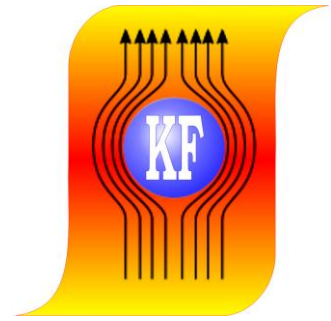
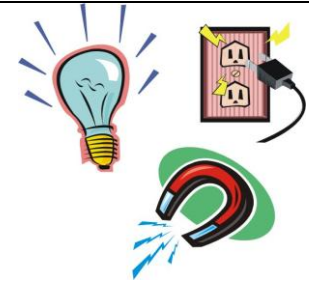


***KATEDRA FIZYKI***

***WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI  
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW  
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA***



***PRACOWNIA  
ELEKTRYCZNOŚCI I MAGNETYZMU***



***ĆWICZENIE NR E-13***

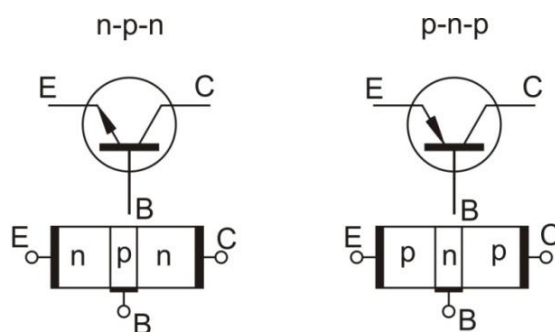
***BADANIE CHARAKTERYSTYK  
STATYCZNYCH TRANZYSTORA***

## I. Zagadnienia do przestudiowania

1. Elementy teorii pasmowej ciała stałego.
2. Półprzewodniki samoistne i domieszkowe w aspekcie teorii pasmowej oraz teorii wiązań chemicznych.
3. Działanie i charakterystyka złącza półprzewodnikowego typu p-n.
4. Zasada działania tranzystora.
5. Charakterystyki statyczne i parametry tranzystora w układzie o wspólnym emiterze.
6. Podstawowe zastosowania tranzystora.

## II. Wprowadzenie teoretyczne

Tranzystor to układ złożony z trzech warstw półprzewodnikowych ułożonych w kolejności p-n-p (tranzystor typu p-n-p) lub n-p-n (tranzystor n-p-n) - jak na rysunku 1. Tranzystor zawiera zatem dwa złącza p-n. Dlatego w celu lepszego zrozumienia zasady działania tranzystora niezbędne jest dokładne zapoznanie się z treścią ćwiczenia „Badanie charakterystyki złącza p-n”.

