

**Zakład Napędów Wieloźródłowych  
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich PW  
Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki**

**Ćwiczenie E3 - instrukcja**

**Pomiar wielkości nieelektrycznych: temperatury,  
przemieszczenia i prędkości**

Data wykonania ćwiczenia.....

Data oddania sprawozdania.....

**Zespół wykonujący ćwiczenie:**

	<i>Nazwisko i imię</i>	<i>ocena końcowa</i>
1.	.....	.....
2.	.....	.....
3.	.....	.....
4.	.....	.....
5.	.....	.....
6.	.....	.....
7.	.....	.....
8.	.....	.....
9.	.....	.....
10.	.....	.....

**Wydział SiMR PW**

**Rok ak. 20.../20...**

**Semestr.....**

**Grupa.....**

**Warszawa 2007r.**

## Spis treści

1.	<b>CEL I ZAKRES ĆWICZENIA .....</b>	<b>3</b>
2.	<b>POMIAR TEMPERATURY - WIADOMOŚCI TEORETYCZNE.....</b>	<b>3</b>
	2.1 PRZETWORNIKI POMIAROWE. ....	3
	2.2 OGNIWO TERMoeLEKTRYCZNE.....	5
	2.3 WYBRANE UKŁADY POMIAROWE. ....	5
3.	<b>POMIAR PRZESUNIĘCIA - WIADOMOŚCI TEORETYCZNE .....</b>	<b>7</b>
4.	<b>POMIAR PRĘDKOŚCI - WIADOMOŚCI TEORETYCZNE.....</b>	<b>8</b>
5.	<b>LITERATURA POMOCNICZA.....</b>	<b>9</b>

## 1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z teorią dotyczącą elektrycznych pomiarów wielkości nieelektrycznych w zakresie zastosowania do pomiarów temperatury. W ćwiczeniu wykonuje się: skalowanie mierników temperatury, pomiary nagrzewania elementu radiatora i wyznaczanie jego izoterm.

Druga część ćwiczenia ma na celu poznanie metod i aparatury do pomiaru długości, odkształcenia, siły, naprężenia, momentu obrotowego, mocy, czasu, liczby obrotów, przepływu, przyspieszenia, wibracji, gęstości i lepkości. W ramach pomiaru długości prowadzi się badania przesunięć liniowych i kątowych. Do tego celu wykorzystuje się czujniki pojemnościowe, indukcyjne, optoelektryczne, mechaniczne (pływakowe, membranowe) itp.

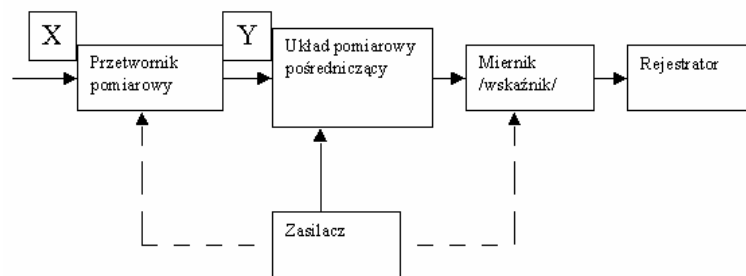
W ramach ćwiczenia przeprowadzone będą badania małych i dużych przesunięć mechanicznych za pomocą indukcyjnych czujników różnicowych.

Trzecia część ćwiczenia ma na celu poznanie metod i aparatury do pomiaru prędkości obrotowej silników elektrycznych, spalinowych i obracających się elementów maszyn.

## 2. Pomiar temperatury - wiadomości teoretyczne

W wielu procesach przemysłowych jest konieczne dokonywanie pomiarów temperatury. Obecnie istnieje stała tendencja do wykonywania tych pomiarów metodami elektrycznymi. Ma ona liczne zalety, które głównie dotyczą możliwości dokonywania pomiarów z dużą czułością, dokładnością i w bardzo krótkim czasie. Umożliwia ona wykonywanie pomiarów przy zastosowaniu typowych metod i urządzeń pomiarowych w szerokim zakresie zmian wartości temperatury bez potrzeby zmiany metody i urządzenia pomiarowego, zautomatyzowanie pomiarów i automatycznego uwzględniania poprawek, połączenia pomiarów z automatyczną regulacją, łatwe rejestrowanie wyników pomiarów i zdalne dokonywanie pomiarów.

