500 \text{ g}$
3. Wyznaczyć niepewność pomiaru masy z serii pomiarów:
 - a) na początku zakresu – np. $m_N = 50 \text{ g}$,
 - b) przy końcu zakresu – np. $m_N = 450 \text{ g}$
4. Z badać podatność układu na zmiany napięcia zasilania U_{ZAS} . Zmiana U_{ZAS} może spowodować przesunięcie zera, zmianę czułości, progu czułości, pobudliwości i niepewności pomiaru. Powtórzyc badania z pkt. 3.1 dla napięcia zasilania zwiększonego o 10%, i zmniejszonego o 15%.
5. Wyznaczyć rezystancję wyjściową R_W przetwornika. Przetwornik od strony wyjścia można traktować jako źródło prądowe sterowane masą. Rezystancja wewnętrzna źródła idealnego prądowego $R_W = \infty$, źródło rzeczywiste powinno mieć $R_W \gg \gg R_{O\text{MAX}}$.
6. Porównać zmierzone parametry elektryczne z wartościami znamionowymi określonymi w tab.1 oraz wyjaśnić źródła błędów pomiaru masy za pomocą wagi prądowej.



Rezystor R_N i woltomierz V_1 zastępują amperomierz: $I_K = \frac{U_1}{R_N}$.

Zastosować:

$R_N = 100 \Omega$, $U_Z = 10 \text{ V}$
lub
 $R_N = 10 \Omega$, $U_Z = 1 \text{ V}$
 U_Z – zakres woltomierza

Rys.4. Schemat układu pomiarowego do badania wagi prądowej

4. Uwagi szczególne do programu ćwiczenia

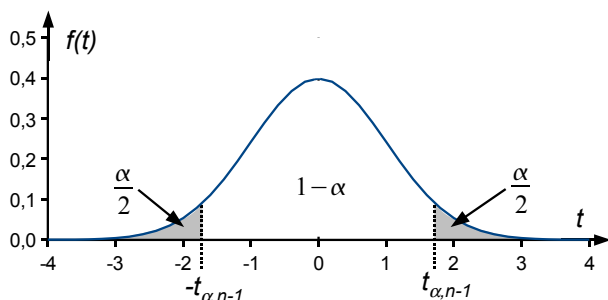
Jeśli nie wskazano inaczej, to badania wykonać w warunkach: $U_{ZAS} = 220 \text{ V}$, $R_O = 0 \Omega$.

- Ad. 3.1. Sugerowane punkty pomiarowe do wyznaczenia statycznej charakterystyki: 0, 2, 5, 10, 20, 50, 100, pozostałe ze skokiem co 50 g do 500 g. Sporządzić wykres charakterystyki przetwarzania. Wyznaczyć błąd nieliniowości przetwarzania, zdefiniowany w stosunku do prostej aproksymującej punkty pomiarowe i przechodzącej przez zero. Wyznaczyć czułość wagi prądowej zdefiniowanej jako nachylenie prostej aproksymującej charakterystykę $I_K = f(m)$.
- Ad. 3.2. Błąd pobudliwości w punkcie pomiarowym m_P definiuje się jako najmniejszy przyrost masy Δm , który spowoduje istotną (zauważalną) zmianę (przyrost) prądu wyjściowego przetwornika. Do zadanej masy m_P delikatnie dokładać na szalkę coraz większe wartości masy np.: 0,1 g, 0,2 g, 0,5 g, 1 g itd, aż do zauważalnej zmiany prądu wyjściowego I_K .

Ćwiczenie nr 12. Waga prądowa

Ad. 3.3. W celu wyznaczenia niepewności należy wielokrotnie zmierzyć (minimum kilkanaście razy) prąd wyjściowy dla tej samej wartości masy m_N – kolejno kłaść i zdejmować odważnik o masie m_N z szalki wagi. Następnie należy obliczyć odchylenie średnie kwadratowe s pojedynczego pomiaru z serii oraz, korzystając z rozkładu t-Studenta*, (rys.5) wyznaczyć niepewność pomiaru Δx (składową losową) przy zadanym poziomie ufności.

Ad. 3.5. Dla zadanej wartości masy np. $m_W = 500$ g, 250 g wyznaczyć charakterystykę $I_O = f(R_O)$, obliczyć nachylenie prostej a aproksymującej otrzymaną charakterystykę ($a = \Delta I_O / \Delta R_O$). Rezystancję wewnętrzną źródła R_W obliczyć ze wzoru: $R_W \approx I_O / a$. Wartość rezystancji R_O zmieniać od 0 do $(650 - R_N) \Omega$.



wartość średnia z serii:

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

odchylenie średnie kwadratowe pojedynczego pomiaru

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

x_i – wyniki kolejnych pomiarów,
 n – liczebność próby.

Rys.5. $f(t)$ – rozkład t-Studenta. Ilustracja związku między przedziałem ufności (od $-t_{\alpha,n-1}$ do $t_{\alpha,n-1}$) a poziomem ufności ($1 - \alpha$) – powierzchnia pod krzywą. Oznacza to, że $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ wyników jest zawartych w przedziale ufności: od $-t_{\alpha,n-1}$ do $t_{\alpha,n-1}$.

Niepewność pomiaru (jej składową losową) oblicza się z zależności: $\Delta x = s \cdot t_{\alpha,n-1}$.

Tab.1. Tablica wartości $t_{\alpha,n-1}$ rozkładu t-Studenta.

Poziom ufności ($1 - \alpha$)	$n-1$ – liczba stopni swobody														
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0,95	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26	2,23	2,20	2,18	2,16	2,14	2,13	2,12	2,11
0,99	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	3,17	3,11	3,05	3,01	2,98	2,95	2,92	2,90

Przykład. Z serii 15 pomiarów obliczono $\bar{x} = 49,77$ g i $s = 1,23$ g. Dla $n-1 = 14$ i poziomu ufności $1 - \alpha = 0,95$ odczytano z tab.1. $t_{\alpha,n-1} = 2,14$. Stąd: $\Delta m = 2,14 \cdot 1,23$ [g] = $2,63$ g = $2,6$ g. Zatem 95 % wyników zawiera się w przedziale $49,8$ g \pm $2,6$ g.

Tab.2. Parametry techniczne przetwornika WT30 – 50 mA

Zasilanie U_{ZAS}	220 V, 50 Hz	Opór obciążenia R_O	0 ÷ 650 Ω
Dopuszczalne zmiany U_{ZAS}	+10 %, - 15 %	Tętnienie prądu I_K	10 %
Pobór mocy	65 VA	Próg czułości	10 ⁻⁴ końcowej wartości
Pobór prądu	0,3 A	Niedokładność pomiaru	$\pm 0,5\%$ F_N
Prąd wyjściowy I_K	0 - 50 mA	stała czasowa	0,1 s
Zakres pomiarowy F_N	500 G (500 g masy)	temperatury otoczenia	- 10°C do 150°C

Opracował: dr inż. Adam Krzywaźnia

Instytut Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej Wydziału PPT Politechniki Wrocławskiej

* Rozkład t-Studenta jest stosowany dla nielicznej próby – zwykle dla $n < 30$.