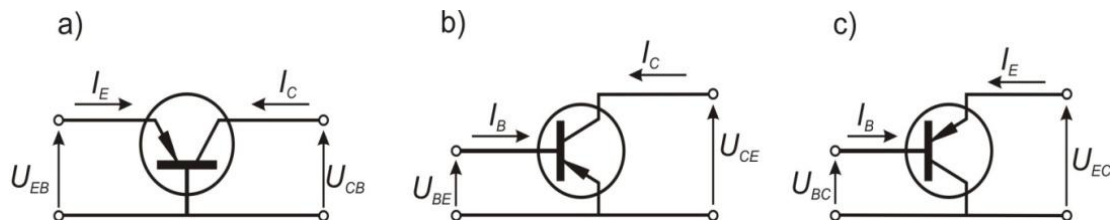


Rys. 1. Typy tranzystorów i ich oznaczenia

Poszczególne warstwy nazywamy emiterem E, bazą B i kolektorem - w ślad za piśmiennictwem angielskim oznaczanym jako C. Tranzystor włączamy do obwodu w ten sposób, że do złącza emiter-baza przykładamy niewielkie napięcie w kierunku przewodzenia, natomiast do złącza baza-kolektor napięcie w kierunku zaporowym. Dlatego opór złącza B-C jest wielokrotnie większy od oporu złącza E-B. Ponieważ baza B jest warstwą bardzo cienką (i słabo domieszkowaną; co oznacza, że w obszarze bazy liczba nośników większościowych jest znacznie mniejsza niż w obszarach sąsiednich), a ponadto wartość napięcia przyłożonego do złącza B-C jest znacznie większe od wartości napięcia przyłożonego do złącza E-B, to nośniki mniejszościowe emitowane z emitera do bazy w obszarze bazy ulegają rekombinacji tylko w nie- wielkim stopniu, dlatego prawie wszystkie te nośniki przemieszczają się przez złącze B-C do kolektora. W efekcie przez złącze B-C płynie prąd o natężeniu  $I_{BC}$  niewiele mniejszym od prądu  $I_{EB}$  płynącego przez złącze E-B. Jednakże ze względu na dużą różnicę oporów tych złączy moc złącza B-C jest znacznie większa od mocy złącza E-B. Zmieniając natężenie prądu w obwodzie „wejściowym” baza-emiter (w wyniku zmiany napięcia  $U_{BE}$ ), uzyskujemy prawie taką samą co do wartości zmianę natężenia prądu w obwodzie baza-kolektor (w dobrych tranzystorach stosunek  $\Delta I_{BC}/\Delta I_{EC}$  jest rzędu 0,8 do 0,99), ale - z uwagi na różnicę oporów tych obwodów (złączy) - za- równo zmiana napięcia  $U_{CB}$ , jak i zmiana mocy

### Ćwiczenie E-13: Badanie charakterystyk statycznych tranzystora

$P_{CB}$  są wyraźnie większe w porównaniu ze zmianami odpowiednio napięcia „wejściowego”  $U_{BE}$  i mocy „wejściowej”  $P_{BE}$ . Dzięki temu tak podłączony tranzystor - w żargonie: tranzystor w układzie o wspólnej bazie, symbolicznie WB lub OB (rys. rys. 1 i 2a) - umożliwia wzmacnianie sygnałów elektrycznych w aspekcie napięć i mocy.



**Rys. 2. Układy połączeń tranzystorów na przykładzie tranzystora typu p-n-p:**  
a) układ o wspólnej bazie (WB lub OB), b) układ o wspólnym emiterze (WE lub OE), c) układ o wspólnym kolektorze (WC lub OC)

Wzmocnienie prądowe uzyskuje się natomiast w układzie ze wspólnym emiterem - symbol WE lub OE (rys. 2b). W tym przypadku wejściowy sygnał zmiennonapięciowy doprowadzany jest między emiter i bazę, a sygnał wyjściowy rejestrowany jako zmiana napięcia na oporniku obciążenia włączanego między emiter i kolektor. Niemal cały prąd wypływający z emitera E wpływa do kolektora C, natomiast przez bazę B płynie prąd o natężeniu  $I_B$  bardzo małym w porównaniu z natężeniem prądu kolektora  $I_C \approx I_E$ . Jednakże ten bardzo mały prąd bazy  $I_B$  „steruje” dużym prądem  $I_C$ ; w wyniku czego nawet małe zmiany prądu bazy  $\Delta I_B$  wywołują silne zmiany prądu kolektora  $\Delta I_C$ . Tak więc układ tranzystora ze wspólnym emiterem umożliwia wzmacnienie sygnałów w aspekcie prądów, napięć i mocy. Dlatego większość układów wzmacniających zawiera tranzystory podłączone w tym właśnie układzie WE, czyli OE.

Układy ze wspólnym kolektorem (WC, czyli OC, rys. 2c) umożliwiają wzmacnianie napięć, ale stosowane są bardzo rzadko.

Tranzystor może być potraktowany jako przykład tzw. czwórnik, to znaczy układu czterozaciskowego (rys. 3). Związki między napięciami i natężeniami prądu można opisać w postaci trzech par nieliniowych równań funkcyjnych.

