

# Technika pomiarowa

Prof.. dr hab. inż. Sławomir Tumański

E-mail: [slawomir.tumanski@ee.pw.edu.pl](mailto:slawomir.tumanski@ee.pw.edu.pl)

[www.tumanski.pl/dydaktyka](http://www.tumanski.pl/dydaktyka)

Tel. 693 428 056

Organizacja zajęć:

Wykłady odbywają się zdalnie w czwartek g 10.15 – 11.45 (bez przerwy)

Wykłady na platformie MS Teams

Wykłady odbywają się w cyklu:

4 wykłady – kolokwium – 4 wykłady – kolokwium – 4 wykłady – kolokwium

Na każdym kolokwium będą 4 pytania ocenione na 0 – 1 pkt.

Aby być zwolnionym z egzaminu trzeba otrzymać:  $12 \times 0.75 = 9$  pkt.

Studenci którzy nie zdobędą tych punktów zdają egzamin w sesji.

Im więcej punktów tym lepsza ocena końcowa.

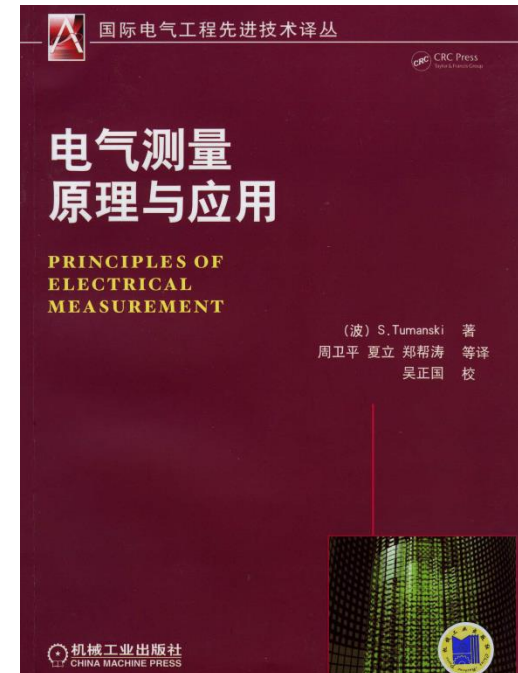
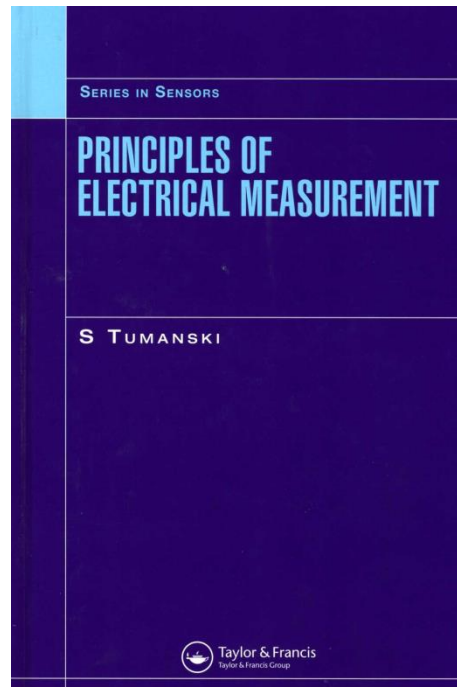
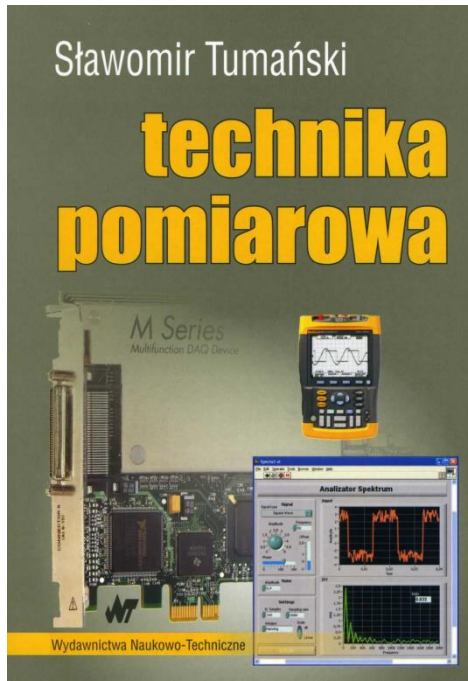
# Materiały pomocnicze

Większość materiału wykładu zawarta jest w podręczniku:

