

Zależność natężenia oświetlenia od odległości

CELE

Badanie zależności natężenia oświetlenia powierzchni wytwarzanego przez żarówkę od odległości od niej. Uzyskane dane są analizowane w kategoriach praw fotometrii (tzw. „prawa odwrotnych kwadratów”)

SPIS TREŚCI

- I. Opis zjawisk
 - A. Podstawowe pojęcia radiometrii i fotometrii
 - B. Zależność natężenia oświetlenia od odległości od źródła światła
- II. Zestaw pomiarowy
- III. Przebieg doświadczenia.
- IV. Analiza pomiarów z wykorzystaniem kalkulatora graficznego (TI83/84).
- V. Analiza pomiarów z wykorzystaniem arkusza MS Excel.

OPIS ZJAWISK

A. Podstawowe pojęcia radiometrii i fotometrii

Opis zjawisk i obserwacje propagacji energii fal świetlnych emitowanych przez źródła światła dokonywany jest na dwa sposoby.

Radiometria (zwana także fotometrią fizyczną) opiera się na pojęciu całkowitej energii promienistej emitowanej przez źródło, podczas gdy tzw. **fotometria wizualna** (zwana również fizjologiczną) zajmuje się jedynie tą częścią energii promienistej, która jest postrzegana przez ludzkie oko jako światło i uwzględnia czułość oka.

Widmo energii promienistej zwane światłem jest ograniczone i zawiera się ok. 300nm do 750nm. Fale o długościach krótszych (tzw. ultrafioletowe) lub dłuższe (tzw. podczerwone) nie wywołują wrażenia wizualnego.

Odpowiednio do opisu zjawisk stosowane są dwa zestawy wielkości i odpowiednich jednostek.

Symbole wielkości radiometrycznych są analogiczne do ich odpowiedników fotometrycznych – patrz tabela 1.

Wszystkie wielkości fotometrii wizualnej można otrzymać z odpowiednich wielkości radiometrycznych posługując się tzw. świetlnym równoważnikiem mocy promieniowania, uwzględniającym czułość widmową oka ludzkiego. Jego wartość wynosi: 683 lumen/wat.

Zestaw podstawowych wielkości radiometrycznych i fotometrii wizualnej jest podobny i obejmuje pojęcia:

Moc źródła światła.

Źródło światła jest charakteryzowane przez całkowitą moc wypromieniowaną [w watach]. Wielkość tę nazywamy **strumieniem promieniowania** lub **strumieniem świetlnym** - Φ .

W radiometrii jednostką strumienia Φ jest **wat [W]**. Odpowiednikiem tej wielkości w fotometrii wizualnej tj. z uwzględnieniem obszaru widzialnego i czułości oka jest strumień świetlny, którego jednostką jest **lumen [lm]**.

Natężenie światła.

Powszechnie używany termin 'natężenie światła' (jasność) odnosi się do energii wypromieniowanej w jednostce czasu przez źródło w jednostkowy kąt bryłowy.

Wielkość ta nosi nazwę **natężenia kąowego** – I , i podawana jest w watach/steradian.

Fotometrycznym odpowiednikiem jest **światłość kierunkowa**, której jednostką jest kandela [cd].

Natężenie kierunkowe służy min. do opisywania własności kierunkowych źródeł światła. Natężenie (światłość) jest definiowane jako: $I(\Omega) = d\Phi/d\Omega$.

Oświetlenie.

Odbierane przez człowieka wrażenia wzrokowe w znacznej mierze opierają się na efektach świetlnych na powierzchniach oświetlanych obiektów.

Oznacza to, potrzebę opisu ilości energii promienistej, która dociera do elementu oświetlanej powierzchni.

Natężenie oświetlenia - E , opisuje strumień promieniowania, który dociera do jednostkowego pola oświetlanej powierzchni. Jednostką natężenia oświetlenia jest **Wat/m²**.

Fotometrycznym odpowiednikiem natężenia oświetlenia jest **iluminancja** podawana w luksach, $I_x = \text{lm/m}^2$.