Pierwsza para to tzw. równania admitancyjne:

$$I_1 = f(U_1, U_2) \quad (1.1)$$

$$I_2 = f(U_1, U_2) \quad (1.2)$$

Druga para to tzw. równania impedancyjne:

$$U_1 = f(I_1, I_2) \quad (2.1)$$

$$U_2 = f(I_1, I_2) \quad (2.2)$$

Trzecia para to tzw. równania mieszane:

$$U_1 = f(I_1, U_2) \quad (3.1)$$

$$I_2 = f(I_1, U_2) \quad (3.2)$$



Rys. 3. Tranzystor jako czwórnik

Najczęściej stosuje się równania mieszane (3.1) i (3.2), ponieważ z nich stosunkowo prosto wynikają instrukcje dotyczące badania i sporządzania charakterystyk statycznych: Charakterystykę statyczną sporządza się w postaci wykresu wielkości zależnej ( $U_1$  w równaniu (3.1),  $I_2$  w równaniu (3.2)) w funkcji jednej z wielkości niezależnych, przy czym drugą z wielkości niezależnych traktuje się jako parametr.

Dla tranzystora w układzie wspólnego emitera (WE lub OE) bada się i sporządza następujące charakterystyki statyczne:

1. Zależność napięcia między bazą i emiterem od natężenia prądu bazy przy stałym napięciu między kolektorem i emiterem

$$U_{BE} = f(I_B)_{U_{CE}=\text{const}} \quad (4)$$

(Charakterystykę tę niekiedy opatruje się nazwą „statyczna charakterystyka wejściowa”).

2. Zależność napięcia między bazą i emiterem od napięcia między kolektorem i emiterem przy stałym natężeniu prądu bazy

$$U_{BE} = f(U_{CE})_{I_B=\text{const}} \quad (5)$$

(Inna nazwa: „statyczna charakterystyka oddziaływania wstecznego”).

3. Zależność natężenia prądu kolektora od natężenia prądu bazy przy stałym napięciu między kolektorem i emiterem

$$I_C = f(I_B)_{U_{CE}=\text{const}} \quad (6)$$

(Inna nazwa: „statyczna charakterystyka przejściowa”).

4. Zależność natężenia prądu kolektora od napięcia między kolektorem i emiterem przy stałym natężeniu prądu bazy

### Ćwiczenie E-13: Badanie charakterystyk statycznych tranzystora

$$I_C = f(U_{CE})_{I_B = \text{const}} \quad (7)$$

(Inna nazwa: „statyczna charakterystyka wyjściowa”).

Równania mieszane (3.1) i (3.2) dla tranzystora w układzie o wspólnym emiterze mogą być zapisane następująco:

$$U_{BE} = h_{11}I_B + h_{12}U_{CE} \quad (8.1)$$

$$I_C = h_{21}I_B + h_{22}U_{CE} \quad (8.2)$$

Współczynniki  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$  i  $h_{22}$ , występujące w równaniach (8.1) i (8.2), stanowią parametry statyczne tranzystora i są zdefiniowane następująco:

– opór wejściowy

$$h_{11} = R_{we} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{const}} \quad [\Omega] \quad (9)$$

– współczynnik zwrotnego sprzężenia napięciowego - odwrotność współczynnika wzmocnienia napięciowego

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_B = \text{const}} \quad [\text{V/V}] \quad (10)$$

