



**POLITECHNIKA WARSZAWSKA**

**WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI**

**INSTYTUT TECHNIK WYTWARZANIA**

# SENSORYKA

<http://www.cim.pw.edu.pl/sensoryka>

## Ćwiczenie 2

Badanie charakterystyk czujników przemieszczeń na przykładzie czujnika LVDT

**ZAKŁAD AUTOMATYZACJI, OBRABIAREK I OBRÓBKI SKRAWANIEM**

# Właściwości statyczne przetworników pomiarowych

## Cel i zakres ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest poznanie metod badania właściwości statycznych przetworników pomiarowych na przykładzie indukcyjnego przetwornika przemieszczenia liniowego. W ćwiczeniu wykonuje się wzorcowanie indukcyjnego miernika przemieszczenia, oraz przeprowadza badanie nieliniowości wskazań dla dużych i małych przemieszczeń

## Wprowadzenie

Do przekształcenia pewnej mierzonej wielkości nieelektrycznej na dogodny do pomiaru sygnał elektryczny służy czujnik zawierający przetwornikiem sygnału wejściowego. Czujniki dzielimy na:

- czujniki parametryczne (bierne) - pod wpływem wielkości nieelektrycznej ulega zmianie parametr elektryczny taki jak: oporność, indukcyjność, pojemność.
- czujniki generacyjne (czynne) - pod wpływem zjawisk fizycznych powstają siły elektromotoryczne, których wartość jest proporcjonalna do mierzonej wielkości.

Zestaw odpowiednio połączonych urządzeń pomiarowych umożliwiających pomiar określonego parametru lub wielkości nazywamy układem pomiarowym. Często jednak trudno precyzyjnie określić różnicę pomiędzy układem a elementem, gdyż niektóre czujniki są również układami

Przetwornik pomiarowy w podstawowym zakresie jego charakteryzowania można opisać za pomocą dwu zmiennych:  $X$  – wielkości na wejściu (mierzonej) oraz  $Y$  – wielkości na wyjściu, która jest odpowiedzią przetwornika na wymuszenie i jednocześnie wynikiem przetwarzania (często wynikiem pomiaru). Związek funkcjonalny między wielkością wyjściową  $Y$  i wejściową  $X$  opisuje **równanie przetwarzania**. Równanie przetwarzania ustala się na podstawie struktury przetwornika pomiarowego i zasady działania poszczególnych bloków. W ogólnym przypadku równanie przetwarzania określone zależnością charakteryzującą dany przetwornik jest równaniem statycznym przetwarzania przetwornika i jest matematycznym modelem podstawowej jego właściwości.

$$Y = f(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n \quad (1)$$

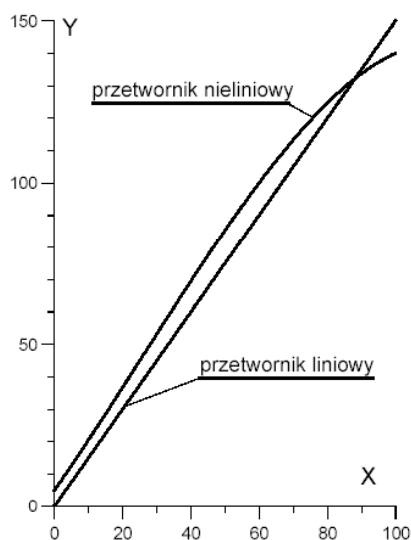
Zależność (1) przedstawiona w formie graficznej określana jest **charakterystyką statyczną przetwornika** (rys.1). Równanie przetwarzania przetwornika (1) może być równaniem liniowym i wówczas taki przetwornik określany jest **przetwornikiem liniowym**. W przypadku, gdy równanie przetwarzania jest nieliniowe, to przetwornik określany jest jako **przetwornik nieliniowy**. W praktyce istnieje niewiele zjawisk naturalnych, dla których liniowość zależności jest dokładnie spełniona. Na rys.1 przedstawiono przykłady liniowej i nieliniowej charakterystyki statycznej przetwornika. Bardzo ważną cechą przetwornika jest nachylenie charakterystyki przetwarzania.

Wielkość, która jest miarą nachylenia charakterystyki nazywa się **czułością przetwornika** i obliczana jest na podstawie równania przetwarzania przetwornika (2) wg zależności

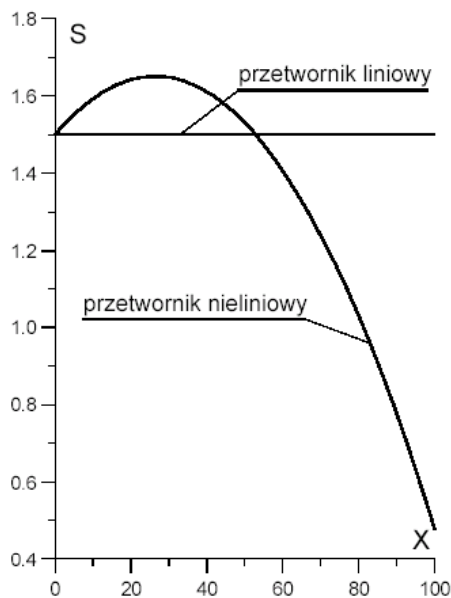
$$S(x) = \frac{dY}{dX} = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (2)$$