Natężenie oświetlenia (iluminancja) powierzchni oświetlanej przez punktowe źródło światła zależy od natężenia kąowego (światłości kierunkowej), odległości źródła od powierzchni oraz orientacji powierzchni względem kierunku propagacji energii promienistej -równ.1:

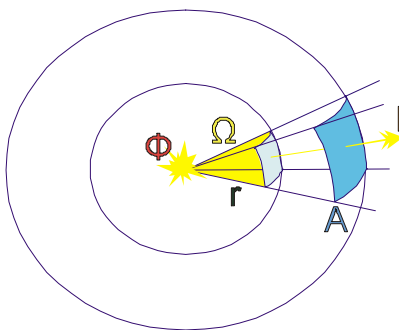
$$E = \frac{\text{strumień } \Phi}{\text{powierzchnia } A} = \frac{I \cdot \Omega}{A} = \frac{I \cdot A}{A \cdot r^2} = \frac{I}{r^2} \quad (1)$$

gdzie strumień świetlny w określonym kącie bryłowym dany jest przez :

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (2)$$

a kąt bryłowy opisany jest jako:

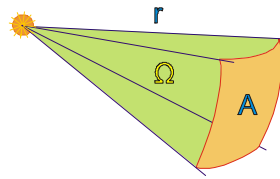
$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (3)$$



Rys.1. Strumień świetlny Φ i światłość kierunkowa I .

Kąt bryłowy:

Kąt bryłowy Ω definiowany jest przez stożek sferyczny wycinany z kuli. Kąt bryłowy związany jest z polem powierzchni A wycinanej przez stożek z kuli o promieniu r , której środek pokrywa się z wierzchołkiem stożka i wynosi: A/r^2 . Jednostką kąta bryłowego jest **steradian [sr]**.

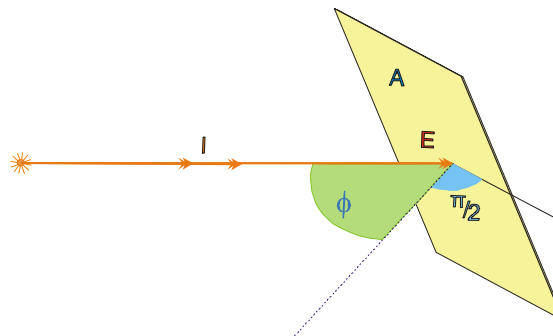


Rys.2. Kąt bryłowy

Jeśli energia promienista pada na powierzchnię pod kątem różnym od zera, wówczas natężenie oświetlenia powierzchni **E** jest modyfikowane, tak by opisywało efektywną powierzchnię - patrz rys.3:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \phi \quad (4)$$

gdzie ϕ jest kątem zawartym pomiędzy kierunkiem prostopadłym do oświetlanej powierzchni i kierunkiem rozchodzenia się energii promienistej.

Rys. 3. Oświetlenie **E** powierzchni nachylonej.

Prawo 'odwrotnych kwadratów'.

Natężenie oświetlenia na powierzchni oświetlanej przez punktowe źródło światła, które promieniuje energię jednorodnie we wszystkich kierunkach, stosuje się do tzw. prawa 'odwrotnych kwadratów'. Opisuje ono spadek ilości energii promieniowania padającego na jednostkową powierzchnię wraz ze wzrostem odległości od źródła.

Całkowity strumień promieniowania generowany przez źródło we wszystkich kierunkach (w pełen kąt bryłowy) pozostaje stały podczas gdy powierzchnia kuli, w której energia ta jest zawarta rośnie proporcjonalnie do kwadratu jej promienia (odległości od źródła).

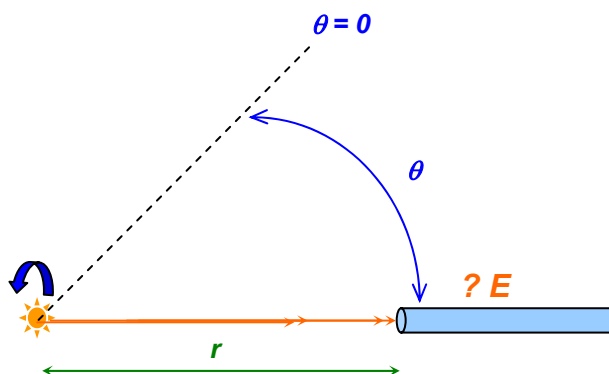
$$E \cong \frac{I}{r^2} \quad (5)$$

Tak więc, moc na jednostkę powierzchni maleje; porównaj rys. 1. Wiele zjawisk, np. oddziaływania w polu elektrostatycznym i grawitacyjnym opisywane jest zależnościami o podobnym charakterze.

Tabela 1. Wielkości i jednostki radiometryczne i fotometryczne.