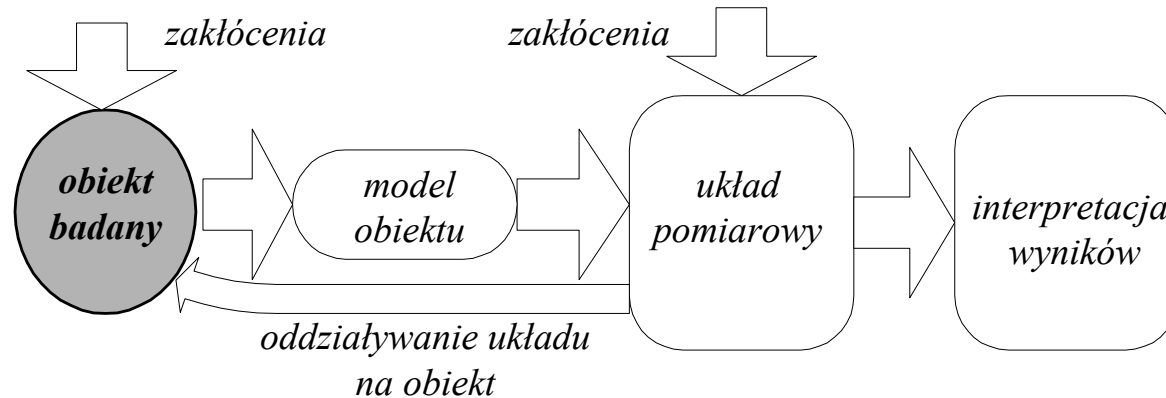
Sławomir Tumański – Technika pomiarowa (3 wersje jak niżej)

Na stronie [www.tumanski.pl/dydaktyka](http://www.tumanski.pl/dydaktyka) dostępna jest nowa wersja angielska podręcznika: ch2.pdf, ch3.pdf, ch4.pdf

W przeddzień każdego wykładu na stronie [www.tumanski.pl/dydaktyka](http://www.tumanski.pl/dydaktyka) będzie udostępniany konspekt w PowerPoint.