Jednym z podstawowych problemów związanych z tą metodą jest zagadnienie przetworzenia nieelektrycznej wielkości mierzonej – temperatury na wielkość elektryczną. Funkcję tę spełnia pierwszy element elektrycznego przyrządu do mierzenia wielkości nieelektrycznej zwany przetwornikiem. Pozostałe elementy przyrządu to układy pośredniczące, przetwarzające parametr elektryczny przetwornika w sygnał nadający się do uruchomienia miernika lub wskaźnika. Na wyjściu urządzenia pomiarowego znajduje się najczęściej wyskalowany w jednostkach mierzonej wielkości przyrząd wskazówkowy lub rejestrujący.



**Rys. 1. Schemat blokowy układu elektrycznego przyrządu pomiarowego do pomiaru wielkości nieelektrycznej**

### 2.1 Przetworniki pomiarowe

Przetworzenie mierzonej wielkości nieelektrycznej w wielkość elektryczną następuje w przetworniku pomiarowym. Przetworniki można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- przetworniki parametryczne (bierne),
- przetworniki generacyjne (czynne).

W przetwornikach parametrycznych mierzona wielkość nieelektryczna powoduje zmianę parametru elektrycznego tj. np. rezystancji, indukcyjności, pojemności lub częstotliwości.

W przetwornikach generacyjnych zmiana mierzonej wielkości nieelektrycznej powoduje powstanie stałej lub zmiennej siły elektromotorycznej. Taki przetwornik jest źródłem prądu elektrycznego.

Podstawową wielkością charakteryzującą każdy przetwornik pomiarowy jest jego funkcja przenoszenia (w najogólniejszym przypadku funkcja przejścia – transmitancja) określająca charakterystykę jego pracy i wyrażająca związek między wielkością wyjściową i wejściową w przetworniku  $Y = f(x)$ , przy czułości jako  $\zeta = \frac{dY}{dX}$

Jeżeli czułość zależy od wielkości wejściowej  $X$  to charakterystyka przetwornika jest nieliniowa.

Jako klasyczne elementy pomiarowe w miernictwie wielkości nieelektrycznych stosuje się przy przetwornikach biernych układy mostkowe lub kompensacyjne (różnicowe), a przy generacyjnych galwanometry lub miliwoltomierze o dużej rezystancji wewnętrznej.

Do pomiarów temperatury i wielkości z nią związanych służą przetworniki termometryczne. Dzieli się one na dwie grupy:

- przetworniki rezystancyjne metalowe i półprzewodnikowe (termistory),
- przetworniki ogniwa termoelektryczne (termopary).

W przetwornikach rezystancyjnych termometrycznych wykorzystuje się zależność rezystywności przewodników od temperatury. Przetworniki te powinny być zasilane bardzo małym prądem, aby ciepło wydzielane przez ten prąd w przetworniku było nieznaczne w porównaniu z ciepłem otrzymywanym z pomiaru. Podstawowym warunkiem stawianym materiałom, używanym do budowy takich przetworników, jest możliwie duży i stały temperaturowy współczynnik rezystancji elektrycznej przy możliwie dużej rezystywności. Z metali najczęściej stosowane są: platyna, nikiel, miedź.