Radiometria			Fotometria wizualna		
wielkość	symbol	jednostka	jednostka	symbol	wielkość
Energia promienista	Q	J	lm s	Q	ilość światła
Strumień promieniowania	Φ	W	lm	Φ	Strumień świetlny
Natężenie oświetlenia	E	W/m ²	lm/m ² =lx	E	Iluminancja
Natężenie kątowe	I	W/sr	lm/sr = cd	I	Światłość kierunkowa
Luminancja energetyczna	L	W/(m ² sr)	lm/(m ² sr)	L	Luminancja

Pomiary radiometryczne można przeprowadzić wykorzystując zestaw oparty na goniometrze – rys 4, który umożliwia zmianę odległości oświetlanej powierzchni detektora światła od źródła oraz kąta obserwacji źródła. Czujnik dokonuje pomiarów natężenia światła docierającego ze źródła.



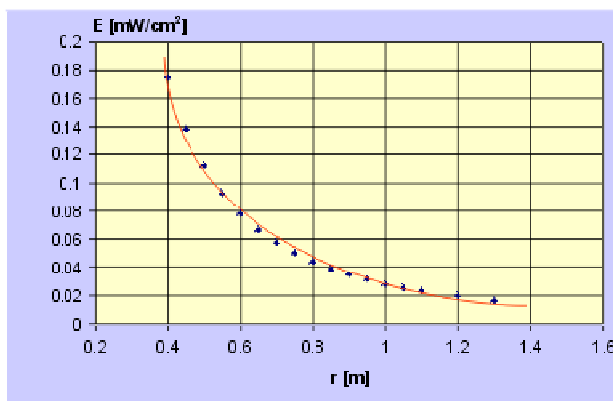
Rys.4. Schemat goniometru

B. Zależność natężenia oświetlenia od odległości od źródła światła

Zależność natężenia oświetlenia od odległości można badać dokonując jednoczesnych pomiarów odległości czujnika od źródła – r oraz natężenia oświetlenia E dla stałego kąta obserwacji $\theta = 0$ źródła. Konfiguracja pomiarów zakłada punktowy charakter źródła światła. Przy tym założeniu prezentowane pomiary mogą być analizowane przy wykorzystaniu 'prawa odwrotnych kwadratów':

$$E \cong \frac{I}{r^2}$$

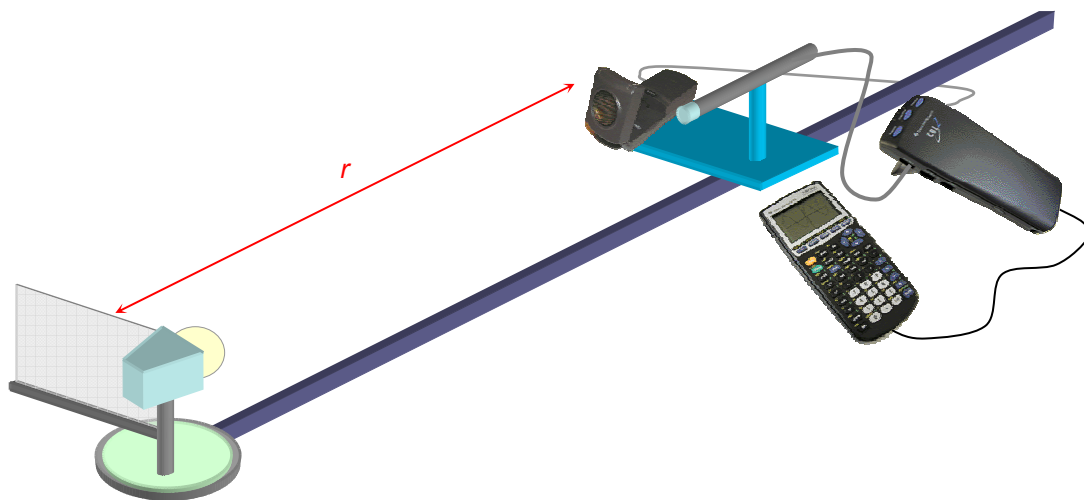
Typową postać tej zależności przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Ilustracja 'prawa odwrotnych kwadratów'

ZESTAW POMIAROWY

Badanie zależności natężenia światła od odległości od źródła możliwe jest w zestawie wykorzystującym prosty goniometr złożony z typowego źródła światła (żarówki) umieszczonego na ławie optycznej. Czujnik natężenia światła umieszczony jest na ruchomym uchwycie, który może zmieniać położenie na ławie, patrz rysunek. Okno półprzewodnikowego detektora światła ustawiane jest w zdefiniowanym położeniu względem źródła światła. Czujnik rejestruje względne natężenie oświetlenia E w jednostkach $[mW/cm^2]$. Sygnał wyjściowy czujnika (napięcie) jest proporcjonalny do natężenia oświetlenia aktywnej powierzchni czujnika. W doświadczeniu zakłada się punktowy charakter źródła światła, tak więc wyniki można interpretować przez 'prawo odwrotnych kwadratów'.