Dla przetworników liniowych czułość przetwornika jest stała co do wartości, a dla przetworników nieliniowych zmienia swoją wartość. Na rys.2 przedstawiono przykładowe charakterystyki czułości dla przetwornika liniowego i nieliniowego. Dla przetworników liniowych określana jest odwrotność czułości, nazywana stałą przetwornika (C). Obliczana jest ona z zależności

$$C = \frac{1}{S} \quad (3)$$



Rys. 1. Charakterystyka statyczna czujnika



Rys. 2. Czułość przetwornika pomiarowego

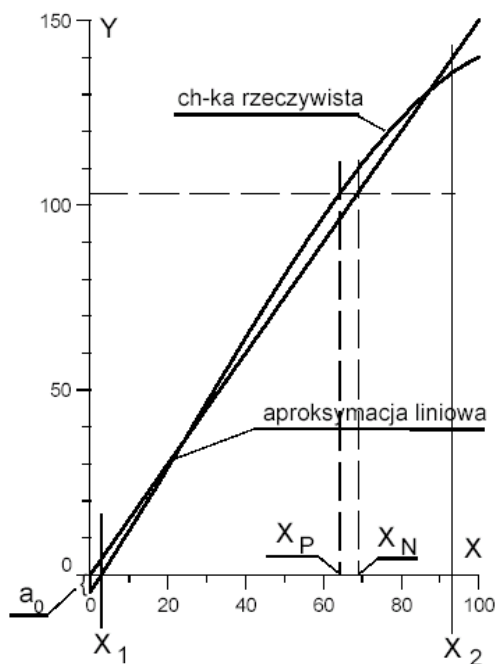
Dla wielu przetworników o nieliniowej charakterystyce przetwarzania, ale zbliżonej do charakterystyki liniowej, dokonuje się jej linearyzacji lub aproksymacji zależnością liniową. Rozbieżność między charakterystyką rzeczywistą, a jej aproksymacją liniową nazywana jest **błędem liniowości przetwornika**. Błąd ten odniesiony do wejścia) jest obliczany wg zależności.

$$\Delta x = X_{RZ} - X_T \quad (4)$$

gdzie:  $X_{RZ}$ - rzeczywista wartość wskazywana przez czujnik,  $X_T$ - teoretyczna wartość wynikająca z modelu liniowego,  $\Delta x$ - błąd liniowości czujnika.

Podobnie można określić błąd liniowości w stosunku do wyjścia. Ważnymi parametrami charakteryzującymi właściwości statyczne przetworników pomiarowych są: zakres wskazań, zakres przetwarzania i zakres pomiarowy. Przedział wartości wielkości mierzonej odpowiadający pełnemu zakresowi zmian wielkości wyjściowej przetwornika nazywa się **zakresem wskazań**. **Zakres przetwarzania** przetwornika pomiarowego jest to przedział wartości wielkości wejściowej odpowiadający jego bezawaryjnemu działaniu.

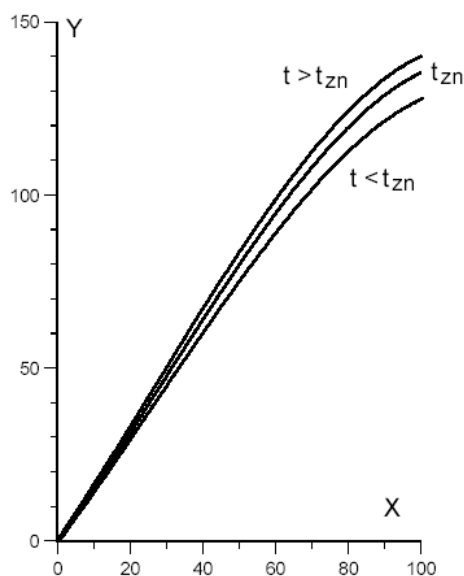
Ta część wskazań przetwornika, która spełnia wymagania co do dokładności przetwarzania przetwornika, nosi nazwę **zakresu pomiarowego** (rys. 3)



Rys. 3. Przykład linearyzacji charakterystyki nieliniowej przetwornika pomiarowego

Dla każdego przetwornika pomiarowego istotne są warunki znamionowe (odniesienia) i użytkowe. Przez warunki znamionowe rozumie się wartości odniesienia wielkości wpływających na przetwornik pomiarowy. Dotrzymanie warunków znamionowych oznacza, że przetwornik pomiarowy spełnia określone wymagania dokładności. Przykładowo warunki znamionowe mogą być zdefiniowane w następujący sposób:

- temperatura pracy 23° C;
- wilgotność względna 40 – 60 %;
- częstotliwość np. 50 Hz, itp.;



Rys. 4. Wpływ temperatury na charakterystykę przetwornika

**Błąd przetwarzania** występujący w warunkach znamionowych nosi nazwę **błędu podstawowego**. Dopuszczalna wartość błędu względnego podstawowego jest liczbowo równa klasie dokładności przetwornika pomiarowego.