Dla platyny i niklu zależność rezystancji od temperatury opisuje zależność:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2)$$

gdzie:  $R_0$  – rezystancja w temperaturze  $0^\circ\text{C}$  [ $\Omega$ ],  $R_T$  – rezystancja w temperaturze  $T$  [ $\Omega$ ],  
 $T$  – temperatura pomiaru [ $^\circ\text{C}$ ],  $\alpha$  i  $\beta$  – temperaturowe współczynniki rezystancji pierwszego i drugiego rzędu:

Temperaturowe współczynniki dla platyny i niklu:

$$- \alpha_{\text{Pt}} = 3,968 \cdot 10^{-3} [1/^\circ\text{C}], \beta_{\text{Pt}} = -5,847 \cdot 10^{-7} [1/^\circ\text{C}]^2$$

$$- \alpha_{\text{Ni}} = 4,6 \cdot 10^{-3} [1/^\circ\text{C}], \beta_{\text{Ni}} = -6,93 \cdot 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]^2$$

Dla miedzi:

$$R_T = R_0(1 + \alpha_0(T - T_0))$$

gdzie:  $R_0$  - rezystancja w temperaturze  $T_0$  [ $\Omega$ ],  $\alpha_0$  –  $4,28 \cdot 10^{-3} [1/^\circ\text{C}]$ .

Temperaturowe zakresy zastosowań tych czujników są następujące: dla Pt od  $-200$  do  $850^\circ\text{C}$ , dla Ni od  $-60$  do  $200^\circ\text{C}$ , dla Cu od  $-50$  do  $150^\circ\text{C}$ .

Jako przetworniki w pomiarach temperatur stosuje się również półprzewodniki (termistory). Mają one duży ujemny współczynnik temperaturowy rezystancji rzędu  $-(0,03 - 0,04) [1/^\circ\text{C}]$  i rezystancję  $1 - 200 [k \Omega]$  dla pomiarów temperatur w zakresie  $-100 - 120^\circ\text{C}$ . Wadą ich jest rozrzut charakterystyk  $R=f(T)$  w poszczególnych egzemplarzach.

Zmiany rezystancji termistora w zależności od temperatury ujmuje przybliżony wzór empiryczny:

$$R_T = R_0 \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

gdzie:  $B$  – stała materiałowa (około 4000).

Przewaga czujników termistorowych nad rezystancyjnymi polega na znacznie większym temperaturowym współczynniku rezystancji i małych rozmiarach umożliwiających prawie punktowy pomiar. Wytwarza się je przeważnie z tlenków, siarczków lub krzemianów metali jak: Mn, Ni, Co, Cu, Fe, Zn, Al., lub Mg.

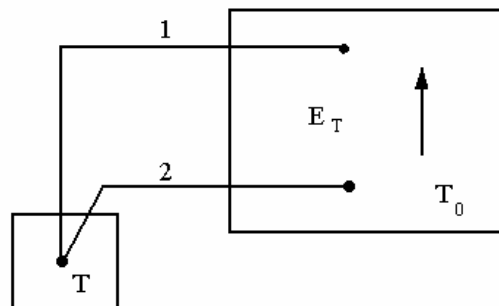
Charakterystyka napięcia, na zaciskach termistora, jest liniowa w funkcji prądu powodującego samo nagrzewanie się czujnika.

## 2.2 Ogniwo termoelektryczne

Dwa przewodniki wykonane z różnych materiałów tworzą ogniwo termoelektryczne. Siła termoelektryczna ( $E_T$ ) termo-ogniwa zależna jest od temperatury  $T$ , w której znajduje się punkt spoiny dwu różnych metali oraz od temperatury  $T_0$ , w której znajdują się wolne końce przewodników:

$$E_T = \alpha(T - T_0)$$

gdzie:  $\alpha_T$  – współczynnik termoelektryczny zależny od materiałów spoiny.



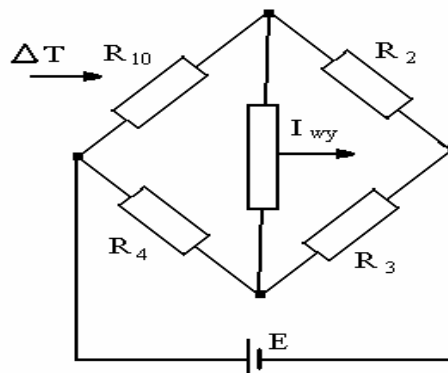
**Rys. 2. Ogniwo termoelektryczne (termopara)**

Jako materiały ogniw termoelektrycznych (powstałych w punktach spoin) stosuje się między innymi: Chromel – 90Ni + 10Cr, Platynorod – 10Rh + 90Pt, Alumel – 94Ni + Al. + Mn + Si, Konstantal – 60Cu + 40Ni, Kopel – 55Cu + 45Ni.