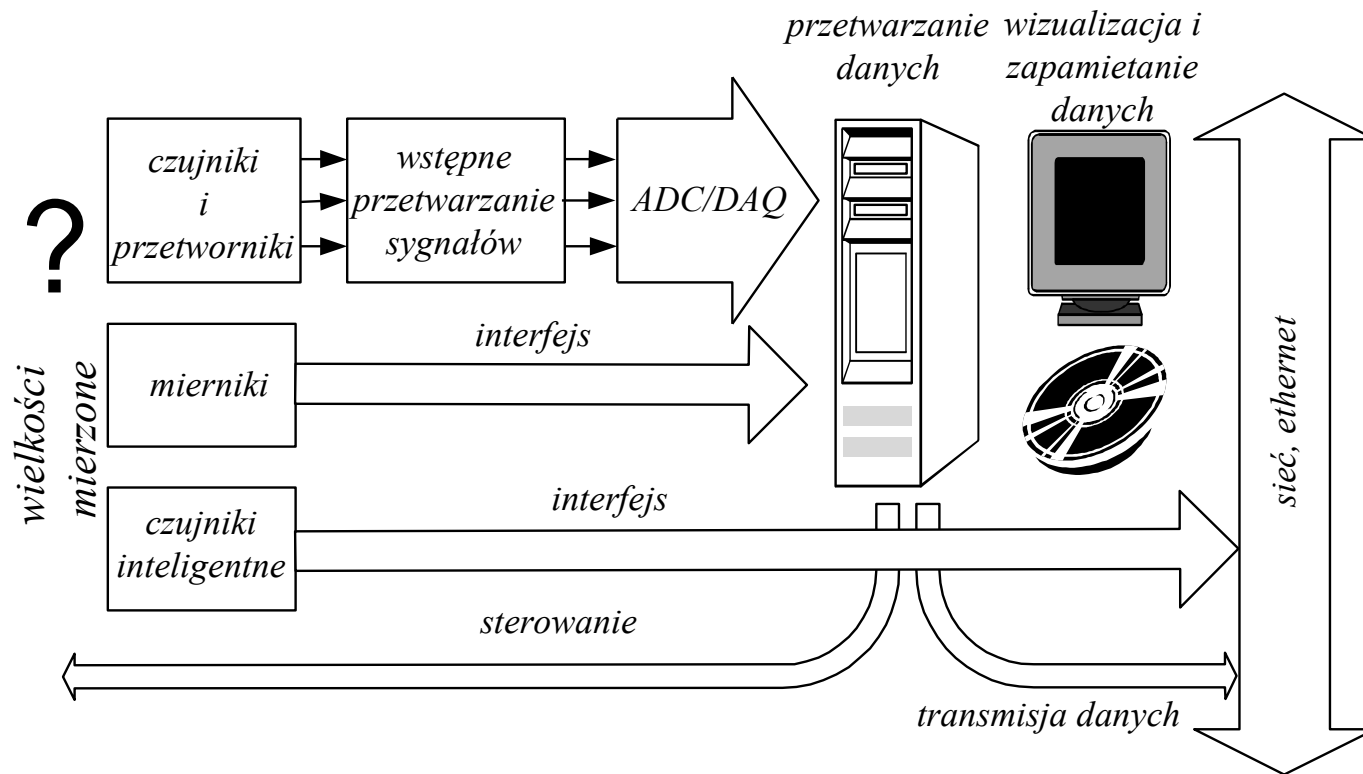


# Pomiar



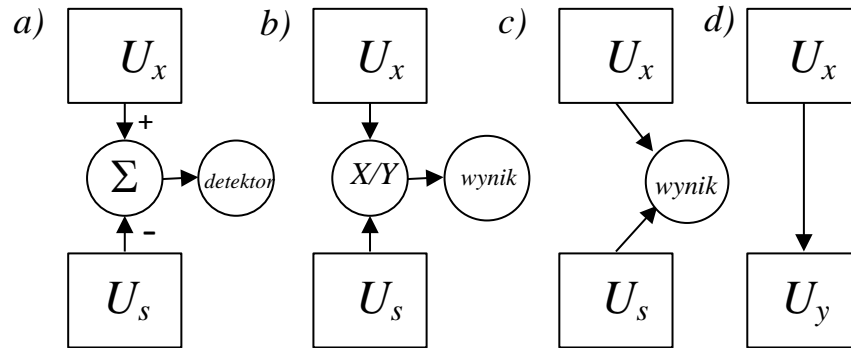
*Pomiar* jest to proces poznawczy polegający na porównaniu z odpowiednią **dokładnością** (w danej chwili i w danych warunkach) wartości wielkości mierzonej z pewną jej **wartością wzorcową** przyjęta za jednostkę miary”.

# System pomiarowy



# Podstawowe metody pomiarowe

•Rys. 1. Podstawowe metody pomiarowe.



•**a) Kompensacja**

•Od wyniku pomiaru  $U_x$  odejmowana jest wartość wzorcowa  $U_s$ . Jeśli detektor wskaże zero to znaczy że  $U_x = U_s$

•**b) Komparacja**

•Wyznaczany jest stosunek  $U_x/U_s$ . Jeśli  $U_x/U_s = 1$  to oczywiście  $U_x = U_s$ . Znając wartość  $U_x/U_s$  zawsze możemy określić mierzona wartość  $U_x$  jeśli znamy wartość wzorcową  $U_s$ .

•**c) Postawienie**

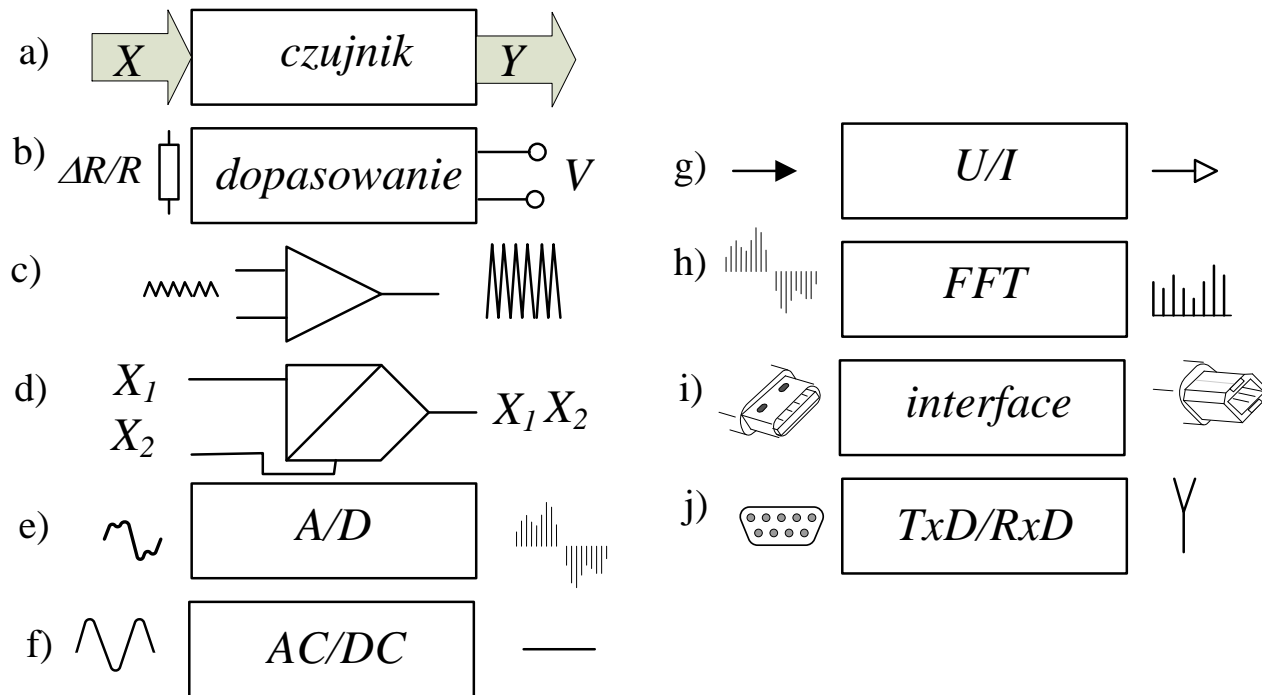
•W taki sam sposób mierzymy wartość mierzona  $U_x$  oraz wartość wzorcową  $U_s$ . Jeśli wynik będzie ten sam to  $U_x = U_s$  (metoda dzie mówiona później)