Rys.6. Schemat układu pomiarowego

Zestaw pomiarowy składa się z:

- i. goniometru, tj. 1.5m ławy optycznej z powierzchnią odbijającą falę ultradźwiękową wykorzystywaną do pomiarów odległości,
- ii. lampy żarowej E14 (np. 15 - 40W),
- iii. urządzenia pomiarowego Calculator Based Laboratory (CBL)
<http://www.vernier.com/legacy/cbl/index.html>
lub CBL2,
<http://education.ti.com/us/product/tech/datacollection/features/cbl2.html>
- iv. czujnika światła (standardowego czujnika CBL),
<http://www.vernier.com/probes/probes.html?ls-bta&template=standard.html>
- v. ultradźwiękowego czujnika położenia - Calculator Based Ranger - CBR,
- vi. kalkulatora graficznego TI83, TI83 Plus, TI 84,
- vii. kabla transmisji danych (standard).
- viii. kabla połączeniowego CBR – CBL
- ix. programu: PHOT2, który można pobrać pod adresem: <http://www.lepla.edu.pl/>
- x. kabla interfejsu TI-GRAPH LINK™ (opcjonalnie)
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/cables.html#serialwin>, wraz z oprogramowaniem
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/downgraph.html>
- xi. komputera osobistego z oprogramowaniem TI Connect™ (opcjonalnie);
opis programu dostępny jest pod adresem:
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/software.html> ; pobranie pliku programu możliwe jest pod adresem:
<http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/download.html>

Uwagi o przygotowaniu zestawu pomiarowego

- Czujnik światła powinien być podłączony do wejścia kanału CH1 urządzenia pomiarowego CBL.
- Ultradźwiękowy detektor CBR musi być podłączony do dedykowanego gniazda **SONIC** urządzenia CBL.
- Pomocnicza, płaska powierzchnia odbijająca powinna być zamocowana do uchwytu źródła światła w ten sposób, by jej płaszczyzna pokrywała się z osią źródła światła. Zadaniem tej powierzchni jest odbijanie fali ultradźwiękowej emitowanej przez detektor CBR.
- Ultradźwiękowy detektor CBR powinien być zamocowany na tym samym uchwycie co detektor światła, a jego okno pomiarowe powinno być usytuowane w jednej płaszczyźnie z oknem pomiarowym czujnika światła. W ten sposób zapewniony zostanie prawidłowy pomiar odległości czujnika od źródła światła.
- W czasie pomiarów minimalna odległość uchwytu czujnika światła i urządzenia CBR od źródła światła powinna wynosić co najmniej 0.4 m.
- Wysokość położenia okna czujnika musi zostać dopasowana do wysokości środka źródła światła.
- W czasie pomiarów należy ograniczyć oświetlenie w pomieszczeniu.

III. PRZEBIEG DOŚWIADCZENIA

W doświadczeniu czujnik światła rejestruje względne natężenie oświetlenia E w $[mW/cm^2]$ dla różnych odległości od źródła światła r . Odległość jest zmieniana przez powolny ruch uchwytu mocującego czujnik światła. Dane pomiarowe są przedstawiane w postaci wykresu zależności $E(r)$. Przebieg pomiarów jest kontrolowany przez kalkulator graficzny przy pomocy załadowanego wcześniej programu PHOT2.

Procedura eksperymentalna podzielona jest na część przygotowawczą i pomiary właściwe.

Przygotowanie pomiarów:

Wykonaj połączenia czujnika światła i detektora CBR do urządzenia CBL i kalkulatora z CBL. Szczegóły podłączania pokazuje rysunek 6. Uruchom kalkulator i urządzenie CBL.

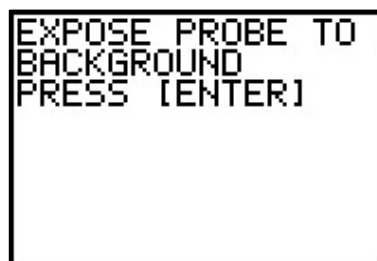
Pomiary zasadnicze muszą być poprzedzone pomiarem oświetlenia zewnętrznego. W tym celu należy ograniczyć oświetlenie zewnętrzne i zapewnić jego niezmienność.