Charakterystyki temperaturowe złącz są liniowe w dużym zakresie zmian temperatury.

## 2.3 Wybrane układy pomiarowe

Przetworniki rezystancyjne stosuje się do pomiarów temperatury  $T_x$  lub jej przyrostu  $\Delta T = T_x - T_0$ . Obie te wielkości mogą zawierać informację o innych wielkościach np.: przepływie cieczy, gazu, stężeniu cieczy, gazu itp.



**Rys. 3. Układ mostka dla metody wychyłowej**

Układem stosowanym w obu pomiarach jest mostek niezrównoważony (metoda wychyłowa). Jedną z gałęzi mostka stanowi przetwornik rezystancyjny, a sygnał wyjściowy  $I_{wy}$  jest proporcjonalny do względnej zmiany jego rezystancji wokół wartości  $R_{10}$  określonej przez parametry innych elementów mostka:

$$I_{wy} = k\Delta R,$$

$$\Delta R = \frac{R_1 - R_{10}}{R_{10}}$$

$$R_{10} = \frac{R_2 R_4}{R_3}$$

gdzie:  $k$  – czułość mostka,  $\Delta R$  - względna zmiana rezystancji przetwornika,  $R_{10}$  - wartość początkowa rezystancji przetwornika w temperaturze równoważenia mostka (początkowej).

Jeżeli przetwornik przedstawia sobą rezystancję  $R_{10}$  w temperaturze  $T_0$ , to względną zmianę jego rezystancji określa wzór:

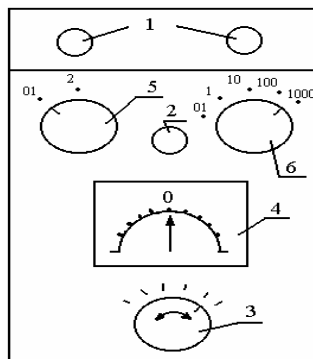
$$\Delta R_T = \alpha(T_x - T_o)R_{10}$$

czyli:

$$I_{wy} = kR_{10}\alpha(T_x - T_o)$$

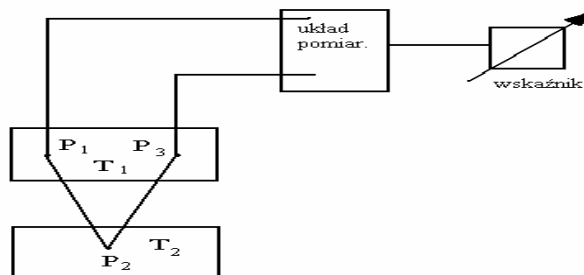
Pomiary zmian rezystancji przetwornika pod wpływem zmian temperatury można wykonać również mostkiem technicznym (np. przeskalowanym mostkiem Wheatstone'a) poprzez bezpośredni pomiar rezystancji.

Pomiary z zastosowaniem czujników termistorowych, jako odmianą czujników rezystancyjnych, wykonuje się a w sposób analogiczny.