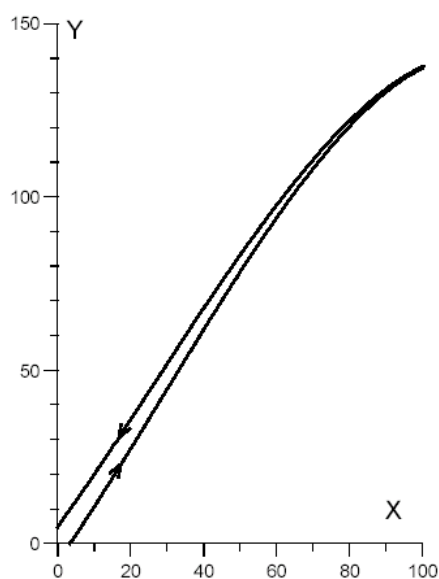
**Warunki użytkowe** są zbiorem zakresów wartości wpływających, dla których właściwości metrologiczne przetwornika pomiarowego ulegają pogorszeniu w określonych granicach. To pogorszenie właściwości polega głównie na pojawieniu się dodatkowych błędów przetwarzania. Oceny ilościowej pogorszenia dokładności dokonuje się na podstawie wartości **błędu granicznego dodatkowego**, przez który rozumie się wartość, o jaką może wzrosnąć błąd graniczny (powyżej podstawowego) przy odchyleniu warunków pracy od znamionowych, wewnątrz zakresów użytkowych.

Błędy dodatkowe określa się dla każdej wielkości wpływającej osobno i nazywa się je, zależnie od przyczyn, np. błędami temperaturowymi, częstotliwościowymi itp. Błędy przetwarzania przetworników pomiarowych mogą mieć różny rozkład wzdłuż charakterystyki przetwarzania. Można wyróżnić następujące główne przypadki:

1. Wartość błędu nie zależy od wartości wielkości mierzonej. Błąd ten nazywa się błędem addytywnym lub błędem zera (w zależności (1)  $a_0 \neq 0$  (rys. 3)).
2. Błąd jest proporcjonalny do wartości wielkości mierzonej. Błąd taki nazywa się błędem multiplikatywnym lub błędem czułości (rys. 3).

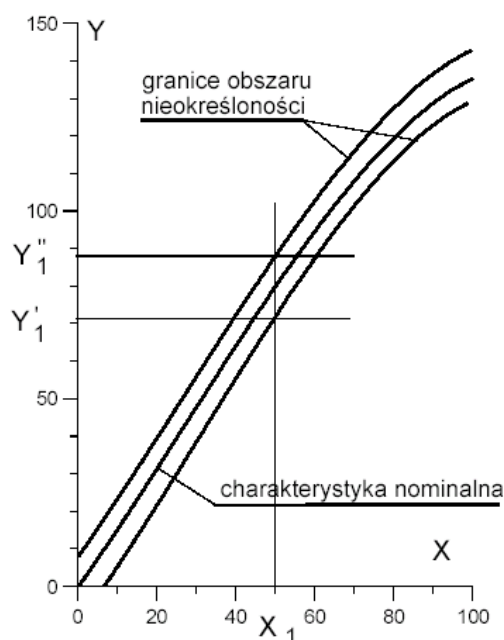
Zależność błędu od wartości wielkości mierzonej jest bardziej złożona, lecz można wyróżnić w niej dwie składowe: addytywną i multiplikatywną.

Rozkład błędu nie wykazuje regularnej zależności od wartości wielkości mierzonej, np. histereza pomiarowa (rys. 5).



Rys. 5. Histereza pomiarowa

Błędy statyczne przetworników pomiarowych mogą mieć charakter błędów systematycznych i przypadkowych. W efekcie końcowym powoduje to nieokreśloność wskazań przetwornika pomiarowego dla danej wartości wielkości wejściowej (rys.6). Przyjmuje się stałe granice dopuszczalnego błędu bezwzględnego przetwornika w całym zakresie pomiarowym o takiej wartości, że wszystkie możliwe powstające błędy systematyczne i przypadkowe mieszczą się wewnątrz tych granic. Te granice nazywa się **niedokładnością przetwornika**, której wartość wynika z klasy przetwornika określonej przez producenta.



Rys.6. Nieokreśloność wskazań przetwornika pomiarowego dla danego stanu wejściowego  $X_1$

### **Podział czujników indukcyjnych**

Pomiary przemieszczeń liniowych mogą być realizowane z zastosowaniem czujników, indukcyjnych, współpracujących z odpowiednimi układami pomiarowymi. Całość stanowi wówczas przetwornik pomiarowy przeznaczony do pomiaru przemieszczeń liniowych. Czujniki indukcyjne należą do grupy czujników najczęściej stosowanych w pomiarach przemieszczeń liniowych.