Następnie wykonaj:

1. Na kalkulatorze uruchom program PHOT2, wybierając jego nazwę z listy otwieranej klawiszem [PRGM].
2. Wybierz opcję ZERO PROBE z głównego menu programu – rys.7.
3. Wyłącz wykorzystywane źródło światła. Uruchom pomiar naciskając klawisz [ENTER] – rys.8.



Rys.7.



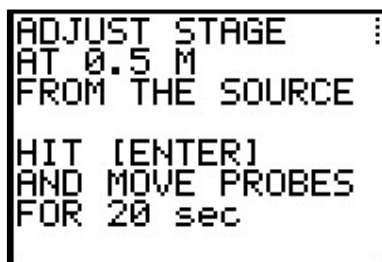
Rys.8.

Zmierzona wartość oświetlenia zewnętrznego będzie uwzględniana (odejmowana) w rejestrowanych wartościach pomiarów właściwych.

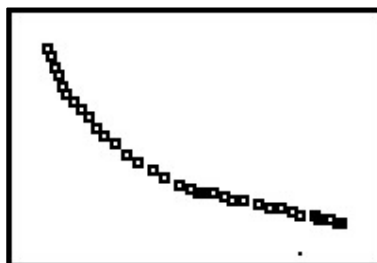
Opisana kalibracja może być wykonana raz dla danej serii pomiarowej pod warunkiem, że w czasie jej trwania nie zmieniają się warunki oświetlenia zewnętrznego.

Pomiar właściwy

1. Ustaw uchwyt czujnika i detektora na ławie w odległości ok. 0.5m od źródła światła. Sprawdź położenie (wysokość i orientację) czujnika światła, tak by uzyskać współosiowe położenie obu elementów.
2. Z głównego menu programu wybierz opcję 1: COLLECT DATA.
3. Włącz źródło światła.
4. Uruchom pomiar naciskając klawisz [ENTER] na kalkulatorze i rozpocznij przesuwanie uchwytu czujnika światła, oddalając go od źródła światła.
Dobierz prędkość przesuwu tak, by całkowite przemieszczenie (o ok. 1m) zajęło ok. 20 sekund. – rys.9.
5. Po zakończeniu pomiaru wyświetlany jest wykres zależności natężenia światła od odległości – rys. 10.
6. Pomiary można powtórzyć, stosując te same lub zmienione ustawienia, włącznie z nową kalibracją oświetlenia zewnętrznego. W tym celu należy wybrać opcję 1: REPEAT z menu CONTROL – rys.11.
7. Zakończ pomiary wybierając z głównego menu programu opcję 2: RETURN TO MAIN a następnie 2: QUIT – rys. 7.
8. Uzyskane dane są zapisane w pamięci kalkulatora. Po zakończeniu pomiaru można odłączyć urządzenie CBL od kalkulatora i kontynuować analizę danych wykorzystując funkcje kalkulatora.



Rys. 9



Rys.10



Rys.11

IV. Analiza pomiarów z wykorzystaniem kalkulatora graficznego (TI83/84).

Pogłębiona analiza eksperymentu może zostać dokonana przy wykorzystaniu narzędzi dostępnych w kalkulatorach graficznych (lub oprogramowania do analizy danych takich jak arkusz kalkulacyjny MS Excel™)

Uzyskane w pomiarach dane zachowane są w kalkulatorze w postaci list:

- wartości odległości w [m] - List L_2
- wartości natężenia oświetlenia E [mW/cm^2] – List L_3

Przykładowe dane w postaci plików formatu TI83 można pobrać jako:

- odległości w [m], plik - Data sample/TI83/ L_2
- natężenie oświetlenia E w [mW/cm^2], plik - Data sample/TI83/ L_3

Wykres zależności pomiędzy zestawami danych eksperymentalnych jest zdefiniowany jako Plot1 (L_3 , L_2) i może być wyświetlony z poziomu menu STAT PLOT.

Analiza wykresów

Analizę uzyskanej zależności natężenia oświetlenia od odległości można dokonać na podstawie uzyskanych wykresów. Analiza może być przeprowadzona według 'prawa odwrotnych kwadratów' : (równ. 5):

$$E \cong \frac{I}{r^2}$$

Równanie określa, że natężenie oświetlenia jest proporcjonalne do odwrotności kwadratu odległości od źródła.