•**d) Przetwarzanie i transmisja sygnału**

# Przetwarzanie i transmisja sygnału – przykłady

## Przetworniki pomiarowe

Rys. 2. Przetworniki pomiarowe przykłady: a) czujnik, b) układ dopasowania – conditioning circuit, c) wzmacniacz pomiarowy, d) mnożnik, e) przetwornik analogowo-cyfrowy (i cyfrowo-analogowy), f) przetwornik napięcia przemiennego AC na napięcie stałe DC, g) przetwornik napięcia na prąd, h) szybka transformata Fouriera – przejście z dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości, i) interfejs – komunikacja między dwoma obiektami, j) przesyłanie sygnału

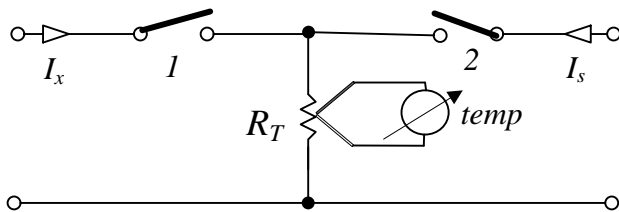


# Metoda podstawienia - przykład

Rys. 3. Zasada metody podstawienia

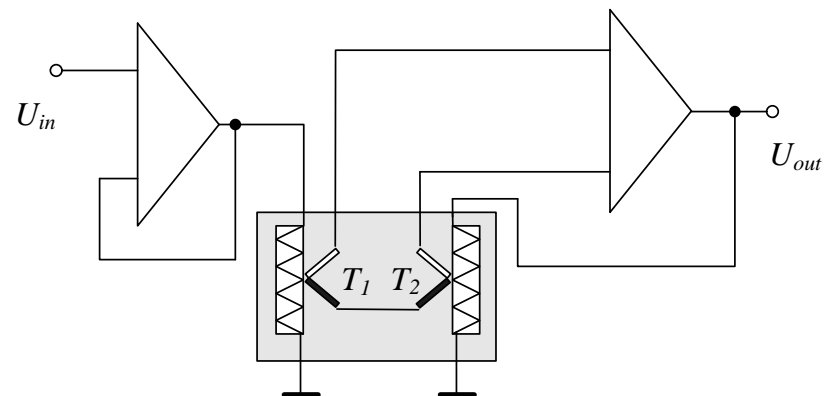
W Pierwszym etapie przepuszczamy przez opornik mierzony prąd przemienny. W drugim etapie przez ten sam opornik przepuszczamy prąd stały do momentu kiedy nagrzej się do tej samej temperatury.

