

POTENCJAŁ I NAPIĘCIE

Adresatem tego tekstu, którym inaugurujemy cykl artykułów, jest czytelnik, który *podstawy elektrotechniki* – przedmiot pod tą lub podobną nazwą – nauczany w początkowych semestrach studiów inżynierskich na kierunku *elektrotechnika*, już dawno zaliczył. Omawiane wówczas definicje, prawa fizyczne, sposoby i metody pozwalające analizować i rozwiązywać problemy, przed którymi niejednokrotnie staje w swej praktyce zawodowej, już dawno mogły zostać zapomniane. W związku z tym takie repetytorium należy rozpocząć od podstawowych pojęć i definicji, na przykład od zdefiniowania pól wektorowych i skalarnych, z jakimi mamy do czynienia w świecie elektrotechniki.

Wpierw jednak trzeba ustalić, które wielkości fizyczne należą do klasy wielkości skalarnych, a które do wektorowych. Pomocny w tym będzie następujący wirtualny eksperyment myślowy, w którym wezmą udział trzej asystenci: pająk, mrówka i osa. Pająk żyje na odziedziczonej po przodkach nici pajęczej rozpiętej pomiędzy podłogą a sufitem. Nigdy nie był w okolicy końców nici – nie wie nic o podłodze ani o suficie. Jego świat jest jednowymiarowy. Mrówka żyje na podłodze dużej i pustej hali; nie wie nic na temat ograniczeń jej świata, czyli ścian – jej świat jest płaski, dwuwymiarowy. Osa lata gdzie chce – żyje w świecie trójwymiarowym.

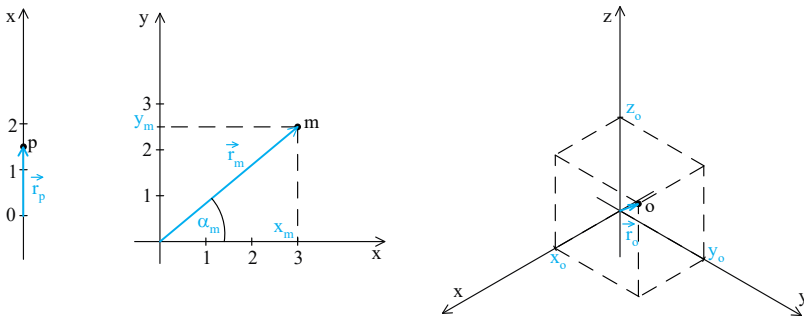
W ramach naszego eksperymentu zapytajmy wszystkich trzech asystentów na przykład o temperaturę, jaka obecnie jest w ich świecie. Jeśli tylko zrozumieją nasze pytanie, będą mieli odpowiednie przyrządy pomiarowe oraz będą chcieli i mogli udzielić nam odpowiedzi, to od każdego z nich otrzymamy odpowiedź w postaci jednej liczby. Niezależnie od wymiaru świata. Podobnie jest, gdy nasze pytanie dotyczyć będzie czasu trwania dowolnego zjawiska, np. emisji sygnału dźwiękowego, wartości napięcia elektrycznego, natężenia prądu. Podobnie również byłoby, gdybyśmy zapytali o drogę pokonaną na wczorajszym spacerze. Wszystkie tego typu wielkości fizyczne określa jednoznacznie jedna liczba, najczęściej z odpowiednią jednostką (wymiarem). Jest tak dlatego, bo wielkości te, to właśnie wielkości skalarne.

Jeśli wśród czytelników powstało w tym momencie oburzenie, dotyczące zakwalifikowania przeze mnie drogi pokonanej przez poruszający się obiekt,

do skalarów, to niech przemyślą następujący problem: stoję na jednym końcu korytarza, który ma długość 20 m. W pewnej chwili, w celu rozruszania stawów, ruszam wolnym krokiem wzdłuż korytarza na jego drugi koniec, po czym wracam na poprzednie miejsce. Pokonałem drogę $2 \cdot 20 = 40$ m. Podobnej odpowiedzi, w postaci jednej liczby, spodziewać się możemy od wszystkich trzech naszych asystentów. Niezależnie od tego, w ilowymiarowym świecie oni funkcjonują.

Jak to się ma do tego, co mówią nam nauczyciele na lekcjach fizyki w szkole? Otóż jeśli naprawdę mówią, że droga jest wektorem, a prędkość jest pochodną drogi względem czasu, to myślą pojęcia. Wektorem jest bowiem nie droga, lecz położenie, jak również zmiana położenia czyli przemieszczenie itp. Droga to długość linii, po której obiekt się porusza, a więc dla każdego z naszych asystentów, określona jest jedną liczbą. Droga to wielkość skalarna.