Zasada działania czujników indukcyjnych polega na wykorzystaniu zmian indukcyjności własnej lub wzajemnej ich obwodów elektrycznych, pod wpływem przetwarzanej wielkości. Wielkością tą jest najczęściej przemieszczenie liniowe zmieniające geometrię obwodu magnetycznego, głównie wymiary szczeliny powietrznej.



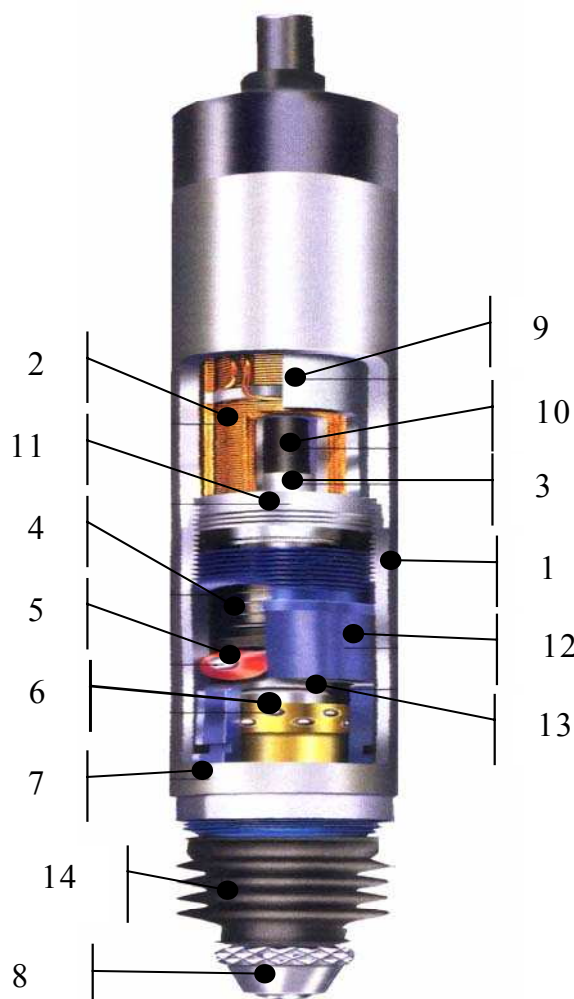
Rys. 7 Czujniki zbliżeniowe



Rys. 8 Czujniki transformatorowe przemieszczenia

<http://news.thomasnet.com/images/large/2003/10/26997.jpg>  
<http://news.thomasnet.com/images/large/2003/10/26997.jpg>

W praktyce najliczniejszą grupę stanowią czujniki transformatorowe różnicowe i czujniki wiroprowadowe pojedyncze – tzw. czujniki zbliżeniowe. Poniżej (rys 9) zostanie przedstawiony czujnik transformatorowy różnicowy.



Głównymi elementami czujnika indukcyjnego są :

1. trzpień mocujący,
2. system cewek elektrycznych,
3. element korygujący zmiany temperatury i odkształcenia termiczne czujnika,
4. sprężyna powodująca nacisk pomiarowy,
5. System zapobiegający obrotom rdzenia,
6. Łożysko kulkowe,
7. Ogranicznik przemieszczenia końcówki pomiarowej,
8. Końcówka dotykowa,
9. Osłona uzwojenia elektrycznego,
10. rdzeń ferromagnetyczny,
11. Sprężyna zabezpieczająca przed przeciążeniem,
12. przewodnica dla łożyska kulkowego
13. trzpień pomiarowy, 1
4. Gumowa uszczelka

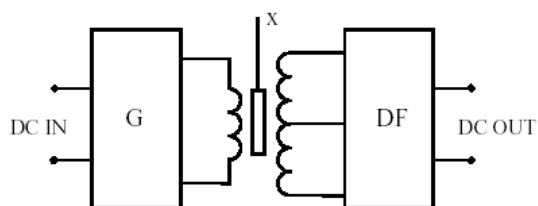
Rys.9. Budowa czujnika indukcyjnego firmy TESA

Parametry przetworników przemieszczeń liniowych z czujnikami transformatorowymi różnicowymi są zależne od konstrukcji. Zakres mierzonych przemieszczeń może zawierać się w granicach od kilku  $\mu\text{m}$  do kilkudziesięciu cm, przy czym niedokładność pomiaru jest rzędu  $\pm(0.1 \dots 1)\%$ , a nieliniowość na poziomie  $(0.2 \dots 1)\%$ . Wielkością charakteryzującą wszystkie przetworniki przemieszczeń liniowych z czujnikami indukcyjnymi jest czułość, definiowana jako zmiana napięcia wyjściowego występującego przy zmianie przemieszczenia. Dla przetworników transformatorowych różnicowych wartość czułości może osiągać  $10^3 \dots 10^4 \text{ mV/mm}$ .