**Rys. 4. Mostek pomiarowy w wykonaniu technicznym: 1 – przyłącze R (przetwornik pomiarowy), 2 – wyłącznik zasilania (przycisk), 3 – potencjometr równoważenia mostka, 4 – wskaźnik równowagi mostka, 5 – nastawnik czułości pomiaru, 6 – mnożnik zakresowy**

Pomiar siły termoelektrycznej przeprowadza się zazwyczaj według poniższego schematu pomiarowego. Suma sił elektromotorycznych w obwodzie zamkniętym jest równa zero, dopóki punkty styku  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  znajdują się w temperaturze  $T_1$ . Gdy punkt  $P_2$  znajduje się w temperaturze  $T_2 = T_1 \pm \Delta T$  w obwodzie powstanie siła termoelektryczna proporcjonalna do  $\Delta T$ . Jeżeli punkty  $P_1$  i  $P_2$  pozostaną w temperaturze niezmiętej to wskazania miernika będą zależęć jedynie od zmiany temperatury  $T_2$ . Napięcie wyjściowe układu pomiarowego termopary mierzy się najczęściej miliwoltomierzem elektronicznym o dużej rezystancji.



**Rys. 5. Schemat pomiarowy siły elektromotorycznej termopary**

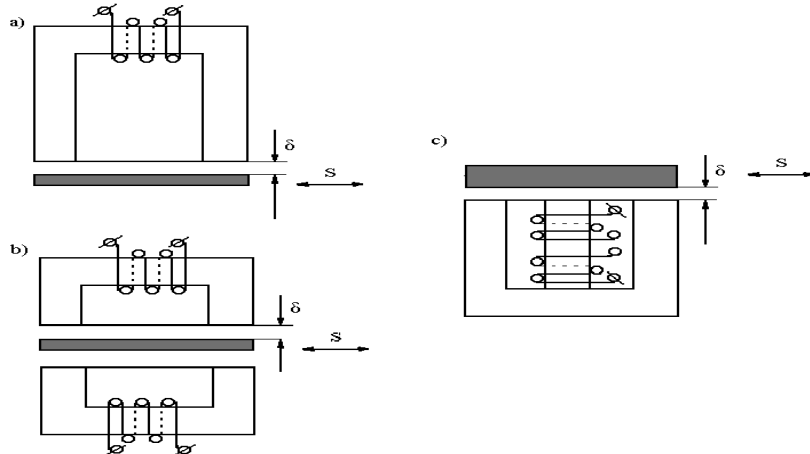
### 3. Pomiar przesunięcia - wiadomości teoretyczne

W czujniku indukcyjnym przesunięcie części ruchomej czujnika powoduje zmianę jego indukcyjności. Podstawowe jego elementy to: cewka z rdzeniem i ruchoma zwora, od której zależy opór magnetyczny układu. Działanie czujnika jest opisane następującą zależnością:

$$L \approx \frac{z^2}{\delta} S \mu_0$$

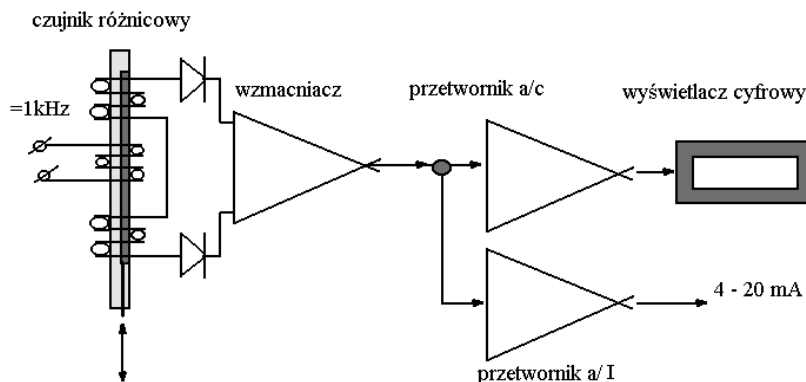
gdzie:  $L$  – indukcyjność czujnika [H],  $z$  – liczba zwojów,  $S$  – powierzchnia nabiegownika,  $\delta$  – szczelina

Indukcję magnetyczną można zmieniać przez zmianę  $\delta$  przy  $S = \text{const.}$  lub przez zmianę  $S$  przy  $\delta = \text{const.}$  lub przez zmianę obu tych parametrów.



