

## Ćwiczenie 8

### Ładunki i pole elektryczne

#### **Cel ćwiczenia**

Część podstawowa: Doświadczalne sprawdzenie słuszności prawa Coulomba, wyznaczenie przenikalności elektrycznej próżni.

Część dodatkowa: Przybliżenie pojęcia gradientu, badanie związku między potencjałem elektrycznym a wektorem natężenia pola elektrycznego.

#### **Wymagane wiadomości teoretyczne**

Prawo Coulomba, natężenie pola elektrycznego, potencjał elektryczny, zasada superpozycji, przenikalność elektryczna. Metoda regresji liniowej.

Dodatkowo: pole zachowawcze, operator gradientu, związek między potencjałem a natężeniem pola, natężenie pola elektrycznego i potencjał na osi układu złożonego z dwóch punktowych ładunków różnoimiennych (układ typu dipol elektryczny).

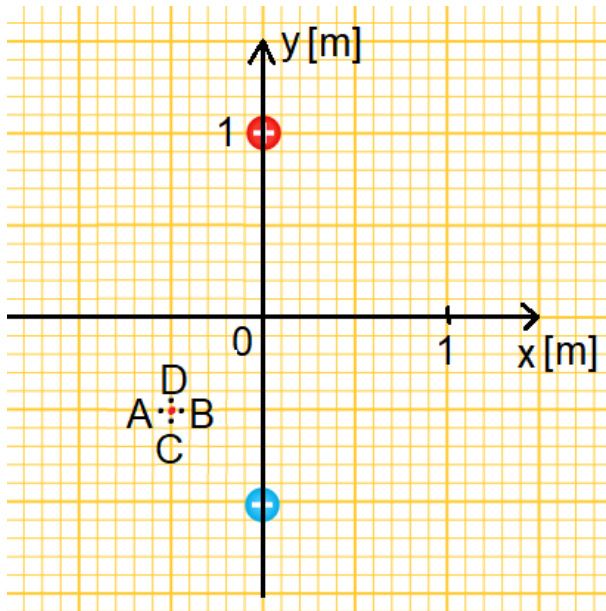
#### **Wykonanie ćwiczenia**

##### **1. Część podstawowa – badanie prawa Coulomba, wyznaczenie $\epsilon_0$ .**

- a) Uruchom program, zaznacz opcję *Siatka* w ramce w górnej części ekranu (prawa strona), aby nanieść na obszar działania linie siatki. Możesz także zmienić kolor tła na jasny, wybierając na dole ekranu ikonę *Menu* i klikając pozycję *Opcje*, a następnie zaznaczając *Tryb projektora*.
- b) Umieść w dowolnym głównym punkcie kratowym (punkt przecięcia pogrubionych linii siatki, występujących co 0,5 m) dodatni ładunek 1 nC. Następnie, przy pomocy miernika (*sensor*), który należy przeciągnąć z dołu ekranu, zmierz wartości natężenia pole elektrycznego w zależności od odległości od ładunku:
  - z zakresu [0,3 ; 1] m, co 0,1 m,
  - oraz, dalej, dla wymienionych odległości: 1 m ; 1,2 m ; 1,5 m ; 2 m ; 3 m.
- c) Zebrane dane umieść w tabeli (Tabela 1) dwukolumnowej (r [m] ; E [N/C] )

##### **2. Część dodatkowa – wyznaczenie E na podstawie mierzonego potencjału.**

**Wyznaczenie wektora natężenia w zadanym punkcie na podstawie wartości potencjału wokół tego punktu**



d) Ustaw tryb *Tryb projektora*. Ten typ widoku umożliwi zwiększenie dokładności wykonywanych pomiarów.

e) Umieść w dwóch głównych punktach kratowych odległych od siebie o 2 m ładunek ujemny  $-1 \text{ nC}$  i ładunek dodatni  $+1 \text{ nC}$ , jak na rysunku (ładunek ujemny w umownym punkcie  $(0,-1)$ , ładunek dodatni w punkcie  $(0,1)$ ). Układ współrzędnych został dodatkowo dorysowany i nie można go wyświetlić w programie.

f) Celem wyznaczenia wektora  $\mathbf{E}$  w punkcie  $(-0,5; -0,5) \text{ m}$ , zmierz potencjał elektryczny wokoło punktu  $(-0,5; -0,5) \text{ m}$ , tj. w punktach A(-

0,55 ; -0,5) m, B(-0,45 ; -0,5) m, C(-0,5 ; -0,55) m, D(-0,5 ; -0,45) m. Miernik znajduje się po prawej stronie ekranu.

g) Zebrane dane umieść w tabeli (Tabela 2) dwukolumnowej (nazwa punktu ;  $V[V]$ ).

