

# Spis treści

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Przedmowa</b> .....                                                             | 5   |
| <b>1. Podstawowe zjawiska wykorzystywane w elektrotechnice i elektronice</b> ..... | 7   |
| 1.1. Oddziaływania elektromagnetyczne.....                                         | 7   |
| 1.1.1. Pole elektryczne.....                                                       | 7   |
| 1.1.2. Pole magnetyczne.....                                                       | 14  |
| 1.1.3. Pole elektromagnetyczne.....                                                | 27  |
| 1.2. Prąd elektryczny w przewodnikach.....                                         | 31  |
| 1.2.1. Przewodniki pierwszej klasy.....                                            | 31  |
| 1.2.2. Przewodniki drugiej klasy – elektrolity.....                                | 36  |
| 1.3. Prąd elektryczny w półprzewodnikach.....                                      | 42  |
| 1.4. Dielektryki w polu elektrycznym – izolatory.....                              | 47  |
| 1.5. Ferromagnetyki – właściwości, zastosowania.....                               | 50  |
| <b>2. Obwody prądu stałego – DC</b> .....                                          | 55  |
| 2.1. Prawo Ohma i prawo Joule’a.....                                               | 55  |
| 2.1.1. Prawo Ohma.....                                                             | 55  |
| 2.1.2. Rezystancja (oporność).....                                                 | 57  |
| 2.1.3. Prawo Joule’a.....                                                          | 59  |
| 2.1.4. Energia i moc.....                                                          | 60  |
| 2.2. Prawa Kirchhoffa.....                                                         | 61  |
| 2.2.1. Pierwsze i drugie prawo Kirchhoffa.....                                     | 61  |
| 2.2.2. Wnioski wynikające z praw Kirchhoffa.....                                   | 65  |
| 2.3. Źródła energii elektrycznej – elementy aktywne.....                           | 71  |
| 2.3.1. Źródła napięciowe.....                                                      | 72  |
| 2.3.2. Źródła prądowe.....                                                         | 76  |
| 2.3.3. Źródła napięciowe i prądowe w obwodach elektrycznych i elektronicznych..... | 79  |
| 2.4. Odbiorniki w obwodach elektrycznych – elementy pasywne.....                   | 81  |
| 2.4.1. Rezystancja $R$ – rezystory.....                                            | 82  |
| 2.4.2. Indukcyjność $L$ – cewki indukcyjne, dławiki.....                           | 87  |
| 2.4.3. Pojemność $C$ – kondensatory.....                                           | 92  |
| 2.5. Zależności energetyczne w obwodach elektrycznych.....                         | 101 |
| 2.6. Stany pracy obwodów elektrycznych.....                                        | 105 |
| 2.6.1. Stan jałowy.....                                                            | 106 |
| 2.6.2. Stan obciążenia.....                                                        | 107 |
| 2.6.3. Stan zwarcia.....                                                           | 109 |
| <b>3. Obwody prądu przemiennego sinusoidalnie – AC</b> .....                       | 113 |
| 3.1. Znaczenie obwodów prądu sinusoidalnego w elektrotechnice.....                 | 113 |
| 3.2. Wielkości charakteryzujące przebiegi sinusoidalne.....                        | 116 |
| 3.2.1. Parametry charakteryzujące szybkość zmian wielkości sinusoidalnych.....     | 117 |
| 3.2.2. Wartości chwilowe, wartość średnia i skuteczna prądu zmiennego.....         | 118 |
| 3.2.3. Moc i energia w obwodach prądu sinusoidalnego.....                          | 122 |