Wróćmy jednak do naszego eksperymentu myślowego. Zapytajmy naszych asystentów właśnie o położenie. W celu określenia przez nich tej wielkości fizycznej, jakże podstawowej w mechanice i jej działach (statyce, kinematyce, dynamice), powinniśmy umówić się z nimi wcześniej co do układów współrzędnych, w których będą określać wielkości zaliczane przez nas do wektorowych. Ilustruje to przykładowy rys. 1.



Rys. 1. Układy współrzędnych: jednowymiarowy, dwuwymiarowy i trójwymiarowy

Pająk, w odpowiedzi na nasze pytanie o położenie, odpowie jedną liczbą ($x_p = 1,5$ jednostki metryczne) i dokładnie będziemy wiedzieli, gdzie on się znajduje. Jego świat jest bowiem jednowymiarowy.

Od mrówki spodziewamy się w odpowiedzi dwóch liczb. Może ona to zrobić na kilka sposobów w tym samym, dwuwymiarowym układzie współrzędnych. Najczęściej stosowane sposoby to określenie:

- współrzędnych kartezjańskich x_m oraz y_m punktu, w którym się znajduje,
- współrzędnych biegunowych r_m oraz α_m tego punktu.

Pomiędzy wartościami współrzędnych kartezjańskich i biegunowych są oczywiste relacje:

$$\left. \begin{array}{l} x_m = r_m \cos(\alpha_m) \\ y_m = r_m \sin(\alpha_m) \end{array} \right\} \Leftrightarrow \begin{cases} r_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2} \\ \operatorname{tg}(\alpha_m) = \frac{y_m}{x_m} \end{cases} \quad (1)$$

Podobnie jest z innymi wielkościami fizycznymi, takimi jak prędkość, przyspieszenie, siła, natężenie pola elektrycznego, indukcja magnetyczna, gęstość prądu elektrycznego itp. Gdyby mrówka nieopatrznie, na pytanie o prędkość z jaką się porusza, odpowiedziała np. 3 cm/s, nie byłaby to odpowiedź pełna; 3 cm/s to zaledwie wartość prędkości czyli szybkość. A w którą stronę mrówka biegnie, czyli jaki kąt kierunkowy ma ta prędkość? Gdyby uzupełniła odpowiedź podając wartość kąta kierunkowego, np. 60° , to wiedzielibyśmy o jej prędkości wszystko. Oczywiście mogłaby określić swoją prędkość podając dwie składowe prędkości, np. $v_x = 1,5$ cm/s oraz $v_y = 2,6$ cm/s. Taka odpowiedź w świecie dwuwymiarowym określa prędkość w zupełności.

W trójwymiarowym świecie osy określenie wielkości wektorowej wymaga podania trzech wartości. Najłatwiej zrobić to można w układzie kartezjańskim (x, y, z) . Innymi stosowanymi często układami współrzędnych są: układ biegunowy (r, φ, z) oraz układ sferyczny (R, φ, Θ) . W układach tych:

- kąt φ – kąt horyzontalny, odmierzany od dodatniego kierunku osi x w stronę przeciwną do ruchu wskazówek zegara, podobnie jak kąt α w dwuwymiarowym układzie biegunowym $\varphi \in \langle -\pi, \pi \rangle$,
- kąt Θ – kąt wertykalny, odmierzany od dodatniego kierunku osi z w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny xy $\Theta \in \langle 0, \pi \rangle$.

Teraz, gdy już podział na wielkości fizyczne skalarne i wektorowe jest oczywisty, zdefiniować można pojęcia pola skalarnego i pola wektorowego.

Polem skalarnym nazywać będziemy taką cechę (właściwość) przestrzeni, w każdym punkcie której, jest określona jakaś fizyczna wielkość skalarna. Na przykład pole potencjału elektrycznego V , pole temperatury T itp.

Pole wektorowe, to oczywiście taka właściwość przestrzeni, która objawia się tym, że w każdym jej punkcie jest określona pewna wielkość fizyczna wektorowa. Takim polem jest na przykład pole elektryczne, w którym wielkością wektorową, określoną w każdym punkcie rozważanej przestrzeni, jest natężenie pola elektrycznego \vec{E} . Można postawić pytanie: jak stwierdzić, że w określonej przestrzeni jest pole elektryczne? Odpowiedź jest prosta: gdy w jakimkolwiek punkcie tej przestrzeni umieścimy ładunek elektryczny q

i stwierdzimy, że działa na niego siła \vec{F} , to natężenie pola elektrycznego w tym punkcie będzie określone wzorem:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (2)$$

Skalarne pole potencjału elektrycznego V z wektorowym polem natężenia pola elektrycznego \vec{E} jest powiązane zależnością różniczkową

$$\vec{E} = -\text{grad}(V) = -\frac{dV}{d\vec{r}}. \quad (3)$$

Gradient potencjału (pochodna po wektorze położenia), występujący w powyższym wyrażeniu oznacza, że składowymi wektora natężenia pola elektrycznego w układzie kartezjańskim, są pochodne cząstkowe potencjału względem współrzędnych przestrzennych układu, wzięte z przeciwnym znakiem, np.