### Wyznaczenie zależności wektora natężenia $\mathbf{E}$ od położenia (na prostej $x = 0$ dla powyższego układu dwóch ładunków)

h) Na prostej  $x = 0$  zmierz potencjał w punktach o rzędnej  $y$  zmieniającej się w zakresie  $[-0,7; 0,7] \text{ m}$  co  $0,1 \text{ m}$ .

i) Zebrane dane umieść w tabeli (Tabela 3) dwukolumnowej ( $y[m]$  ;  $V[V]$ ).

## 3. Opracowanie wyników

### Część 1

#### Wyniki zebrane w punkcie 1 a) – c)

- Na podstawie danych zebranych w Tabeli 1, wykreśl zależność  $E(r)$ . Dopasuj linię trendu typu potęgowego, wyświetl jej równanie na wykresie.
- Wykreśl zależność  $1/E$  ( $r^2$ ). Sprawdź, czy otrzymaną zależność można traktować jako liniową, dopasuj linię trendu. Na podstawie wykreślonego przebiegu zdecyduj, czy należy uzupełnić dane pomiarowe (zagaścić wykres).
- Korzystając z metody regresji liniowej, wyznacz współczynnik kierunkowy prostej opisującej zależność  $1/E$  ( $r^2$ ). Użyj funkcji REGLINP (pamiętaj o zaznaczeniu tablicy  $2 \times 2$  i – po wpisaniu formuły – wciśnięciu kombinacji klawiszy SHIFT, CTRL, ENTER).
- Wyznacz przenikalność elektryczną próżni wraz z jej niepewnością (metoda przenoszenia niepewności).

## Część 2

### Wyniki zebrane w punkcie 2 d) – g)

- e) Wyznacz różnicę potencjałów między punktami B i A, a następnie podziel ją przez różnicę,  $\Delta x$ , między odciętymi punktów ( $\Delta x = 0,1$  m).
- f) Wyznacz różnicę potencjałów między punktami D i C, a następnie podziel ją przez różnicę,  $\Delta y$ , między rzędnymi tych punktów ( $\Delta y = 0,1$  m).
- g) Wyznacz niepewność ilorazów obliczonych w punktach e) i f) metodą przenoszenia niepewności.

#### **Uwaga:**

- Niepewność maksymalna  $\Delta_{\max}$  różnicy potencjałów  $\Delta V$  nie jest stała i zależy od położenia punktów, w których ten potencjał się mierzy oraz precyzji Eksperymentatora (ustawienie kursora). Przy prowadzeniu starannych i precyzyjnych pomiarów, w okolicy punktu (0,5 ; 0,5) m proponuje się przyjąć wartość  $\Delta_{\max}(\Delta V) = 0,2$  V (zarówno dla pary B-A i D-C).

- Niepewność wyznaczania współrzędnych położenia przy użyciu siatki jest stała (nie zależy od położenia punktów) i wiąże się z precyzją pomiarów wykonanych przez Eksperymentatora. Przy dokładnych odczytach proponuje się przyjąć  $\Delta_{\max}(\Delta x) = \Delta_{\max}(\Delta y) = 0,02$  m, co odpowiada podwojonemu „najmniejszemu skokowi kursora”.

- Metoda przenoszenia niepewności wymaga użycia niepewności standardowej, wobec czego niepewności maksymalne  $\Delta_{\max}(\Delta V)$ ,  $\Delta_{\max}(\Delta x)$ ,  $\Delta_{\max}(\Delta y)$  należy przeliczyć na niepewności standardowe

- h) Wielkość wektorową, której współrzędne zostały określone w punktach e) i f) można traktować jako przybliżenie gradientu potencjału w punkcie (0,5 ; 0,5),

$$\text{grad}V(0,5;0,5) \approx \frac{V_B - V_A}{x_B - x_A} \hat{i} + \frac{V_D - V_C}{y_D - y_C} \hat{j}.$$

Na tej podstawie wyznacz współrzędną  $E_x$  oraz  $E_y$  wektora natężenia pola elektrycznego wraz z ich niepewnościami (metoda przenoszenia niepewności).

- i) Na podstawie znajomości  $E_x$  i  $E_y$  wyznacz wartość wektora  $\mathbf{E}$  w punkcie (0,5 ; 0,5) wraz z niepewnością oraz tangens kąta, jaki tworzy ten wektor z osią OX wraz z niepewnością (metoda przenoszenia niepewności).
- j) Porównaj otrzymany wynik z bezpośrednim pomiarem przy użyciu *sensora* (na dole ekranu).