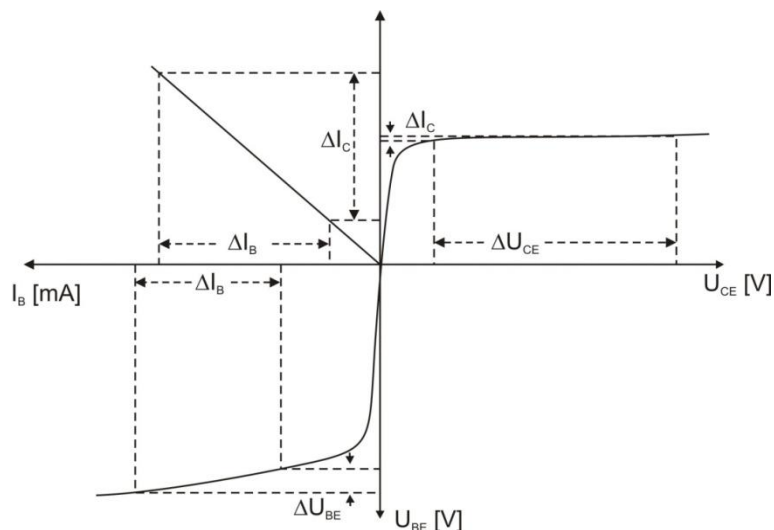
– współczynnik wzmocnienia prądowego

$$h_{21} = \beta = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{const}} \quad [\text{mA/mA}] \quad (11)$$

– przewodność wyjściowa - odwrotność oporu wyjściowego

$$h_{22} = \frac{1}{R_{wy}} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_B = \text{const}} \quad [1/\Omega] \quad (12)$$

Przyjęto, że rodziny charakterystyk statycznych tranzystora w układzie o wspólnym emiterze (WE lub OE) sporządza się w jednym wspólnym układzie współrzędnych o opisie osi jak na rysunku 4.

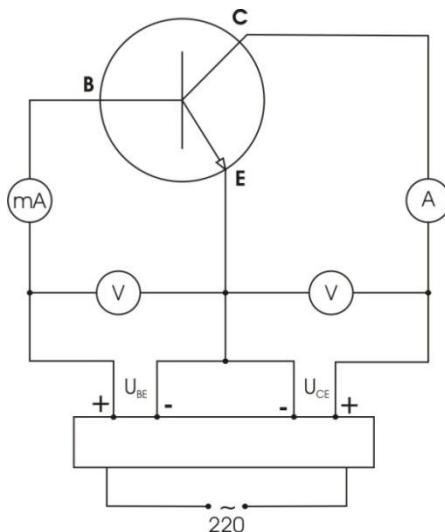


Rys. 4. Zintegrowany układ współrzędnych do prezentacji charakterystyk statycznych tranzystora w układzie o wspólnym emiterze

### III. Zestaw pomiarowy

2 woltomierze, miliamperomierz, amperomierz, tranzystor, zasilacz, przewody.

### IV. Schemat układu pomiarowego



### V. Przebieg ćwiczenia

1. Połączyć obwód według schematu.
2. Wyznaczenie charakterystyk  $I_B = f(U_{BE})$  dla dwóch wartości  $U_{CE}$ :
  - a) Na zasilaczu stabilizowanym ustawić napięcie  $U_{CE} = 2 \text{ V}$ .
  - b) Zmieniając napięcie emiter - baza  $U_{BE}$  w zakresie  $0 \div 1,2 \text{ V}$  co  $0,1 \text{ V}$ , odczytywać prąd bazy  $I_B$ .
  - c) Pomiary powtórzyć dla napięcia  $6 \text{ V}$ .
  - d) Wyniki wpisać do tabeli.

Ćwiczenie E-13: Badanie charakterystyk statycznych tranzystora

$U_{CE} = 2 \text{ V}$		$U_{CE} = 6 \text{ V}$	
$U_{BE} \text{ [V]}$	$I_B \text{ [mA]}$	$U_{BE} \text{ [V]}$	$I_B \text{ [mA]}$
0,1		0,1	
0,2		0,2	
...		...	
1,2		1,2	
Parametry mierników		Klasa	Zakres
$U_{CE}$ $U_{BE}$ $I_B$			Wartość najmniejszej działki

3. Wyznaczanie charakterystyk  $I_C = f(I_B)$  dla dwóch wartości  $U_{CE}$ :

- Na zasilaczu stabilizowanym ustawić napięcie  $U_{CE} = 2 \text{ V}$ .
- Zmieniając prąd bazy  $I_B$  w zakresie od 1 mA do 12 mA co 1 mA, odczytywać prąd kolektora  $I_C$ .
- Pomiar powtórzyć dla napięcia  $U_{CE} = 6 \text{ V}$ .
- Wyniki wpisać do tabeli.