|                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3. Podstawy analizy obwodów sinusoidalnych .....                                   | 126        |
| 3.3.1. Odwzorowanie wektorowe przebiegów sinusoidalnych –<br>wykresy wektorowe ..... | 126        |
| 3.3.2. Idealne elementy $R$ , $L$ , $C$ w obwodach prądu sinusoidalnego .....        | 131        |
| 3.3.3. Łączenie elementów $R$ , $L$ , $C$ , elementy rzeczywiste – impedancja.....   | 135        |
| <b>4. Układy trójfazowe.....</b>                                                     | <b>147</b> |
| 4.1. Wiadomości wstępne .....                                                        | 147        |
| 4.1.1. Układ trójfazowy nieskojarzony.....                                           | 148        |
| 4.1.2. Układ trójfazowy skojarzony .....                                             | 150        |
| 4.2. Źródła trójfazowe .....                                                         | 151        |
| 4.3. Odbiorniki w układach trójfazowych.....                                         | 155        |
| 4.4. Moc w układach trójfazowych.....                                                | 160        |
| 4.4.1. Przełączanie gwiazda/trójkąt .....                                            | 161        |
| 4.5. Układy trójfazowe niskiego napięcia .....                                       | 163        |
| 4.5.1. Uziemienia w układach trójfazowych niskiego napięcia.....                     | 163        |
| 4.5.2. Układ cztero- i pięcioprzewodowy (TN-C i TN-S) .....                          | 165        |
| <b>Wykaz oznaczeń, wielkości i jednostek stosowanych w podręczniku .....</b>         | <b>169</b> |
| <b>Literatura .....</b>                                                              | <b>171</b> |

# Przedmowa

Podręcznik ten powstał jako wynik wieloletnich doświadczeń dydaktycznych zebranych przede wszystkim podczas prowadzenia wykładów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej (który obecnie nazywa się Wydziałem Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki), a następnie w Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi. Miałem okazję prowadzić wykłady także z przedmiotu elektrotechnika i elektronika na wydziałach nieelektrycznych. Efektem tych doświadczeń jest moje głębokie przekonanie, że zajęcia dla nieelektryków i nieelektroników z tego przedmiotu powinny być prowadzone inaczej, a podręczniki napisane inaczej niż dla studentów studiujących na kierunkach elektrycznych i elektronicznych. I nie chodzi tu o mniejszy zakres materiału, a o sposób jego prezentacji. Powodów zapewne można by znaleźć wiele, ale wymienię tylko dwa, jak mi się wydaje, najważniejsze.

Po pierwsze, studenci nieelektrycy, a zwłaszcza studenci studiów inżynierskich, mają podczas tych zajęć, zazwyczaj prowadzonych w bardzo ograniczonym wymiarze, jedyną możliwość poznania najważniejszych praw, pojęć, terminów oraz właściwości obwodów i urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Najczęściej podczas dalszych studiów wiedza ta już nie będzie rozwijana. Dla wielu w ogóle edukacja zakończy się na pierwszym, inżynierskim stopniu. W związku z tym poprzestawanie na samym podaniu wiadomości podstawowych, bez związania ich choćby pobieżnie z praktycznym wykorzystaniem czy znaczeniem, powoduje, że wiadomości te dla większości studentów są całkowicie abstrakcyjne. Zwłaszcza niezrozumiały jest cel poznawania i uczenia się ich. A to już początek porażki dydaktycznej!

Po drugie, wykład czy ćwiczenia z jednak dość trudnej tematyki, która nie jest dla nieelektryków kierunkiem głównym, nie są bardzo atrakcyjne, zwłaszcza gdy brak jest przekonania o istotnym znaczeniu podawanej wiedzy w wykształceniu inżyniera. Pokazanie, jaki jest związek omawianego prawa czy zjawiska ze spotykanymi w życiu codziennym aplikacjami, może wzbudzić zainteresowanie studentów, więcej, może sprowokować studentów do zadawania pytań, czyli może pomóc wykładowcy osiągnąć tak pożądaną efekt, jakim jest nawiązanie kontaktu ze studentami w związku z omawianą podczas zajęć tematyką.

Są to główne myśli, które przyświecały mi przy opracowaniu niniejszego podręcznika.

Aby zrealizować zamierzone cele, prawie każde zagadnienie teoretyczne zostało w podręczniku skomentowane z punktu widzenia znaczenia i wykorzystania w praktycznych rozwiązaniach, z którymi studenci albo się spotkali, albo po zwróceniu na nie uwagi mają szansę spotkać się osobiście.

Osiągnięcie celu, którym jest zainteresowanie tematyką podręcznika studenta studiów inżynierskich nieelektrycznych, zarówno studiów stacjonarnych, jak i niestacjonarnych, na ogół bardziej doświadczonych zawodowo, wymagało wprowadzenia niewielkich zmian w tradycyjnej dla podstawowego wykładu z elektrotechniki i elektroniki systematyce i sposobie narracji, upodabniając nieco podręcznik do wykładu.