**Rys. 6. Czujniki indukcyjne: a) podstawowy, b) różnicowy, c) transformatorowy**

Podstawowy czujnik indukcyjny zasilany jest prądem zmiennym. W czujniku różnicowym otrzymano większą czułość i uniezależniono się od wpływu warunków temperaturowych i zmian napięcia zasilającego. W czujniku transformatorowym zrealizowane jest oddzielenie galwaniczne obwodu zasilania od obwodu pomiarowego. W zależności od położenia zwory ( $S$ ,  $\delta$ ) indukuje się w obwodzie pomiarowym odpowiednia SEM.



**Rys.7. Schemat układu pomiarowego z czujnikiem różnicowym wykorzystujący zalety czujników różnicowego i transformatorowego z odczytem cyfrowym i wyjściem w postaci znormalizowanego sygnału prądu stałego od 4 mA do 20 mA lub od 0 mA do 10 – 20 mA.**

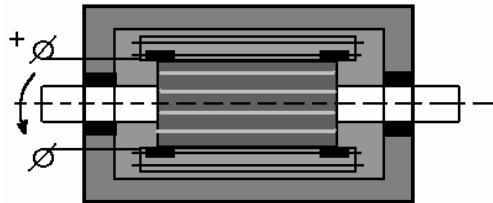
Czujniki indukcyjne stosuje się do pomiarów małych odległości np.:  $\pm 50 \mu\text{m}$ , w przypadku pomiarów grubości materiałów ferromagnetycznych, aż do kilkudziesięciu [cm] do pomiaru przesunięć mechanicznych np.: ruchu tłoka w pompach, silnikach czy ruchu listwy paliwowej w silnikach wysokoprężnych itp.

#### 4. Pomiar prędkości - wiadomości teoretyczne

Prędkość obrotową można wyznaczyć metodą bezpośrednią i optyczną. W metodzie bezpośredniej konieczne jest mechaniczne połączenie elementu pomiarowego z obiektem badanym. Elementami pomiarowymi są, w tym zastosowaniu, elementy elektromaszynowe automatyki: prądnice prądu stałego i prądu zmiennego, czujniki impulsowe magnetyczne (magnetic pick up) i optyczne. Wyznaczenie prędkości obrotowej ma na celu określenie wartości liczbowych prędkości obrotowych. W układach elektrycznych napędowych oraz w układach z silnikami spalinowymi prądnice tachometryczne są elementami sprzężenia zwrotnego i służą do stabilizacji zadanej prędkości obrotowej. Prąd przepływający przez uzwojenie stojana  $i_m$  wytwarza pole magnetyczne, o strumieniu  $\Phi$ , w którym obraca się twornik. SEM  $e_g$  indukowana w tworniku wynosi:

$$e_g = k_1 \Phi n$$

Proporcjonalna zależność  $e_g$  od prędkości obrotowej  $n$  jest wykorzystywana w prądnicach tachometrycznych do odczytu prędkości obrotowej. Strumień magnetyczny wytwarzany jest zwykle przez magnesy trwałe (ostatnio magnesy z pierwiastków ziem rzadkich).



Rys. 8. Prądnica prądu stałego

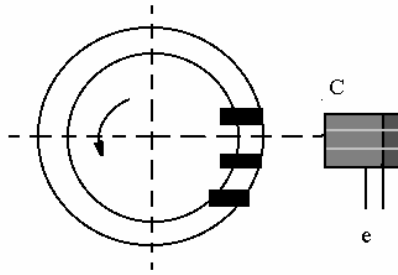
Podstawowymi parametrami prądnicy jest zależność napięcia wyjściowego prądnicy w funkcji prędkości obrotowej oraz liniowość prądnicy. Liniowość określana jest jako odchylenie rzeczywistej charakterystyki napięciowej prądnicy w funkcji prędkości obrotowej od wartości teoretycznej – linii prostej aproksymującej charakterystykę rzeczywistą. Liniowość podawana jest w procentach wartości maksymalnej napięcia wyjściowego.

