

O potencjale uziemianych przewodników elektrycznych.

Lesław Adam Rachwał

1. Wprowadzenie

Uziemianie przewodników jest procesem łączenia ich z innymi przewodnikami o większej pojemności elektrycznej. Panuje powszechna (nie dość ścisła) opinia, że po uziemieniu potencjał elektryczny na takim przewodniku jest równy zeru. A przecież w ogólności to nieprawda - potencjał elektrostatyczny wyznaczony jest z dokładnością do stałej i wybór jego normowania w wielu zagadnieniach jest ważnym problemem. Aby przybliżyć tematykę związaną z procesem uziemiania można najpierw rozwiązać takie oto proste zadanie:

2. Zadanie

Przewodnik o pojemności C_1 naładowany ładunkiem Q_1 został połączony z drugim nienaładowanym przewodnikiem o pojemności C_2 umieszczonym daleko od tego pierwszego. Oblicz, jaki ładunek Q_2 przepływnie na drugi przewodnik a jaki pozostanie na pierwszym Q'_1 . Co się dzieje, gdy C_2 dąży do nieskończoności?

Dane: C_1, Q_1, C_2

Szukane: $Q_2, Q'_1 = ?$

Rozwiązanie:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_1} \quad C_2 = \frac{Q_2}{V_2} \quad (\text{definicja pojemności elektrycznej})$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} \quad (\text{potencjał początkowy na pierwszym przewodniku})$$

$$C_1 = \frac{Q'_1}{V'_1} \quad (C_1 \text{ pozostaje stałe})$$

$$V'_1 = V_2 \quad (\text{warunek stanu równowagi})$$

$$Q_2 + Q'_1 = Q_1 \quad (\text{zasada zachowania ładunku})$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} \quad V'_1 = \frac{Q'_1}{C_1} \quad (\text{potencjały końcowe})$$

$$\frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q'_1}{C_1} \quad (\text{z równości potencjałów końcowych})$$

$$Q'_1 = Q_1 - Q_2 \quad \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{C_1} \quad C_1 \cdot Q_2 = C_2 \cdot (Q_1 - Q_2)$$

$$(C_1 + C_2) \cdot Q_2 = C_2 \cdot Q_1 \quad Q_2 = \frac{C_2 \cdot Q_1}{C_1 + C_2}$$

$$Q'_1 = \frac{C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_1 - C_2 \cdot Q_1}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 \cdot Q_1}{C_1 + C_2}$$

$$Q'_1 = \frac{C_1 \cdot Q_1}{C_1 + C_2} \quad Q_2 = \frac{C_2 \cdot Q_1}{C_1 + C_2} \quad (\text{wzory końcowe})$$

$$\lim_{C_2 \rightarrow +\infty} Q'_1 = \lim_{C_2 \rightarrow +\infty} \frac{C_1 \cdot Q_1}{C_1 + C_2} = 0$$

$$\lim_{C_2 \rightarrow +\infty} Q_2 = \lim_{C_2 \rightarrow +\infty} \frac{C_2 \cdot Q_1}{C_1 + C_2} = Q_1 \quad (\text{granice przy } C_2 \rightarrow +\infty)$$

3. Historyczne uzasadnienie nazwy uziemienie

Właśnie przypadek, gdy $C_2 \rightarrow +\infty$ znany jest pod nazwą efektu uziemienia. Polega on na całkowitym zabraniu ładunku swobodnego znajdującego się na uziemianym przewodniku - przeniesieniu na przewodnik o większej pojemności. Nazwa "uziemienie" wzięła się stąd, że pojemność C_2 (oznaczenia jak w powyższym zadaniu) dla kuli ziemskiej jest równa $C_2 = 4\pi\epsilon_0 R_Z$, gdzie R_Z jest promieniem Ziemi ($R_Z = 6380 \text{ km} = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$) a ϵ_0 przenikalnością elektryczną próżni ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$). Po krótkich rachunkach dostaje się wartość liczbową $C_2 = 709 \text{ }\mu\text{F}$ (w układzie SI). W porównaniu z pojemnością normalnych, makroskopowych przewodników zachodzi związek $C \ll C_2$, więc zjawisko uziemienia jest wtedy dobrze widoczne (ładunek nadmiarowy prawie w całości przepływa na Ziemię). W początkach nauki o elektryczności właśnie Ziemia była przewodnikiem o dużej, znanej pojemności i to jej używano do "zabierania" ładunków elektrycznych. W wielu opisach eksperymentów z elektryczności przewodniki uziemiało się poprzez łączenie ich z kaloryferem, czy instalacją wodociągową, tak aby ładunek "schodził do gruntu". Obecnie w laboratorium fizycznym przy pokazach z elektrostatyki, do uziemiania przewodników stosuje się specjalne urządzenia elektroniczne, które zapewniają łatwy odpływ ładunku.

4. Definicja uziemienia

Uziemienie danego przewodnika polega na takim połączeniu go z innym przewodnikiem, że cały ładunek pierwszego przewodnika (swobodny czy nadmiarowy) odpłynie. Teoretycznie pojemność drugiego przewodnika powinna być nieskończona, ale dobry efekt "spłynięcia ładunku" uzyskuje się po połączeniu z przewodnikiem o dużo większej pojemności w porównaniu z pojem-

nością elektryczną przewodnika uziemianego ($C_2 \gg C_1$). Taka jest właśnie poprawna fizycznie definicja procesu uziemiania przewodników.