W ten sposób trudny pomiar napięcia przemiennego zastępujemy łatwiejszym pomiarem napięcia stałego



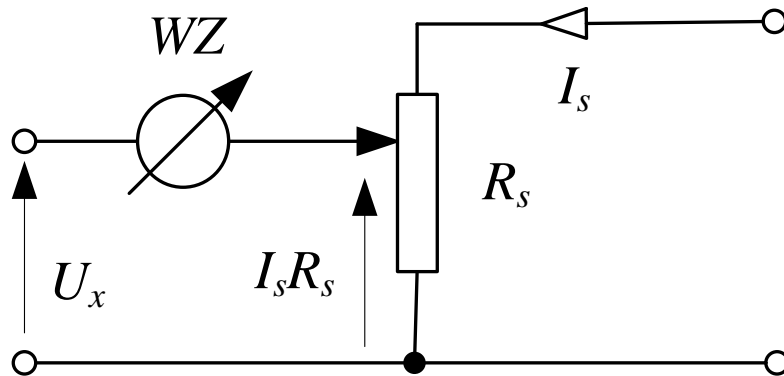
Rys. 4. Automatyczny układ podstawienia przetwornik AC/DC

Przemienny prąd wejściowy po wzmacnieniu podgrzewa mikro-termoopornik – drucik platynowy. Temperatura mierzona jest czujnikiem termooigniwo w którym napięcie wyjściowe zależy od temperatury. Temperatura drugiego grzejnika mierzona jest w taki sam sposób a sygnały obu czujników odejmują się. Dzięki sprzężeniu zwrotnemu prąd wyjściowy zmienia się do momentu kiedy różnica sygnałów obu czujników jest równa zero.



# Zasada metody kompensacyjnej

•Rys. 5 Zasada metody kompensacyjnej



•Główną zaletą kompensatora jest jego wielka dokładność. Zależy ona tylko od dokładności wzorca Westona i dokładności opornika. Oporniki umiemy wykonywać z bardzo dużą dokładnością.

•Inną zaletą kompensatora jest fakt że w momencie równowagi nie jest pobierany prąd z układu (ten woltomierz ma rezystancję wejściową równą nieskończoności , co jest dużą zaletą.

•Przez nastawny opornik wzorcowy  $R_s$  przepływa prąd wzorcowy  $I_s$ .

•Wskaźnik zera WZ wskazuje różnicę między napięciem mierzonym  $U_x$  i spadkiem napięcia na rezystorze  $I_s R_s$ . Tak zmieniamy wartość opornika aby wskaźnik zera wskazał zero i wtedy:  $U_x = I_s R_s$ .

•Jeśli prąd wzorcowy ma równą wartość np. 1 mA to wartość opornika nastawnego bezpośrednio wskazuje wartość napięcia.

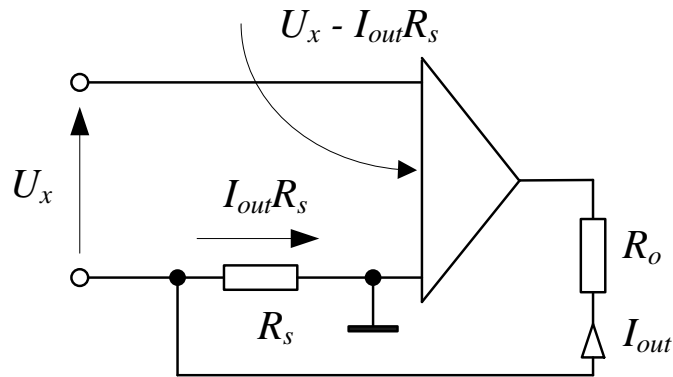
•Skąd mamy prąd wzorcowy? Nie mamy wzorca prądu ale mamy bardzo dokładny wzorec napięcia tzw ogniwo Westona. W pierwszym etapie należy więc kompensator skalibrować. Polega to na tym że na wejściu umieszczamy ogniwo wzorcowe Westona i na oporniku ustawiamy znana wartość napięcia tego ogniwa. Teraz regulujemy tak prąd żeby wskaźnik wskazał zero. Mamy więc ustawiony prąd wzorcowy i kompensator jest gotowy do pracy.



# Kompensacyjny przetwornik napięcia

• Układ ten realizuje ideę kompensacji jak na rys.5 ale automatycznie bez udziału operatora zmieniającego wartość opornika.

Rolę wskaźnika zera spełnia teraz wzmacniacz na wejściu którego jest różnica napięć  $U_x - I_{out}R_s$ . Dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu układ dąży do sytuacji żeby na wejściu wzmacniacza było napięcie równe zero, czyli  $U_x = I_{out}R_s$ . Prąd wyjściowy  $I_{out}$  jest miarą mierzonego napięcia.