### Wyniki zebrane w punkcie 2 h) – i)

- k) Wykreśl zależność potencjału  $V(y)$ , zgodnie z danymi w Tabeli 3.
- l) Do Tabeli 3 dołącz trzecią kolumnę, w której umieść współrzędną  $E_y$  wektora natężenia pola elektrycznego wyznaczoną na podstawie znajomości różnicy potencjału  $\Delta V$  i różnicy rzędnych punktów  $\Delta y = 0,1$  m (z takim krokiem dokonywano pomiaru potencjału) – „numeryczne różniczkowanie”. Początkowe wiersze tabeli przedstawia przykład:

y [m]	V [V]	$E_y$ [N/C]
-0,7	-24,15	brak wyniku, gdyż brak „poprzedniego punktu”, tj. punktu o rzędnej mniejszej o 0,1 m
-0,6	-15,9	$E_y$ wyznaczona na podstawie różnicy potencjału w tym punkcie i „punkcie poprzednim” – o rzędnej mniejszej o 0,1 m
...	...	...

**Uwaga:** tak otrzymaną wartość  $E_y$  przypisujemy określonemu punktowi w tabeli. W przykładzie powyżej wartość przypisuje się punktowi o wyższej rzędnej (-0,6 m), stąd  $E_y$  występują dla wartości  $y$  z przedziału [-0,6 ; 0,7] m. Równorzędnym przybliżeniem byłoby przypisanie tak wyznaczonych  $E_y$  „punktowi poprzedniemu” (-0,7 m), wtedy  $E_y$  występowałyby dla  $y$  z przedziału [-0,7 ; 0,6] m. Lepszym przybliżeniem byłoby przypisanie tak otrzymanej wartości „punktowi pośredniemu”, tj. o rzędnej będącej średnią z rzędnych (-0,65 m), i wtedy  $E_y$  byłoby przypisane punktom o rzędnych: -0,65 m ; -0,55 m ; ... 0,55 m ; 0,65 m. Do Eksperymentatora należy, które z przybliżeń tu zastosować.

- m) Porównaj otrzymaną zależność z zależnością teoretyczną – wyprowadź wzór, jaki powinien opisywać wektor  $\mathbf{E}$  na osi takiego układu (na podstawie prawa Coulomba i zasady superpozycji), a następnie oblicz wartości  $\mathbf{E}$  dla tych rzędnych, dla których wyznaczono  $E_y$  metodą opisaną w punkcie l). Na wspólnym wykresie nanieś wyznaczone w punkcie l) wartości  $E_y$  i wartości obliczone na podstawie wyprowadzonego teoretycznego wzoru.

#### 4. Dyskusja i wnioski

W dyskusji i wnioskach zwróć uwagę, czy otrzymane zależności w Części 1 są zgodne z oczekiwaniami oraz czy, w granicach niepewności, wyznaczona wartość  $\epsilon_0$  jest zgodna z wartością tablicową.

W dyskusji dotyczącej Części 2 proszę zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- czy wyznaczona w zaproponowany sposób wartość wektora  $\mathbf{E}$  w punkcie (0,5 ; 0,5) m oraz kąt, jaki tworzy ten wektor z osią OX jest zgodny z wartością bezpośrednio zmierzoną,
- przedstawionej metody wyznaczenia  $\mathbf{E}$  można użyć w każdym punkcie (nie tylko w tych zaproponowanych) ; jaka jest zaleta użycia takiej metody (w porównaniu do prawa Coulomba i zasady superpozycji),
- jakie są wady tej metody,

- czy zaproponowana tu metoda będzie lepsza (dokładniejsza) dla punktów, w których natężenie przyjmuje większą, czy mniejszą wartość (ściśle ujmując problem – należałoby się tu odnieść osobno do współrzędnych  $E_x$  i  $E_y$  i sformułować go następująco: czy metoda będzie dokładniejsza w punktach, gdzie dana współrzędna  $E$  przyjmuje większą, czy mniejszą wartość), co sprowadza się do pytania, w jakich warunkach wektor  $\frac{V_B - V_A}{x_B - x_A} \hat{i} + \frac{V_D - V_C}{y_D - y_C} \hat{j}$  będzie lepiej przybliżał gradient potencjału,
- czy otrzymana zależność  $E_y(y)$  na osi układu ładunków różnoimiennych ( $x = 0$ ) pokrywa się z zależnością teoretyczną, w jakich obszarach (dla jakich  $y$ ) pokrywa się lepiej, a dla jakich odstępstwa są większe - porównaj, jak zmienia się potencjał dla tych  $y$  (wykres z punktu 3k Opracowania wyników).

### ***Literatura***

*Resnick, Halliday, Walker t.3, rozdz. 23.*