### **Zasada działania**

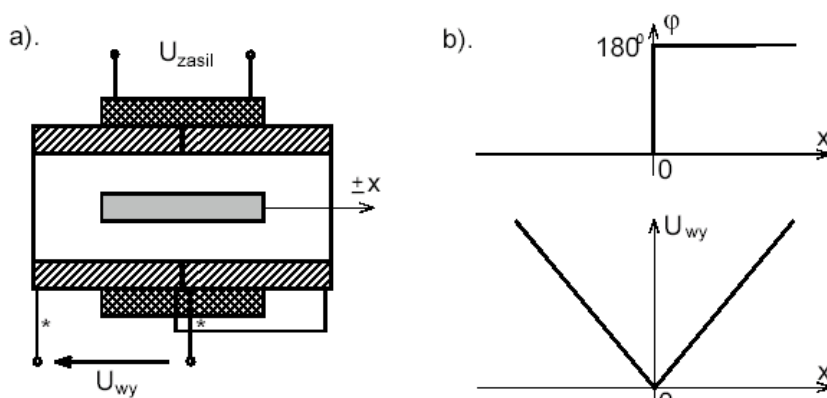
Spośród różnych rozwiązań konstrukcyjnych czujników transformatorowych szerokie zastosowanie znalazły czujniki transformatorowe różnicowe z przesuwającym rdzeniem.





Rys.10. Schemat układu pomiarowego przetwornika przemieszczenia liniowego z czujnikiem transformatorowym różnicowym

Rys.10, 11. wyjaśniają zasadę działania takiego czujnika. Zbudowany jest on z trzech uzwojeń, jednym zasilającym stanowiącym stronę pierwotną transformatora i dwoma uzwojeniami połączonymi przeciwsobnie stanowiącymi stronę wtórną transformatora. Uzwojenie pierwotne zasilane jest napięciem przemiennym. W uzwojeniach wtórnych indukowane są napięcia równe co do wartości, lecz przeciwne w fazie w przypadku, gdy rdzeń magnetyczny znajduje się w środkowym (zerowym) położeniu. Wypadkowe napięcie na zaciskach wyjściowych jest wówczas równe zero. Przesunięcie rdzenia zmienia współczynnik sprzężenia magnetycznego pomiędzy cewką zasilającą, a cewkami stanowiącymi stronę wtórną transformatora. Przy przesunięciu rdzenia w prawo lub w lewo w stosunku do punktu zerowego będzie na wyjściu czujnika powstawała różnica napięć proporcjonalna do wartości przesunięcia. W momencie przesuwania rdzenia z jednego skrajnego położenia w drugie, podczas przejścia przez zero zmienia się kąt przesunięcia fazy różnicy napięć względem napięcia zasilania o  $180^\circ$ . (rys. 11.b).



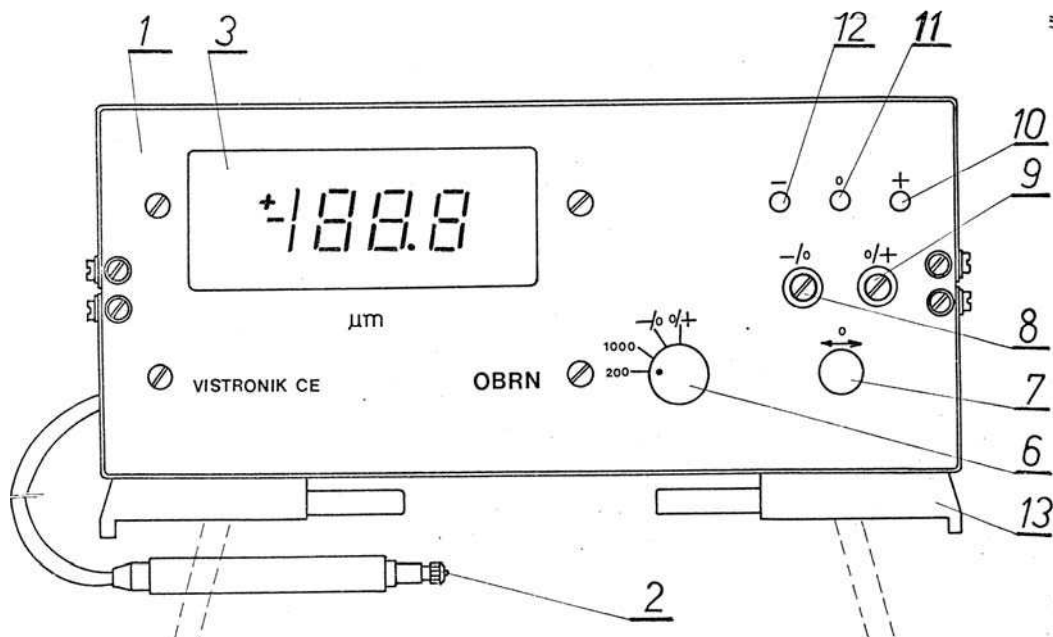
Rys.11. Przetwornik transformatorowy różnicowy a)schemat budowy b) charakterystyka przetwarzania

Z charakterystyk przetwarzania czujnika transformatorowego różnicowego (rys. 11.b) wynika, że na podstawie pomiaru samego napięcia wyjściowego czujnika nie można określić kierunku przemieszczenia. Informacja o kierunku przemieszczenia zawarta jest w kącie przesunięcia fazy. Stąd koniecznym staje się zastosowanie detektora fazoczułego. Na wyjściu detektora fazoczułego, który zawiera w sobie również człon uśredniający, otrzymuje się napięcie stałe w czasie, którego wartość jest w szerokim zakresie przemieszczeń proporcjonalna do przemieszczenia.