Rys. 6. Kompensacyjny przetwornik napięcia

Ważną zaletą tego układu jest wielka dokładność. Dla układu ze sprzężeniem zwrotnym jego stała przetwarzania  $G = WY/WE$  jest opisana wzorem

$$G = \frac{K_u}{1 + \beta K_u}$$

gdzie  $K_u$  jest wzmocnieniem wzmacniacza a  $\beta$  jest współczynnikiem sprzężenia zwrotnego. Dzieląc licznik i mianownik przez  $K_u$  mamy:

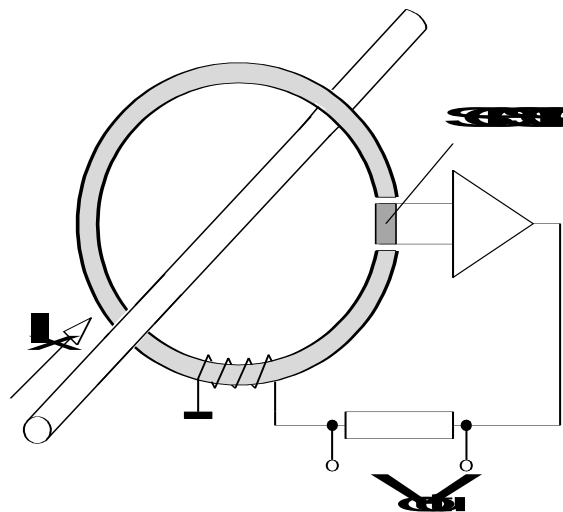
$$G = \frac{1}{\frac{1}{K_u} + \beta} \approx \frac{1}{\beta}$$

A więc jeśli wzmocnienie wzmacniacza jest dostatecznie duże to dokładność przetwarzania zależy tylko od  $1/\beta$ . A  $\beta$  jest w tym przypadku wartością opornika który umiemy wykonać z dużą dokładnością. Warto zwrócić uwagę że dokładność nie zależy od wzmocnienia wzmacniacza.

Inną ważną zaletą tego układu jest to że sygnałem wyjściowym jest prąd. Jest to korzystne przy przesyłaniu sygnału ponieważ gdyby wyjściem było napięcie to spadek napięcia na przewodach łączących byłby źródłem znacznego błęd.

# Kompensacyjny przetwornik prądu typu LEM

• Obecnie do pomiaru (przetwarzania) prądu i napięcia bardzo popularne są przetworniki typu LEM.



Rys. 7. Przetwornik prądu typu LEM

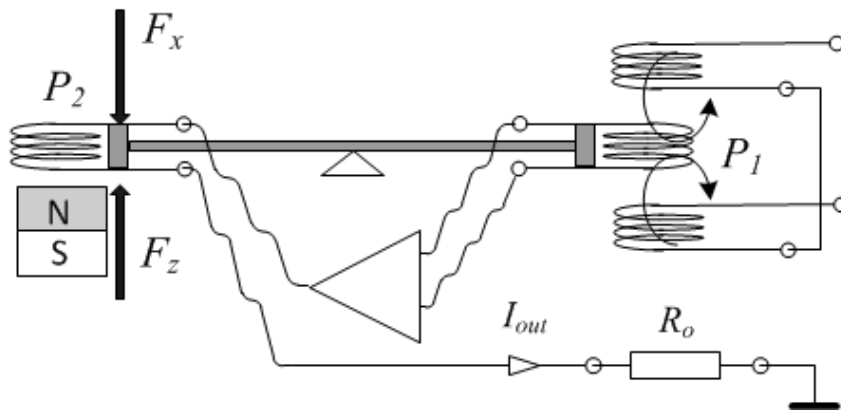
W przetwornikach LEM mamy do czynienia z kompensacją dwóch strumieni magnetycznych. Na przewód z mierzonym prądem nakładamy rdzeń magnetyczny w formie pierścienia ze szczeliną. W szczelinie tej umieszczony jest wskaźnik zera – w tym przypadku czujnik pola magnetycznego typu hallotron.

Prąd mierzony wywołuje w rdzeniu strumień magnetyczny. Detektor zera wykrywa pole magnetyczne i daje sygnał prądowy, który po wzmacnieniu przepływa przez cewkę nawiniętą na rdzeniu. Cewka ta wytwarza strumień magnetyczny przeciwnie skierowany do strumienia od prądu mierzonego.

Czujnik mierzy więc różnicę obu strumieni, a układ dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu dąży do sytuacji, żeby sygnał na wejściu wzmacniacza był równy zero.

Prąd wyjściowy w cewce jest więc miarą prądu mierzonego. Dużą zaletą układu jest oddzielenie galwaniczne między wejściem a wyjściem.