$U_{CE} = 2 \text{ V}$		$U_{CE} = 6 \text{ V}$	
$I_B \text{ [mA]}$	$I_C \text{ [A]}$	$I_B \text{ [mA]}$	$I_C \text{ [A]}$
1		1	
2		2	
...		...	
12		12	
Parametry mierników		Klasa	Zakres
$U_{CE}$ $I_B$ $I_C$			Wartość najmniejszej działki

4. Wyznaczenie charakterystyk  $I_C = f(U_{CE})$  dla dwóch wartości  $I_B$ :

- Na zasilaczu stabilizowanym ustalić prąd bazy  $I_B = 5 \text{ mA}$ .
- Zmieniając napięcie kolektor - emiter  $U_{CE}$  w zakresie 0,2÷1 V co 0,2 V, w zakresie 1÷6 V co 1 V odczytywać prąd kolektora  $I_C$ .
- Pomiar powtórzyć dla prądu bazy  $I_B = 10 \text{ mA}$ .
- Wyniki wpisać do tabeli.

$I_B = 5 \text{ mA}$		$I_B = 10 \text{ mA}$	
$U_{CE} \text{ [V]}$	$I_C \text{ [A]}$	$U_{CE} \text{ [V]}$	$I_C \text{ [A]}$
0,2		0,2	
0,4		0,4	
...		...	
1,0		1,0	
2,0		2,0	
...		...	
6,0		6,0	
Parametry mierników		Klasa	Zakres
$U_{CE}$			
$I_B$			
$I_C$			
			Wartość najmniejszej działki

## VI. Opracowanie wyników

Celem ćwiczenia jest:

1. Wyznaczenie charakterystyk prądowo-napięciowych złącza baza-emiter przy stałym napięciu kolektor-emiter  
( $I_B = f(U_{BE})$  dla dwóch wartości  $U_{CE} = \text{const}$ ).
2. Wyznaczenie charakterystyk prądu kolektora od prądu bazy przy stałym napięciu kolektor-emiter  
( $I_C = f(I_B)$  dla dwóch wartości  $U_{CE} = \text{const}$ )
3. Wyznaczenie charakterystyk prądowo-napięciowych złącza kolektor-emiter przy stałym prądzie bazy  
( $I_C = f(U_{CE})$  dla dwóch wartości  $I_B = \text{const}$ )
4. Narysować zmierzone charakterystyki na wspólnym układzie współrzędnych
5. Dla punktów pracy leżących na odcinkach zbliżonych do liniowych obliczyć następujące parametry tranzystora pracującego w układzie OE:
  - oporność wejściową  $R_{we}$  :

$$R_{we} = h_{11E} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{const}}$$

- współczynnik wzmocnienia prądowego  $\beta$ :



## Ćwiczenie E-13: Badanie charakterystyk statycznych tranzystora

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = h_{21E} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{const}}$$

– przewodność wyjściową  $\frac{1}{R_{wy}}$ :

$$\frac{1}{R_{wy}} = h_{22E} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right|_{I_B = \text{const}}$$

Z wartości wzmocnienia prądowego  $\beta$  obliczyć współczynnik przeniesienia  $\alpha$ .

Z wartości przewodności wyjściowej  $\frac{1}{R_{wy}}$  obliczyć opór wyjściowy  $R_{wy}$ .

- Obliczyć błędy mierników z klasy dokładności i używanych zakresów pomiarowych, zaznaczyć je graficznie dla kilku wybranych punktów każdej charakterystyki.
- Obliczyć błędy bezwzględne wszystkich parametrów tranzystora metodą różniczki zupełnej, podać błędy procentowe tych parametrów, a wyniki zestawić w tabeli.