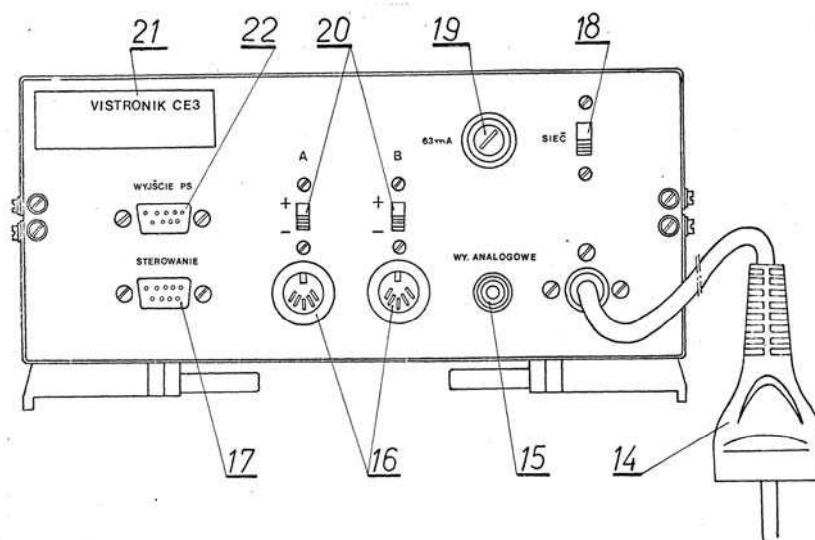
### Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest określenie charakterystyki czujnika indukcyjnego. Badany przetwornik przemieszczenia liniowego typu VISTRONIK-CE3 ma następujące podstawowe dane techniczne:

- Czas stabilizacji po włączeniu zasilania :30 min.
- Pobór mocy :10VA
- Napięcie zasilania układu pomiarowego : 220 V DC
- Zakres pomiarowy : $\pm 1$  mm
- Rozdzielczość :1  $\mu\text{m}$
- Powtarzalność wskazań :2.5  $\mu\text{m}$
- Dopuszczalne wahania temperatury : $\pm 3$  K
- Napięcie wyjściowe sygnału analogowego : $\pm 100$  mV
- Zakres kompensacji zera :40  $\mu\text{m}$
- Nacisk pomiarowy głowicy MDKa :0.3N
- Częstotliwość zasilania cewki : 3kHz
- Zakres zmian napięcia wyjściowego: -5 ÷ +5 V DC.



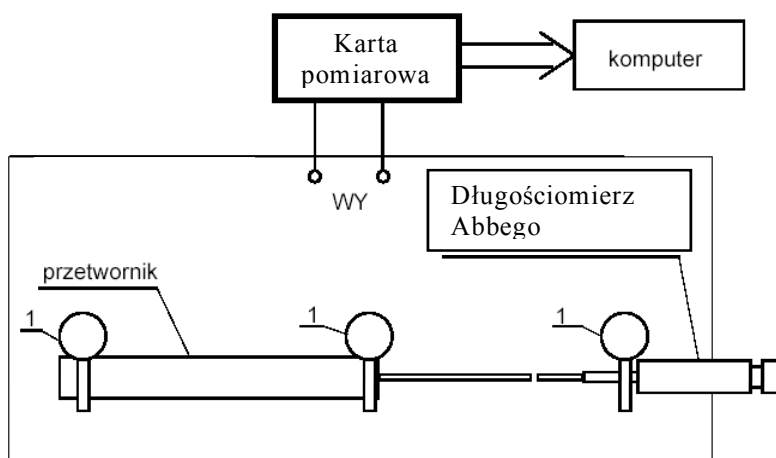
Rys.12. Panel czołowy wskaźnika czujnika VISTRONIK - CE3 (z dwiema głowicami pomiarowymi)



Rys.13. Panel tylny wskaźnika czujnika VISTRONIK - CE3 (z dwiema głowicami pomiarowymi)

Główne elementy wskaźnika: 1. wskaźnik, 2. głowice pomiarowe, 3. wyświetlacz cyfrowy, 6.przełącznik zakresów pomiarowych, 7. pokrętło kompensacji zera, 8.pokrętło nastawiania dolne grupy wymiarowej, 9. pokrętło nastawiania górnej grupy wymiarowej, 10.sygnalizacja górnej grupy wymiarowej, 11. sygnalizacja środkowej grupy wymiarowej, 12.sygnalizacja dolnej grupy wymiarowej, 13. podpora, 14. przewód sieciowy z wtykiem, 15. gniazdo wyjścia analogowego, 16. gniazdo głowic pomiarowych, 17.gniazdo sterowania, 18.wyłącznik sieciowy, 19. gniazdo bezpiecznika, 20. przełącznik kierunku pomiarów, 21. tabliczka znamionowa, 22.gniazdo wyjścia na przystawkę selekcyjną VISTRONIK \_PS