Sprawdzenie tej zależności w przypadku zebranych danych doświadczalnych może być wykonane dwiema metodami.

Analiza zależności liniowej

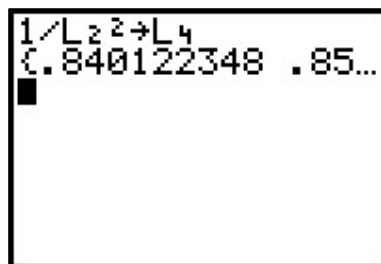
Zgodnie z prawem odwrotnych kwadratów równ.5, wykres zależności $E(1/r^2)$ powinien mieć charakter liniowy. W celu zbadania tej prawidłowości należy najpierw dokonać transformacji oryginalnych wartości odległości - r z listy L_2 , na wartości $1/r^2$.

Przeliczone wartości umieszczamy w nowej liście L_4 – rys.12.

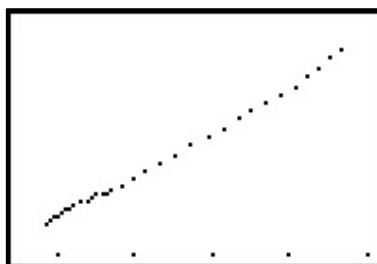
Teraz należy zdefiniować i wykonać nowy wykres zależności danych z listy L_4 i L_3 – rys. 13. Rozkład punktów na wykresie wskazuje na liniowy charakter zależności. Zatem możemy zastosować liniowy model regresji do wyznaczenia analitycznej postaci zależności. Funkcja wyznaczająca parametry regresji liniowej wywoływana jest z menu STAT CALC menu - rys.14, wraz z parametrami – rys. 15. Jako wynik operacji wyświetlony zostaje zestaw parametrów wyznaczonej funkcji a równanie funkcyjne zostaje zapisane jako równanie Y_1 . – rys. 16.

Współczynnik korelacji r określa jakość zastosowanego modelu regresji. W podanym przykładzie wartość r jest bliska 1, co świadczy o dobrej korelacji liniowej pomiędzy wartościami natężenia E i $1/r^2$.

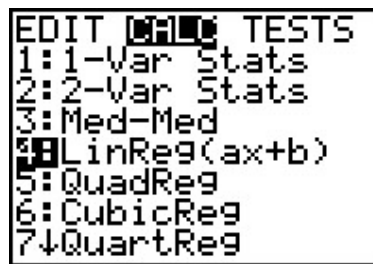
Naniesienie na wykres uzyskanej prostej regresji pozwala na jej porównanie z rozkładem punktów pomiarowych – rys. 17.



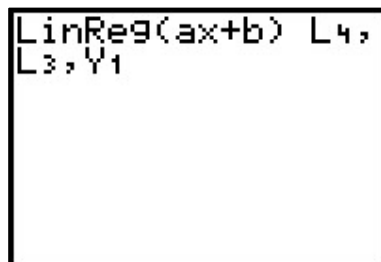
Rys.12



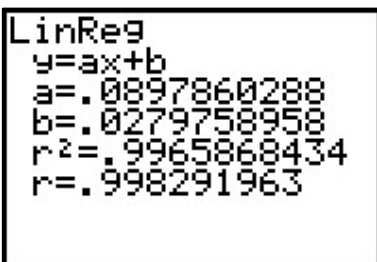
Rys.13



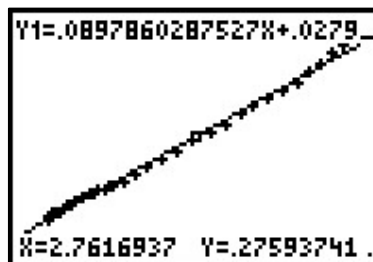
Rys.14



Rys.15



Rys.16

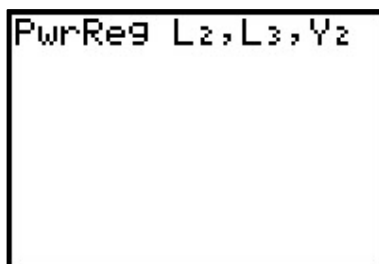


Rys.17

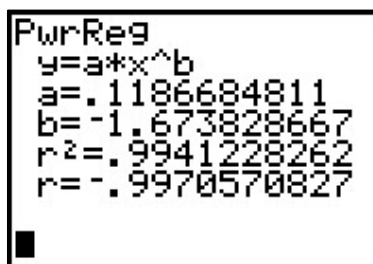
Analiza zależności potęgowej

Zależność $E(1/r^2)$ może zostać zweryfikowana przez bezpośrednie zastosowanie modelu regresji potęgowej dla uzyskanych danych natężenia i odległości.