Parametr tranzystora		Błąd bezwzględny	Jednostka	Błąd procentowy [%]
Symbol	Wartość			
$r_{we}$				
$\beta$				
$\alpha$				
$\frac{1}{r_{wy}}$				
$r_{wy}$				

## Literatura

- Massalski J., Fizyka dla inżynierów, T. II, Fizyka współczesna, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- Sawieliew I.W., Wykłady z fizyki, T. II, Elektryczność i magnetyzm, Fale, Optyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1994.
- Szalikowa K.W., Fizyka półprzewodników, PWN, Warszawa 1974.
- Szczeniowski S., Fizyka doświadczalna, Cz. III, Elektryczność i magnetyzm, PWN, Warszawa 1972.
- Szydłowski H., Pracownia fizyczna wspomagana komputerem, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003.

## Zasada sporządzania wykresów

Prawidłowe opracowanie wyników pomiarów wymaga wykonania odpowiedniego wykresu. Podczas robienia wykresu należy kierować się następującymi zasadami:

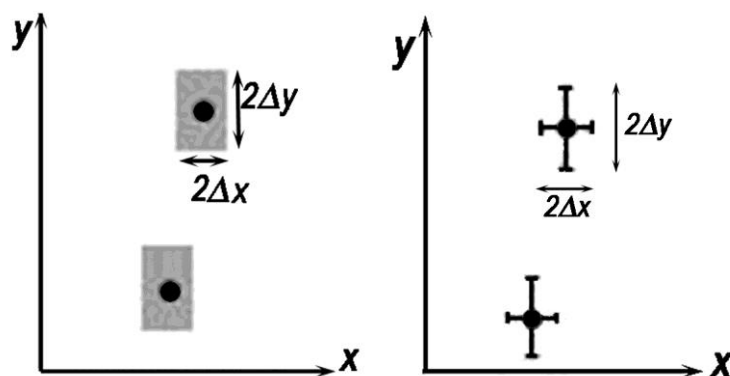
1. Wykres wykonuje się na papierze milimetrowym. Na układzie współrzędnych definiujemy liniowe osie liczbowe w przedziałach zgodnych z przedziałami zmienności wartości  $X$  i  $Y$ ; oznacza to, że na każdej z osi odkładamy tylko taki zakres zmian mierzonej wielkości fizycznej, w którym zostały wykonane pomiary. Nie ma zatem obowiązku odkładania na osiach punktów zerowych, gdy nie było w ich okolicy punktów pomiarowych (chyba, że w dalszej analizie konieczne będzie odczytanie wartości  $Y$  dla  $X=0$ ). Skalę na osiach układu наносimy zazwyczaj w postaci równooddalonych liczb. Ich wybór i gęstość na osi musi zapewniać jak największą prostotę i wygodę korzystania z nich.

Na osiach wykresu muszą być umieszczone odkładane wielkości fizyczne i ich jednostki lub wymiary.

2. Punkty наносimy na wykres tak, by były wyraźnie widoczne, zaznaczamy je kółkami, trójkątami, kwadracikami itp. Na rysunku należy zaznaczyć również niepewności pomiarowe w postaci prostokątów lub odcinków.

*Graficzne przedstawienie niepewności systematycznej:*

Założmy, że wartości  $x$  i  $y$  otrzymane z pomiarów są obarczone odpowiednio niepewnościami  $\Delta x$  i  $\Delta y$ . Oznacza to, że rzeczywiste wartości tych wielkości mieszczą się w przedziałach od  $x-\Delta x$  do  $x+\Delta x$  oraz od  $y-\Delta y$  do  $y+\Delta y$ . Na wykresie zależności  $Y(X)$  przedziały te wyznaczają wokół punktów  $(x,y)$  prostokąty o bokach  $2\Delta x$  i  $2\Delta y$ . Niepewności te można również zaznaczać wokół punktu pomiarowego  $(x,y)$  poprzez odcinki o długości  $2\Delta x$  i  $2\Delta y$  (rys.1)



Rys.1 Zaznaczanie niepewności wokół punktów pomiarowych.