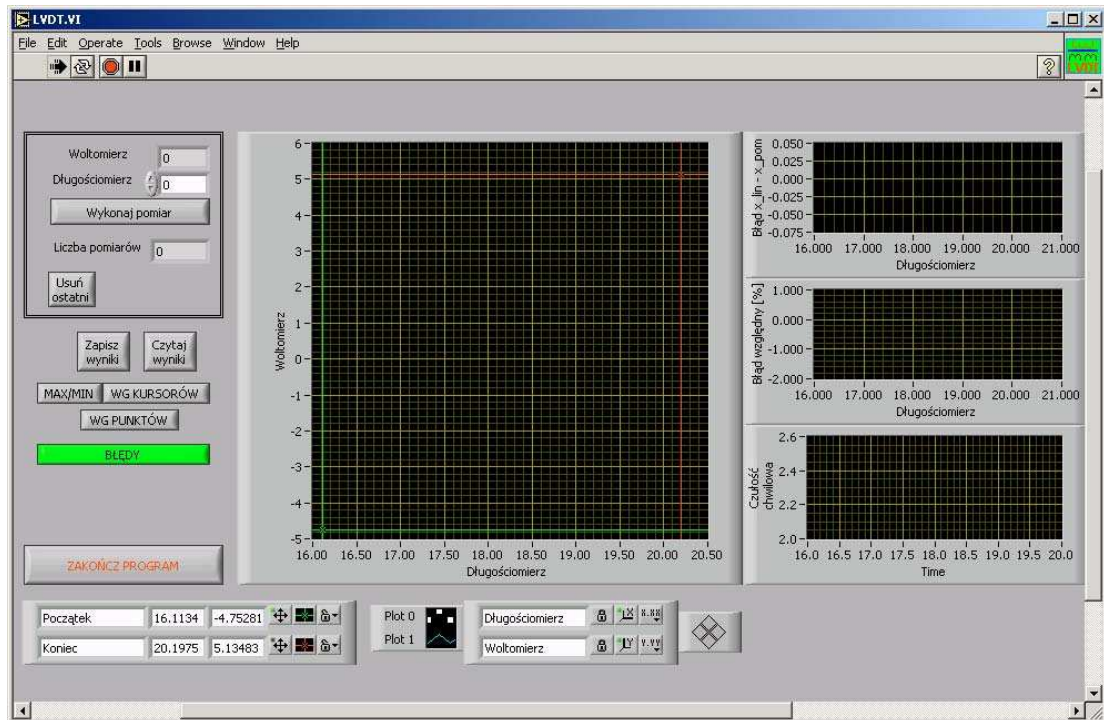
Badania należy przeprowadzić w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 14



Rys.14. Układ pomiarowy do badania przetwornika przemieszczenia liniowego,

Przed rozpoczęciem badań przetwornik przemieszczenia liniowego ustawić w statywie w taki sposób, aby dla ustawionej na głowicy pomiarowej wartości 2 mm napięcie wyjściowe przetwornika było równe około 5V

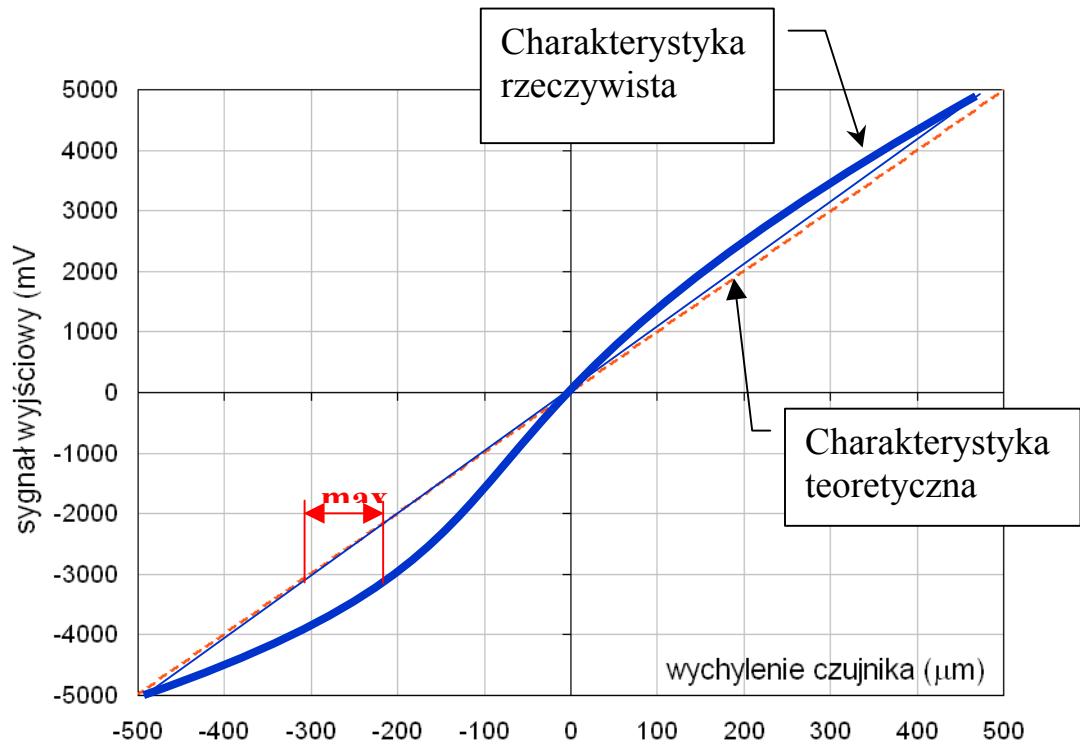
Realizacja ćwiczenia odbywa się przy zastosowaniu programu komputerowego Program ten umożliwia współpracę komputera z kartą pomiarową. Program ma jeden ekran umożliwiający użytkownikowi: wprowadzanie danych z długościomierza i woltomierza, edycję wprowadzonych wyników pomiarów, wzorcowanie czujnika i analizę błędów urządzenia