Uznałem także, że warunkiem osiągnięcia celu jest maksymalne uproszczenie wykładu. Zarówno z formalnego punktu widzenia – poprzez zredukowanie matematyki w stopniu ograniczonym jedynie do poziomu koniecznego dla zrozumienia omawianego problemu, jak i pod względem tematyki – poprzez pominięcie niektórych zjawisk czy wielkości, które moim zdaniem nie są niezbędne dla zrozumienia najważniejszych problemów podstaw elektrotechniki i elektroniki. Przyjąłem bowiem założenie, że studenci studiów inżynierskich, kierunków nieelektrycznych nie będą projektowali instalacji, urządzeń, maszyn elektrycznych, układów elektronicznych ani nie będą ich wykonywali, a w każdym razie nie będą tego robili bez dodatkowego przeszkolenia.

Czy założony cel polegający na zaproponowaniu nieco innego podejścia do podstaw przedmiotu elektrotechnika i elektronika dla studentów nieelektryków spełni oczekiwania, zdecydują adresaci, czyli przede wszystkim studenci studiów inżynierskich kierunków nieelektrycznych i nieelektronicznych.

Wszystkie omawiane w podręczniku zagadnienia zainteresowani studenci mogą pogłębić, korzystając z książek zamieszczonych w spisie literatury. W tym celu polecam szczególnie pozycje: S. Bolkowski, *Teoria obwodów elektrycznych* (1998), P. Hempowicz i in., *Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków* (1999) oraz F. Colon, M. Jufer, *Introduction a l'électrotechnique. Traité d'Électricité* (1995).

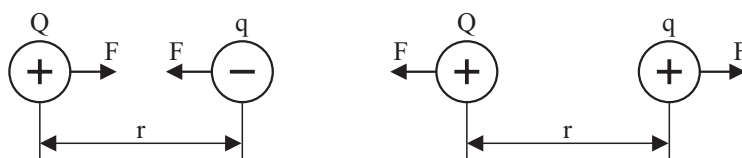
Niniejszy podręcznik stanowi pierwszą część projektu dydaktycznego – zamiarem autora jest opracowanie części drugiej, poświęconej wytwarzaniu, przesyłowi, rozdziałowi i użytkowaniu energii elektrycznej oraz części trzeciej, poświęconej elektronice.

# 1. Podstawowe zjawiska wykorzystywane w elektrotechnice i elektronice

## 1.1. Oddziaływania elektromagnetyczne

### 1.1.1. Pole elektryczne

Między ładunkami elektrycznymi występują siły bądź odpychające, bądź przyciągające (rys. 1.1). Jest to zjawisko naturalne, podobnie jak występowanie przyciągających sił grawitacyjnych między dwiema masami. Siły działające pomiędzy ładunkami elektrycznymi nazywane są siłami elektromagnetycznymi, a samo zjawisko – oddziaływaniami elektromagnetycznymi.



Rys. 1.1. Oddziaływania elektromagnetyczne pomiędzy dwoma ładunkami

Działanie wszystkich urządzeń elektrycznych, elektronicznych, a także to, że możemy słuchać radia, rozmawiać przez telefon komórkowy, oglądać w telewizji zawody sportowe odbywające się na drugiej półkuli prawie w tym samym czasie, w którym rozgrywają się w rzeczywistości, to, że możemy przeprowadzać operacje na otwartym sercu, przesyłając obraz operowanego serca przez satelitę i przez satelitę sterować robotem wykonującym operację, zawdzięczamy właśnie wykorzystaniu tych oddziaływań elektromagnetycznych.

Dwa ładunki jednoimienne odpychają się.

Dwa ładunki różnoimienne przyciągają się.

Czyżby to była cała tajemnica? Tak, innych oddziaływań elektromagnetycznych wykorzystywanych w elektrotechnice i elektronice nie ma. Zdefiniowane i badane przez fizyków oddziaływania wewnątrzjądrowe nie wpływają na wykorzystywane w technice właściwości ładunków elektrycznych i z tego powodu w tym podręczniku nie będą omawiane.