**Uwaga:** Jeżeli wartość zmiennej  $X$  jest dokładnie znana (czyli  $\Delta x=0$ ), to na wykresie zaznaczamy tylko niepewności na osi zmiennej zależnej (na osi  $y$ ).

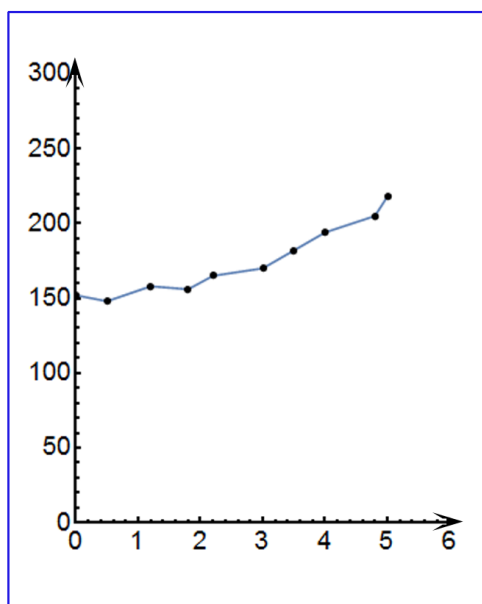
3. Rozmiar wykresu nie jest dowolny i nie powinien wynikać z tego, że dysponujemy takim, a nie innym kawałkiem papieru (na rys.2 arkusz papieru milimetrowego zaznaczony jest kolorem niebieskim). Rozmiar powinien być określony przez niepewności pomiarowe tych wielkości,

### Ćwiczenie E-13: Badanie charakterystyk statycznych tranzystora

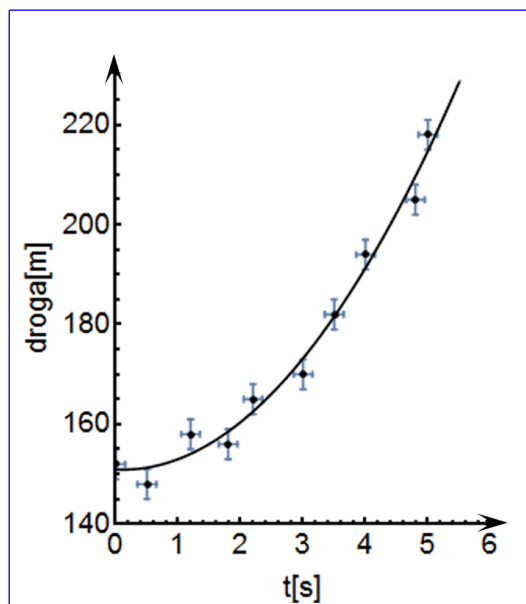
które odkłada się na osiach. Niepewność ta powinna w wybranej skali być odcinkiem o łatwo zauważalnej, znaczącej długości.

- Następnie prowadzimy odpowiednią krzywą (nie może to być linia łamana!) tak, by przecinała w miarę możliwości punkty pomiarowe, ale nie należy dążyć do tego, aby przechodziła ona przez wszystkie punkty, ponieważ każdy z nich obarczony jest niepewnością. W przypadku dużych rozrzutów staramy się, by ilość punktów poniżej i powyżej krzywej była zbliżona - w ten sposób uśredniamy graficznie wyniki pomiarów. W przypadku zależności nieliniowych korzystamy z krzywików.
- Każdy rysunek powinien być podpisany. Etykieta wykresu wyjaśnia, co rysunek zawiera, co reprezentują zaznaczone krzywe.

#### **PODSUMOWANIE:**



***zły wykres***



***dobry wykres***

Rys.2