Funkcja wyznaczająca parametry regresji potęgowej wywoływana jest z menu STAT CALC opcją PwrReg. Jako argumenty funkcji regresji należy podać nazwy list oraz nazwę zmiennej Y_2 , w której zachowana zostanie wyznaczona postać funkcji. – rys. 18.



Rys.18



Rys.19

Jako wynik operacji wyświetlony zostaje zestaw parametrów a i b wyznaczonej funkcji $y=ax^b$ a zależność funkcyjna zostaje zapisana jako równanie Y_2 – rys. 19.

Współczynnik korelacji r określa jakość zastosowanego modelu regresji. W podanym przykładzie wartość r jest bliska 1, co świadczy o dobrej potęgowej korelacji natężenia oświetlenia E i odległości r . W podanym przykładzie uzyskana wartości wykładnika b jest bliska -2 . Taki wynik wskazuje na doświadczalne potwierdzenie zależności opisywanej przez prawo odwrotnych kwadratów.

Teraz można jednocześnie wyświetlić wykres punktów eksperymentalnych (Plot1 – rys.20) i uzyskanej krzywej regresji – rys. 21.



Rys.20



Rys.21

V. ANALIZA POMIARÓW Z WYKORZYSTANIEM ARKUSZA MS EXCEL

Analiza eksperymentu może zostać dokonana przy wykorzystaniu oprogramowania do analizy danych takich jak arkusz kalkulacyjny MS Excel™ lub narzędzi dostępnych w kalkulatorach graficznych.

Przeniesienie danych z kalkulatora do komputera.

Uzyskane dane mogą zostać, po zakończeniu pomiaru, przeniesione z kalkulatora do komputera. Kabel TI GRAPH LINK™ wraz z oprogramowaniem TI Connect™ umożliwia dostęp do zawartości pamięci kalkulatora (TI DEVICE EXPLORER) oraz edycję danych (TI DATA EDITOR).

Uzyskane w pomiarach dane zachowane są w kalkulatorze w postaci list:

- wartości odległości w [m] - Lista L_2
- wartości natężenia oświetlenia w [mW/cm^2] - Lista L_3

W ramach programu TI Connect™ - narzędzie TI DEVICE EXPLORER umożliwia zapisanie na dysku komputera listy zachowanej w kalkulatorze a następnie jej edycję w edytorze danych TI DATA EDITOR. Tryb eksportu - Special Lists Export umożliwia także zapisanie wskazanej listy w pliku o formacie Excel (plik *.CSV). Taki plik może być otwierany i przetwarzany przez program MS Excel.

Przykładowe dane w postaci plików formatu MS Excel można pobrać jako:

- wartości odległości w [m], plik - Data sample/MSEExcel /**dist**
- wartości natężenia oświetlenia w [mW/cm^2], plik - Data sample/MSEExcel/**intensity**

Analiza wykresów

Utwórz nowy arkusz i pobierz dane ze zbiorów: odległości - **dist.xls** oraz natężenia - **intensity.xls**. Utwórz wykres **$E(r)$** z oryginalnych danych eksperymentalnych. Wybierz punktowy typ wykresu – rys. 22.

Analiza pomiarów może być przeprowadzona z wykorzystaniem prawa odwrotnych kwadratów (5):

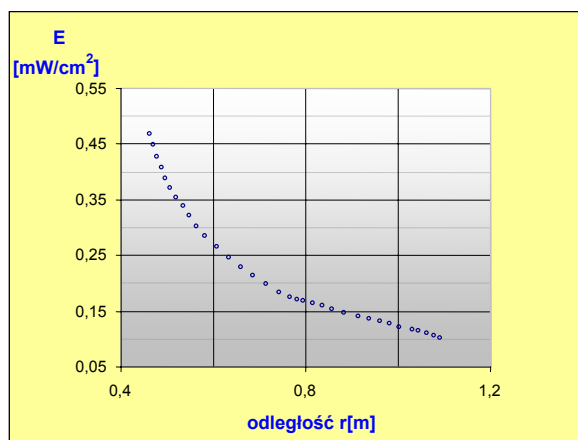
$$E \cong \frac{I}{r^2}$$

Równanie określa, że natężenie oświetlenia jest proporcjonalne do odwrotności kwadratu odległości od źródła. Sprawdzenie tej zależności w przypadku zebranych danych doświadczalnych może być wykonane dwiema metodami.