Przedstawione na rysunku 1.1 sytuacje odpowiadają wyidealizowanemu najprostszyemu przypadkowi, mianowicie gdy ładunki są nieruchome i gdy mamy tylko dwa ładunki. Właśnie dla takiego przypadku Charles Augustin de Coulomb w końcu XVIII wieku (1785) opracował prawo (1.1) określające wartość siły  $F$  oddziaływania pomiędzy ładunkami elektrycznymi, kierunek tej siły i zwrot.

$$F = k \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \quad (1.1)$$

gdzie:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

$\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m.

Tak prosty przypadek w technice nie występuje i jest niezwykle trudny do zrealizowania nawet w warunkach laboratoryjnych. W rzeczywistości mamy do czynienia z oddziaływaniami pomiędzy milionami ładunków, poruszających się w jednym kierunku lub zmieniających kierunek i zwrot wiele razy w ciągu sekundy. Oddziaływania stają się wówczas skomplikowane. Prawo Coulomba pozostaje jednak pierwszym poziomem budowanego modelu oddziaływań elektromagnetycznych, na którego najwyższych poziomach mamy równania i prawa rządzące współczesną elektrotechniką, elektroniką, informatyką i telekomunikacją.

Jak bardzo musiały kolejne pokolenia fizyków i techników rozwinąć ten model, aby obecnie obliczeniowo panować nad zjawiskami wynikającymi z tych oddziaływań, jeżeli w jednym  $\text{cm}^3$  miedzi, tzn. materiału, z którego zbudowane są przewody w naszych mieszkaniach i wszystkie przewodzące części całej elektrotechniki, elektroniki i informatyki mieści się  $10^{23}$  elementarnych cząstek zwanych elektronami, obdarzonych ładunkami elektrycznymi, a ładunki te, tworząc prąd elektryczny, poruszają się najczęściej w sposób opisany przez skomplikowane równania?

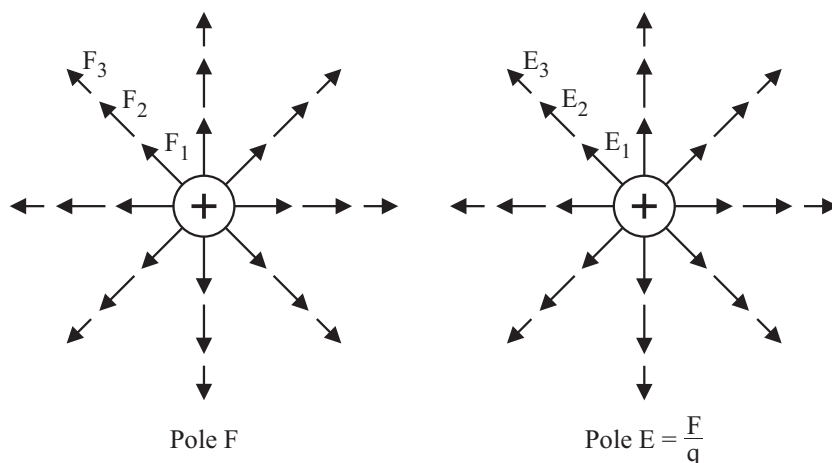
Dla celów technicznych, nazywanych często makroskopowymi, wystarczająco dokładna okazała się metoda obliczania skutków tych oddziaływań, której podstawy fizyczne przedstawił **Michael Faraday**, a uzupełnił i matematycznie opracował **James Clerk Maxwell** (1868), wykorzystując także wcześniejsze osiągnięcia innych badaczy.

Każdy punkt przestrzeni otaczającej ładunek elektryczny  $Q$  można scharakteryzować za pomocą siły, która działałaby na ładunek  $q$  umieszczony w tym punkcie. Siła ta wyznaczona może być z prawa Coulomba. Ładunek  $Q$  potraktujmy jako źródło oddziaływań, a ładunek  $q$  jako obiekt oddziaływań elektromagnetycznych. Jeżeli wektory sił działających na ładunek  $q$  wyznaczymy dla każdego punktu, otrzymamy przestrzeń, którą nazwano **polem sił**. Pojęcia tego używał Michael Faraday.