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}. \quad (4)$$

Oznacza to również, że naładowana ładunkiem elektrycznym bryła materiału przewodzącego (metal) w stanie ustalonym jest ekwipotencjalna. Zapewnia to, że w każdym punkcie wewnątrz bryły, wszystkie składowe wektora natężenia pola elektrycznego, mają wartości zerowe. Gdyby tak nie było, to niezerowe natężenie pola działałoby na ładunki rozmieszczone wewnątrz metalu siłami, które wprawiałyby te ładunki w ruch, wywołując przepływ prądu elektrycznego. Taką sytuację nie można by uważać jako stan ustalony.

Na zakończenie pierwszego powtórkowego spotkania z podstawami elektrotechniki warto spróbować jeszcze zdefiniować potencjał elektryczny. Okazuje się, że nie jest to proste; potencjał elektryczny jest bowiem słabo zdefiniowany w teorii pola elektrycznego. Świadczyć o tym może również wzór (3) przytoczony wyżej. Jeżeli jakakolwiek funkcja definiowana jest przez swoją pochodną, to zawsze tak jest. Przecież gdyby we wzorze (3) gradient operował nie na V , tylko na sumę $V + V_0$, gdzie V_0 miałyby w każdym punkcie pola taką samą wartość, natężenie pola określone wzorem (3) byłoby identyczne (pochodna stałej jest równa zeru). Dlatego mówi się, że potencjał elektryczny zdefiniowany jest z dokładnością do stałej.

Mówiąc inaczej, nie można określić wartości potencjału w dowolnym punkcie pola elektrycznego dopóty, dopóki nie założy się w jakimkolwiek innym (bądź tym samym) punkcie, uznanym za punkt odniesienia, potencjału odniesienia. Precyzyjnie zdefiniowano w teorii pola napięcie elektryczne, czyli różnicę potencjałów. Jest to stosunek pracy, jaką trzeba wykonać prze-

mieszczając w polu elektrycznym ładunek próbny pomiędzy dwoma punktami przestrzeni, do wartości przemieszczanego ładunku:

$$U_{AB} = V_A - V_B = \frac{1}{q} W_{B \rightarrow A}. \quad (5)$$

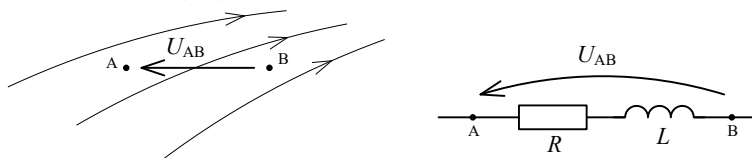
Jeśli umówimy się, że punkt B będzie punktem odniesienia, a wartość potencjału odniesienia będzie zerowa, to w ten sposób otrzymamy definicję potencjału w punkcie A.

Tak właśnie jest w przypadku, gdy pole elektryczne tworzy pojedynczy, odosobniony ładunek punktowy Q . Punktem odniesienia jest punkt leżący w nieskończoności, gdzie przyjmuje się zerową wartość potencjału odniesieniowego. Praca, którą należałoby wykonać przenosząc ładunek próbny q z nieskończoności w pobliże ładunku będącego źródłem pola, podzielona przez wartość ładunku próbnego, będzie potencjałem pola w rozważanym punkcie:

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r}, \quad (6)$$

gdzie r jest odległością punktu, w którym jest ładunek źródłowy, do punktu, w którym obliczamy potencjał.

W celu uniknięcia nieporozumień zarówno przy analizie pola elektrycznego, jak również w schematach obwodów elektrycznych, napięcie między dwoma punktami (np. A i B) oznacza się strzałką. Powinna ona mieć jeden grot, wskazujący punkt o umownie wyższym potencjale. Potencjał tego punktu jest odjemną¹ w różnicy (5), definiującej to napięcie. W przypadku dwuliterowego indeksowania napięć, pierwszym indeksem jest właśnie nazwa punktu wskazywanego grotem strzałki napięciowej.



Rys. 2. Strzałkowanie i dwuliterowe indeksowanie napięcia w polu elektrycznym (po lewej) i na schemacie obwodu elektrycznego (po prawej)

Jeżeli w wyniku przeprowadzonej analizy teoretycznej czy wykonanych pomiarów, okaże się, że $U_{AB} < 0$, będzie to oznaczać, że rysując a priori strzałkę, sądziliśmy, że $V_A > V_B$, w rzeczywistości zaś jest na odwrót. Nie jest to jednak żaden błąd, bo napięcie, jako wielkość skalarna, może mieć wartość dodatnią, bądź ujemną, a nawet równą zero.

¹ Odjemna – liczba, od której odejmujemy daną liczbę (przyp. red.).