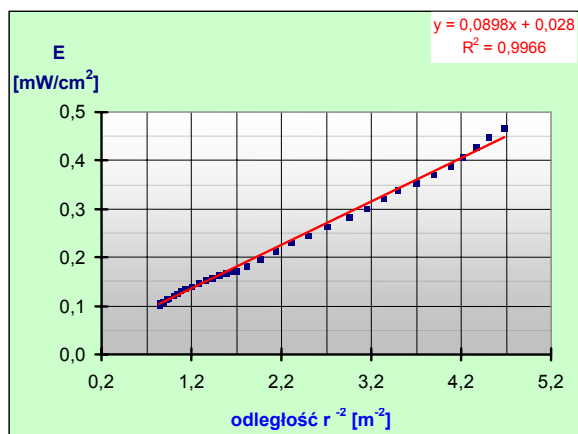
Analiza zależności liniowej

Zgodnie z prawem odwrotnych kwadratów (5), wykres zależności **$E(1/r^2)$** powinien być mieć charakter liniowy. W celu zbadania tej prawidłowości należy najpierw dokonać transformacji oryginalnych wartości odległości r , do postaci $1/r^2$ i zachować przeliczone wartości w nowej kolumnie arkusza. Teraz należy zdefiniować i utworzyć nowy wykres.

Rozkład punktów na wykresie wskazuje na liniowy charakter zależności. Zatem możemy zastosować liniowy model regresji przez naniesienie linii trendu (typ liniowy) na wykres. Ustalona linia trendu zostanie naniesiona na wykres wraz z wyznaczoną postacią funkcji regresji – rys. 23. Wartość podanego współczynnika determinacji R^2 określa jakość dopasowania przyjętego modelu regresji. W podanym przykładzie wartość R^2 jest bliska 1, co świadczy o dobrej korelacji liniowej pomiędzy wartościami natężenia E i $1/r^2$.



Rys.22. Wykres doświadczalnie uzyskanej zależności **$E(r)$**

Rys.23. Natężenie oświetlenia E w funkcji $1/r^2$. Regresja liniowa.

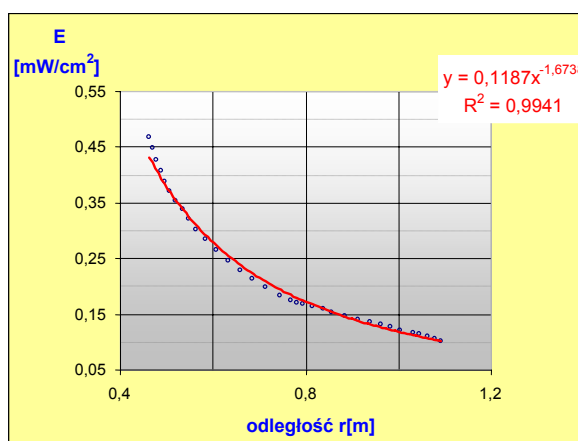
Analiza zależności potęgowej

Zależność $E(1/r^2)$ może zostać zweryfikowana przez bezpośrednie zastosowanie modelu regresji potęgowej dla uzyskanych danych natężenia i odległości. Można to uzyskać wybierając potęgowy typ linii trendu ($y=ax^b$) nanoszonej na wykres oryginalnych danych $E(r)$.

Ustalona linia trendu zostanie naniesiona na wykres wraz z wyznaczoną postacią funkcji regresji. – rys. 24.

Wartość podanego współczynnika determinacji R^2 określa jakość dopasowania przyjętego modelu regresji. W podanym przykładzie wartość R^2 jest bliska 1, co świadczy o dobrej korelacji potęgowej pomiędzy wartościami natężenia E i r .

W podanym przykładzie uzyskana wartości wykładnika b jest bliska -2 . Taki wynik wskazuje na doświadczalne potwierdzenie zależności opisywanej przez prawo odwrotnych kwadratów.

Rys.24. Natężenie oświetlenia E w funkcji odległości r .
Dane doświadczalne i regresja potęgowa.

Uwaga:

Kompletną analizę przykładowych danych eksperymentalnych zawiera specjalnie opracowany plik arkusza MS Excel:

Data sample/MSExcel /invsqranalysis