Na czym polega zaleta pojęcia pola sił w porównaniu z prawem Coulomba? Na tym, że każdy punkt interesującej nas przestrzeni, na przykład znajdujący się we wnętrzu przewodu, może być charakteryzowany poprzez wyznaczoną dla tego punktu siłę. Gdy znamy rozkład przestrzenny pola sił, nie interesuje nas, czy źródłem oddziaływań jest jeden ładunek czy dziesięć tysięcy i gdzie się one znajdują. Wiemy bowiem, jaka siła będzie wywierana na wprowadzony w konkretny punkt pola sił ładunek. W konsekwencji możemy przewidzieć zachowanie się ładunków na przykład znajdujących się w przewodach. Jeżeli są to ładunki swobodne, tzn. mogące poruszać się w środowisku, w którym się znajdują, możemy obliczyć, z jaką prędkością i w jakim kierunku będą się one poruszały, tworząc prąd elektryczny.

Pojęcie pola sił było wielkim krokiem na drodze do matematycznego opanowania oddziaływań elektromagnetycznych, miało jednak poważną wadę. Mianowicie siła działająca na wprowadzony w pole sił ładunek  $q$  zależy nie tylko od tego pola, ale także od wartości wprowadzonego ładunku  $q$ , nie charakteryzuje więc wyłącznie działania źródła pola sił. Patrząc na wzór Coulomba (1.1), łatwo można temu zaradzić. Wystarczy wektor siły  $F$  podzielić przez wartość wprowadzonego ładunku  $q$ . Wówczas otrzymuje się inny wektor, który ma kierunek i zwrot taki, jak siła  $F$  działająca na wprowadzony ładunek, a wartość równą ilorazowi siły i ładunku  $q$ .

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{Q}{r^2} \quad (1.2)$$



Rys. 1.2. Uproszczony obraz graficzny wektorów pola sił oraz wektorów natężenia pola elektrycznego, wytwarzanego przez dodatni ładunek  $Q$

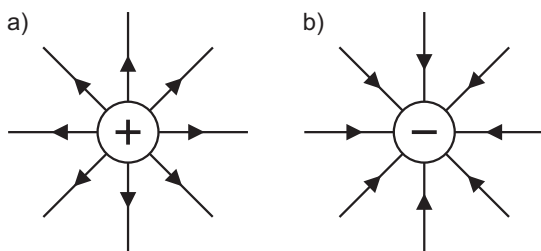
Wektor  $E$  nie zależy już od wartości wprowadzonego w pole ładunku  $q$ . Charakteryzuje wyłącznie skutki oddziaływań wynikające z istnienia ładunku  $Q$ , czyli

ładunku (lub ładunków) wytwarzającego pole. Można zatem w sposób analogiczny jak pole sił stworzyć pole wektora  $E$ , nazywane **polem elektrycznym**. W opisywanym przypadku będzie to pole elektryczne wytwarzane przez ładunek  $Q$ .

### Natężenie pola elektrycznego

Wektor  $E$ , nazwany **natężeniem pola elektrycznego**, ma kierunek i zwrot taki jak siła działająca na dodatni ładunek  $q$ . Oddziaływania pola  $E$  na wprowadzone weń ładunki nazywane są oddziaływaniami elektrycznymi. Wektory sił  $F$  w polu sił ładunku dodatniego  $Q$ , działające na wprowadzony ładunek dodatni, oraz wektory natężenia pola  $E$  w polu elektrycznym ładunku  $Q$  przedstawione są na rysunku 1.2. Siła  $F$  działająca na ładunki mierzona jest w niutonach N, natomiast natężenie pola  $E$  w N/C, co po przekształceniach daje V/m. Wyznaczenie siły  $F_{el}$  działającej na ładunek  $q$  w polu o natężeniu  $E$  jest bardzo proste na podstawie definicji (1.2), a mianowicie:

$$F_{el} = q \cdot E \quad (1.3)$$



Rys. 1.3. Pole elektryczne samotnych ładunków: (a) dodatniego oraz (b) ujemnego

Rysunek 1.3 przedstawia sposób graficznego obrazowania pola elektrycznego. Linie pokazują kierunki i zwroty wektorów natężenia pola  $E$ .

Podsumowując, można podać następującą definicję pola elektrycznego:

**pole elektryczne jest to przestrzeń, w której na wprowadzony ładunek elektryczny działa siła  $F$**

lub

**pole elektryczne jest to przestrzeń, w której każdy punkt jest scharakteryzowany przez wektor natężenia pola elektrycznego  $E$ .**

Obie definicje w istocie oznaczają to samo, bowiem natężenie pola elektrycznego  $E$  z fizycznego punktu widzenia może być rozumiane jako siła, która działałaby na ładunek 1 C, jeśli taki ładunek znalazł się w punkcie pola o natężeniu  $E$ .