Prądnica tachometryczna prądu stałego jest wyposażona w komutator, dzięki któremu na wyjściu otrzymuje się napięcie prądu stałego. Wadą tego typu prądnicy jest szybko zużywający się element stykowy – komutator.

Na podobnej zasadzie działa prądnica tachometryczna prądu zmiennego. W układach korekcyjnych ze sprzężeniem zwrotnym wykorzystuje się często zmianę jej częstotliwości w funkcji prędkości obrotowej zamiast zmiany jej napięcia wyjściowego. Ponieważ niema ona komutatora niezawodność jej jest większa, ale konieczność wyprostowania wyjściowego napięcia zmiennego powoduje inercję odczytu wskazań.

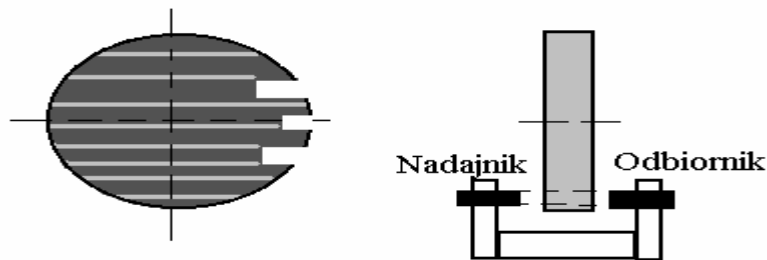
Pomiary impulsowe magnetyczne (magnetic pick up) opierają się na wykorzystaniu znanej zasady indukcji magnetycznej Faradaya. Na wale maszyny osadzona jest tarcza z żelaza z nacięciami. W sposób nieruchomy w stosunku do tarczy zamocowany jest czujnik indukcyjny w postaci cewki z magnesem stałym. Obracający się wał powoduje indukowanie się SEM o częstotliwości zależnej od liczby nacięć na tarczy. Prędkość obrotową można określić bezpośrednio mierząc licznikiem impulsy w określonym odcinku czasu lub je scałkować i zmieniając na sygnał prądu stałego.





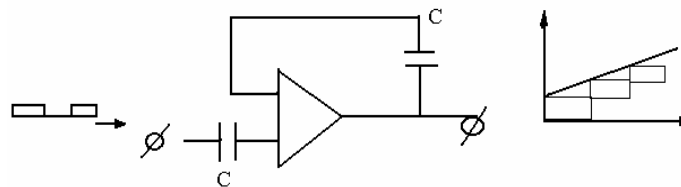
**Rys. 9. Pomiary magnetyczne**

W metodzie optoelektronicznej tarcza z wybraniami (nacięciami) wiruje przecinając strumień świetlny w czujniku złożonym z nadajnika – fotodiody i odbiornika – fotoelektroda, sygnałem wyjściowym jest podobnie sygnał impulsowy złożony z ciągu impulsów prostokątnych.



**Rys.10. Pomiary optoelektroniczne**

Przekształcenie sygnału impulsowego na standardowy sygnał prądowy lub na napięciowy przeprowadza się w układzie całkującym złożonym np. ze wzmacniacza stałoprądowego.



**Rys. 11. Przekształcenie sygnały impulsowego na stałoprądowy**

## 5. Literatura pomocnicza

1. Poradnik inżyniera automatyka
2. E. Kobosko. Inżynieria elektryczna, WNT
3. Miernictwo Dynamicznych Wielkości Mechanicznych, Instytut Lotnictwa
4. Notatki z wykładów przedmiotu Elektrotechnika i Elektronika
5. Łapiński M. Włodarski W. Miernictwo Elektryczne Wielkości Nielektrycznych
6. Lion K.S. Przyrządy do badań naukowych. Elektryczne przetworniki wejściowe.
7. Malzacher S. Elektronika przemysłowa,
8. Zagajewski T. Elektronika przemysłowa.
9. Poradnik inżyniera automatyka
10. E. Kobosko. Inżynieria elektryczna, WNT

Opracował: mgr inż. Jakub Dębicki