# Kompensacyjny przetwornik siły – waga prądowa



Rys. 8. Przetwornik siły na prąd

Przetwornik typu waga prądowa był kiedyś ważnym przetwornikiem siły i przepływ – dziś jest ważny w innej roli.

Siła działająca na belkę powoduje jej wychylenie. To wychylenie wykrywa indukcyjny czujnik przesunięcia. Działa on w ten sposób że jeśli ruchoma cewka jest dokładnie w środku między dwoma cewkami wtórnymi to sygnał wyjściowy jest równy zero.

Przesunięcie cewki ruchomej pod wpływem mierzonej siły spowoduje pojawienia się na wejściu wzmacniacza sygnału. Ten sygnał prądu przepływa przez cewkę umieszczoną na belce i cewka zostanie przesunięta pod wpływem pola magnetycznego magnesu.

Dzięki sprzężeniu zwrotnemu w stanie równowagi obie siły się znoszą – kompensują.

Waga prądowa typu Kibla jest dziś używana jako kwantowy wzorzec masy.

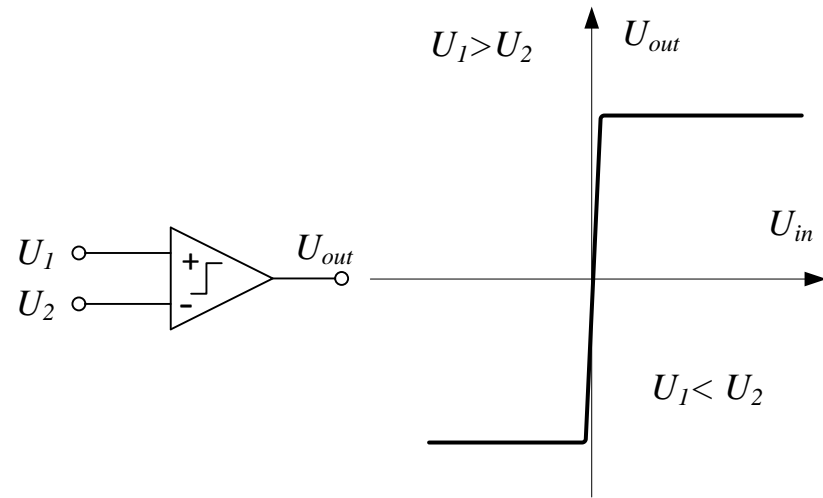
# Cyfrowy wskaźnik zera - komparator

•Zanim omówimy przykład cyfrowego kompensatora typu SAR omówmy cyfrowy wskaźnik zera. Jest nim układ zwany komparatorem.

•Na dwa wejścia komparatora podawane są dwa napięcia  $U_1$  i  $U_2$  – komparator jest wzmacniaczem sygnału  $U_1-U_2$ .

•Przy dużym wzmacnieniu wzmacniacza przyjmuje on dwa stany – nasycenie do +5V gdy  $U_1 > U_2$  oraz nasycenie do -5V gdy sygnał jest  $U_1 < U_2$ . Sygnałowi +5V odpowiada stan logiczny 1, sygnałowi -5V stan logiczny 0.

A więc w momencie zrównania obu napięć następuje przeskok sygnału wyjściowego ze stanu 0 do stanu 1.