### Potencjał elektryczny i napięcie między dwoma punktami pola elektrycznego

Natężenie pola elektrycznego  $E$  jest niewystarczające do pełnego scharakteryzowania pola, zwłaszcza z punktu widzenia wartości energetycznej pola albo mówiąc ściślej, z punktu widzenia pracy związanej z przesunięciem ładunków

w polu elektrycznym. Jest to ważny punkt widzenia, bowiem praca ta, jeżeli wykonuje ją pole, jest wykorzystywana w odbiornikach elektrycznych pod postacią na przykład energii cieplnej, mechanicznej, świetlnej lub chemicznej.

Miarą zdolności do wykonania tej pracy jest wielkość zwana **potencjałem elektrycznym**, oznaczana przez literę  $V$ . Potencjał danego punktu pola jest zdefiniowany jako stosunek pracy, którą trzeba wykonać, aby ładunek  $q$  przesunąć z danego punktu pola do nieskończoności, do wartości tego ładunku. Innymi słowy, w układzie jednostek SI:

**potencjał danego punktu pola  $E$  to praca, jaką trzeba wykonać, aby ładunek 1 C przesunąć z tego punktu do nieskończoności.**

$$V_1 = \frac{W_{1\infty}}{q} \quad (1.4)$$

gdzie:

$V_1$  – potencjał punktu 1,

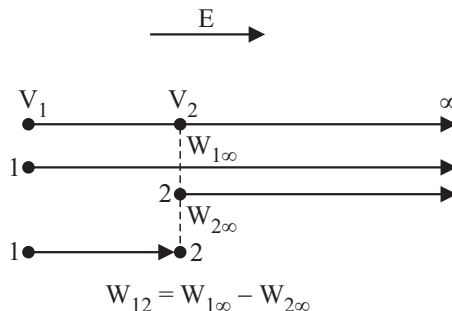
$W_{1\infty}$  – praca potrzebna do przesunięcia ładunku  $q$  z punktu 1 do nieskończoności.

Jednostką potencjału jest 1 V = 1 J/1 C.

Jeżeli ruch ładunku odbywa się w wyniku działania sił pola, czyli zgodnie z kierunkiem działania sił pola, pracę wykonuje pole. Z takiej pracy korzystamy, uruchamiając nasze odbiorniki energii elektrycznej. Jeśli przesunięcie ładunku odbywa się przeciw siłom pola, praca musi być wykonana kosztem energii doprowadzonej z zewnątrz. Tę pracę wykonują generatory w elektrowniach kosztem energii napędzającej generatory.

W praktyce interesująca jest praca wykonana przy przesunięciu ładunku  $q$  w obwodzie elektrycznym, tzn. pomiędzy dwoma punktami o różnych potencjałach. Można wykazać, że praca związana z przesunięciem ładunku pomiędzy punktem 1 i punktem 2 (rys. 1.4), tj.  $W_{1,2}$ , jest równa:

$$W_{1,2} = W_{1\infty} - W_{2\infty} = q \cdot V_1 - q \cdot V_2 = q \cdot (V_1 - V_2) \quad (1.5)$$



Rys. 1.4. Przesunięcie ładunku między dwoma punktami pola elektrycznego o różnych potencjałach

Różnica potencjałów występująca pomiędzy dwoma punktami pola  $E$  nazywana jest napięciem elektrycznym.

$$U_{1,2} = V_1 - V_2 \quad (1.6)$$

Można więc napisać:

$$W_{1,2} = q \cdot U_{1,2}$$

Praca związana z przesunięciem ładunku  $q$  od punktu 1 do punktu 2, czyli na drodze  $l_{1,2}$ , wykonana przez siłę  $F$ , może być także obliczona jako  $W_{1,2} = F \cdot l_{1,2}$ .