Rys.15.Ekran główny programu do LVDT.VI do wzorcownia czujnika indukcyjnego

W czasie zajęć należy wykonać następujące czynności:

1. Połączyć układ według rys 14.
2. Określić przemieszczenie rdzenia czujnika w funkcji napięcia generowanego przez czujnik. Należy mierzyć przemieszczenia rdzenia czujnika za pomocą długościomierza Abbego, wielkość napięcia odczytuje się za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego.
3. Przeprowadzić wzorcowanie czujnika indukcyjnego poprzez określenie funkcji napięcia generowanego przez czujnik względem przemieszczenia rdzenia czujnika. Na podstawie pomiarów zostanie określona charakterystyka teoretyczna czujnika. Przyjmuje się, że charakterystyka teoretyczna ma przebieg liniowy.



Rys 16. Przebiegi charakterystyki rzeczywistej i teoretycznej

4. Porównać charakterystyki teoretycznej czujnika z jego charakterystyką rzeczywistą
5. Określenie błędu względnego nieliniowości charakterystyki podstawowej (rzeczywistej) w stosunku do wartości teoretycznej. Największa wartość błędu względnego określa klasę przetwornika.
6. Wyznaczyć czułość, czułość chwilową, błąd liniowości, zakres wskazań i zakres pomiarowy przetwornika przemieszczenia liniowego.
7. Na podstawie zebranych wyników pomiarów należy zamieścić w sprawozdaniu tabelaryczny, graficzny i matematyczny opis reprezentacji modeli.

## . LITERATURA

- [1]. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna. WNT, Warszawa 1998.
- [2]. Miłek M.: Pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi. Podręcznik akademicki. Wyd. Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra 1998.
- [3]. Romer E.: Miernictwo przemysłowe. PWN, Warszawa 1978.

Wydział WIP PW

Grupa.....

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

## Wzorcowanie czujnika indukcyjnego przemieszczenia LVDT

Data wykonania ćwiczenia.....  
Data oddania sprawozdania.....

**Data i ocena z zaliczenia sprawozdania .....**  
**Zespół wykonujący ćwiczenie:**

*Nazwisko i imię ocena dop. do ćw. ocena końcowa*

1. ....
2. ....
3. ....
4. ....
5. ....
6. ....
7. ....
8. ....
9. ....
10. ....

Charakterystyka czujnika

S										
$U_T$										
$U_{RZ}$										
$\Delta[\%]$										
$\delta[\%]$										

$$\delta[\%] = \frac{|U_{RZ}(L) - U_T(L)|}{U_{MAX}} \cdot 100 \quad (5)$$

gdzie:  $\delta$  - błąd względny nieliniowości czujnika,  $U_T$  - teoretyczna wartość napięcia,  $U_{RZ}$  - rzeczywista wartość napięcia,  $\Delta[\%] = U_{RZ}(L) - U_T(L)$

Na podstawie wyników pomiarów należy wykonać przebiegi  $U_T$ ,  $U_{RZ}$ ,  $\delta$ , w funkcji  $L$  i określić maksymalny błąd nieliniowości, porównać charakterystyki teoretycznej czujnika z jego charakterystyką rzeczywistą, określić błąd względny nieliniowości charakterystyki podstawowej (rzeczywistej) w stosunku do wartości teoretycznej. Wyznaczyć czułość, błąd liniowości, zakres wskazań i zakres pomiarowy przetwornika przemieszczenia liniowego.

Na podstawie zebranych wyników pomiarów należy zamieścić w sprawozdaniu tabelaryczny, graficzny i matematyczny opis reprezentacji modeli.