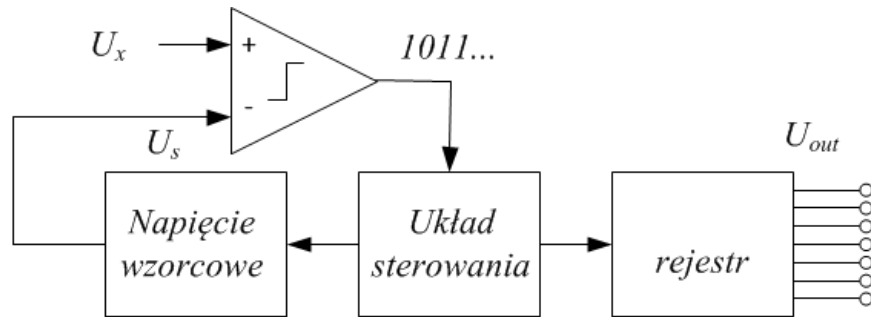


Rys.9. Metoda kompensacji zmian temperatury To

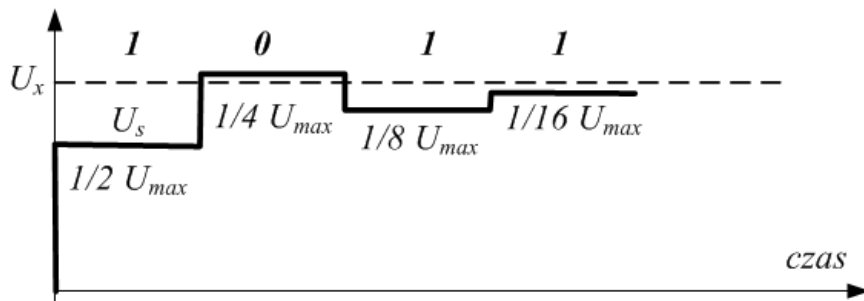
# Cyfrowy przetwornik kompensacyjny - SAR

Przetwornik typu SAR (Successive Approximation Register – metoda kolejnych przybliżeń) jest podstawowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym działającym na zasadzie kompensacji napięć.

- Na wejścia komparatora (wskaźnika zera) podawane są dwa napięcia – mierzone  $U_x$  oraz wzorcowe  $U_s$  ale w kolejnych krokach z wartościami  $\frac{1}{2} U_s$ ,  $\frac{1}{4} U_s$ ,  $\frac{1}{8} U_s$  itd. – gdzie  $U_s$  jest zakresem przetwornika.



- Prześledźmy działanie układu dla napięcia mierzonego 0.7V. W pierwszym kroku na drugie wejście zostaje dołączone napięcie 0.5V – połowa  $U_s$ . Komparator daje na wyjściu stan 1. W drugim kroku (dla drugiego bitu) zostaje poane dodatkowe napięcie 0.25V a więc razem 0.75V. Komparator daje sygnał 0 i ten krok jest anulowany. W trzecim kroku zostaje dodane napięcie 0.125V a więc razem 0.625. Komparator daje sygnał 1.

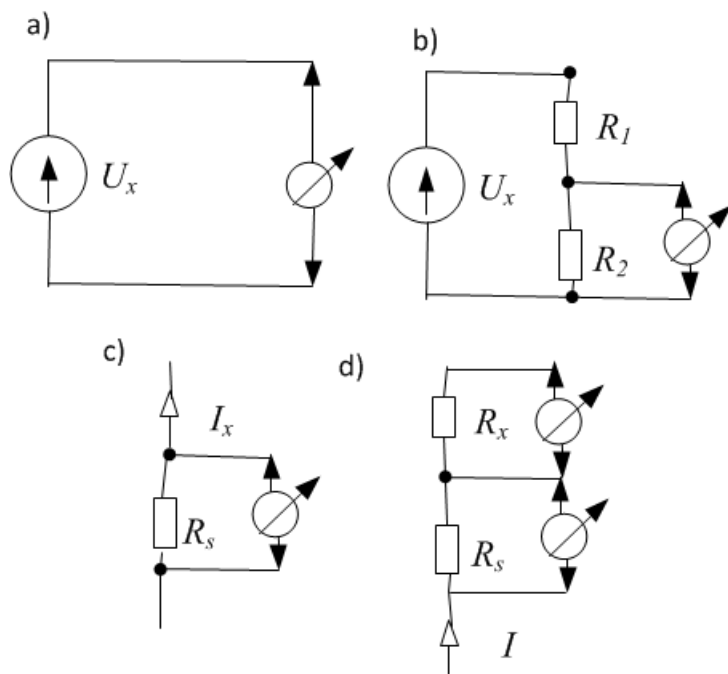


I tak dalej – jeśli jest to przetwornik 8-bitowy to tych kroków jest 8. Otrzymujemy sygnał cyfrowy w kodzie dwójkowym: 10101101.

Rys. 10. Przetwornik typu SAR5

# Pomiar napięcia, prądu i rezystancji kompensatorem napięcia

Miernikiem napięcia (kompensatorem napięcia) możemy oczywiście mierzyć napięcie (Fig.11a)



Jeśli napięcie jest większe niż kilka V to możemy stosować dzielnik napięcia (rys.11b) i wówczas miernik mierzy napięcie:

$$U = U_x \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Jeśli chcemy mierzyć prąd  $I_x$  to możemy użyć opornika wzorcowego (bocznika) – rys. 11c. Spadek napięcia na boczniku będzie

$$U = I_x R_s$$

Pomiar rezystancji możemy zrealizować mierząc dwukrotnie – spadek napięcia na oporniku mierzonym  $R_x$  i wzorcowym  $R_s$  (Fig. 11d)