A zatem wzór określający natężenie pola  $E = F/q$  może być zapisany następująco:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{W_{1,2}}{l_{1,2} \cdot q} \text{ i uwzględniając, że } \frac{W_{1,2}}{q} = U_{1,2}, \text{ otrzymujemy:}$$

$$E = \frac{U_{1,2}}{l_{1,2}} \quad (1.7)$$

Z zależności (1.7) zazwyczaj wykorzystywanej w technice wynika, że natężenie pola elektrycznego  $E$  między dwoma punktami jest wprost proporcjonalne do napięcia  $U$  występującego między tymi punktami i odwrotnie proporcjonalne do odległości między nimi. Inaczej mówiąc, jeśli między dwoma obiektami występuje na przykład zbyt duże natężenie pola (zbyt silne pole), to można je zmniejszyć albo obniżając napięcie występujące między tymi obiektami, albo zwiększając odległość między nimi. Zmniejszenie lub zwiększenie natężenia pola elektrycznego oznacza zmniejszenie lub zwiększenie sił działających na ładunki, które się w tym polu znajdują.

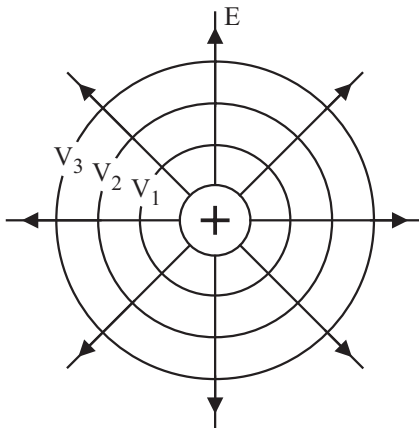
Występowanie pod wpływem pola elektrycznego sił działających na swobodne ładunki znajdujące się w przewodach obwodów elektrycznych powoduje ruch tych ładunków, czyli tworzy potrzebny nam prąd elektryczny. Napięcie elektryczne jest jednym z parametrów charakteryzujących, wytwarzane w źródłach energii elektrycznej, pole elektryczne.

Pole elektryczne występuje także w izolatorach (dielektrykach) oddzielających dwie powierzchnie (punkty) o różnych potencjałach. Siły spowodowane polem elektrycznym działają na znajdujące się w izolatorach ładunki, nie powodują jednak ruchu ładunków, czyli nie powodują przepływu prądu, gdyż w dielektrykach (izolatorach) ładunki są związane z atomami (brak swobodnych ładunków). Właśnie na tym polega izolujące działanie dielektryków.

Pamiętajmy także, że organizmy żywe, a więc i ludzie, pełne są ładunków elektrycznych (elektronów i jonów), a funkcjonowanie organizmu wynika ze zmian potencjałów elektrycznych na granicach biokomórek. Jeżeli organizmy takie

znajdą się w zasięgu pola  $E$  o zbyt dużym natężeniu, przekraczającym dopuszczalne wartości, normalne przemieszczanie się ładunków, wynikające z prawidłowego działania organizmu, może zostać zakłócone.

Obraz graficzny pola elektrycznego (rys. 1.2b) obok linii wskazujących kierunki i zwroty natężenia pola jest zazwyczaj uzupełniany liniami łączącymi punkty o jednakowych potencjałach zwanymi liniami ekwipotencjalnymi (rys. 1.5). Są to w przypadku pola  $E$  samotnego ładunku punktowego koncentryczne koła.



Rys. 1.5. Graficzny obraz pola elektrycznego samotnego ładunku dodatniego

W ogólnym przypadku natężenie pola  $E$  może mieć różne wartości w różnych częściach pola (pole nierównomierne). Wówczas średnią wartość natężenia pola  $E$  dla przedziału  $\Delta l$  można wyznaczyć jako stosunek przyrostu potencjału  $\Delta V$  do przyrostu drogi  $\Delta l$ , na której ten przyrost potencjału następuje.

$$E_{\text{sr}} = \frac{\Delta V}{\Delta l}$$

Wartość  $E$  w danym punkcie nierównomiernego pola można wyznaczyć dla  $\Delta l$  dążącego do zera. Otrzymuje się wówczas pochodną potencjału względem drogi (1.8):

$$E = \frac{dV}{dl} \quad (1.8)$$

Z zależności (1.8) wynika, że w miejscach, gdzie potencjał  $V$  w funkcji  $l$  zmienia się najszybciej, występują największe wartości natężenia pola elektrycznego.

Pole elektryczne, w którym wektor natężenia pola elektrycznego pozostaje niezmienny w czasie pod względem wartości, kierunku i zwrotu, nazywane jest polem elektrostatycznym.