5. Względność pojemności elektrycznej przewodników

Oczywiście pojęcie pojemności elektrycznej przewodnika też jest względne, bo we wzorze definicyjnym $C =_{\text{df}} \frac{Q}{V}$ za V można przyjąć potencjał względem dowolnego punktu pola. Tutaj tak wybieramy ten punkt normowania, aby pojemność uziemianego przewodnika była skończona niezerowa, a uziemiającego dążyła do nieskończoności. Standardowo pojemność elektryczna przewodników jest odnoszona do punktu w nieskończoności.

6. Uziemiający przewodnik dostatecznie daleko

Aby uziemienie było dobre i nasz model prawdziwie opisywał ten proces fizyczny drugi przewodnik powinien być w tak dużej odległości (teoretycznie nieskończonej), aby na nim nie indukowały się ładunki z powodu oddziaływań elektrycznych z ładunkami na pierwszym przewodniku. Realizuje się to, umieszczając drugi przewodnik dostatecznie daleko albo zwiększając odpowiednio jego rozmiary. Oczywiście, w przypadku z Ziemią, jej rozmiary w porównaniu z rozmiarami makroskopowych przewodników są o wiele większe, tak że o ładunkach wyindukowanych na jej powierzchni możemy zapomnieć - zresztą nie wpływają one znacząco na jej potencjał z uwagi na dużą pojemność kuli ziemskiej traktowanej tu jako doskonały przewodnik.

7. Zabieranie ładunku nadmiarowego

Gdy uziemiaamy naładowany przewodnik, który nie znajduje się w zewnętrznym polu elektrycznym o natężeniu \vec{E} , to cały jego ładunek odpłynie na uziemienie. Gdy wstawiamy nienaładowany przewodnik do zewnętrznego pola elektrostatycznego, to ładunki na nim się przemieszczają, dopóki ich rozkład nie będzie taki, że pole wypadkowe \vec{E}_{wyp} będzie równe zeru wewnątrz przewodnika. Do powstania takiego rozkładu potrzebny jest podział ładunku przewodnika (na indukowany i nadmiarowy) zgodnie z zależnością $0 = q_{\text{ind}} + q_{\text{dod}}$, bo tylko q_{ind} wytwarza kompensujące pole. Gdy wstawiamy przewodnik naładowany ładunkiem q , to ładunek indukowany q_{ind} jest taki sam, ale ten nadmiarowy powiększa się wg wzoru $q_{\text{dod}} = -q_{\text{ind}} + q$. Ten dodatkowy ładunek q_{dod} jest swobodny i może zostać łatwo zabrany podczas uziemienia, którego celem jest właśnie odbieranie takich nadmiarowych ładunków, które nie są związane. Analiza takich przypadków uziemiania jest potrzebna, np. w problemach ładunku punktowego i kulistego uziemionego przewodnika.

8. Potencjał taki jak w nieskończoności

Potencjał na każdym przewodniku jest wszędzie taki sam (w każdym

miejscu). Łącząc więc pewien przewodnik z drugim, który jest w nieskończoności, doprowadzamy do osiągnięcia stanu równowagi, w którym potencjały elektryczne na obu przewodnikach są równe potencjałowi w nieskończoności $V_{+\infty}$. Tak jest przy uziemieniu całkowitym, gdy $C_2 \rightarrow +\infty$. Ponieważ zazwyczaj w nieskończoności normujemy potencjał do zera, to mamy też, że i na tych przewodnikach potencjał jest równy zeru. Oczywiście jest to prawdziwe tylko przy takim szczególnym wyborze cechowania, gdy potencjał normowany jest w nieskończonej odległości od przewodnika i nie ma rozkładów ładunku, które by się do nieskończoności rozciągały. Potencjał jest tu wyznaczony z dokładnością do stałej addytywnej, o czym się w tym częstym stwierdzeniu dotyczącym uziemienia zapomina. Uziemienie nie polega więc na nadaniu zerowego potencjału, lecz na zrównaniu go z potencjałem przewodnika uziemiającego znajdującego się w nieskończoności.

9. Różne potencjały w nieskończoności

Tutaj też się możemy spotkać z pewną nieścisłością, ponieważ potencjał w różnych "częściach" nieskończoności może być inny. Standardowym przykładem takiego dziwnego zachowania się tej wielkości jest przykład dwóch nieskończonych płaszczyzn naładowanych różnoimiennie z jednorodną gęstością powierzchniową σ odległych od siebie o skończone d . Wtedy inny jest potencjał w $+\infty$ i $-\infty$ (dokładnie ich różnica jest równa $\Delta V = V_{+\infty} - V_{-\infty} = \frac{\sigma d}{\epsilon_0}$, czyli $V_{+\infty} \neq V_{-\infty}$). Niepoprawne staje się wówczas stwierdzenie, że potencjał uziemianego przewodnika jest taki sam, jak w nieskończoności (bo której?) i trzeba się odwoływać do czysto fizycznej interpretacji zjawiska uziemienia. Proces uziemienia nie powinien zależeć od tego, w której "części" nieskończoności znajduje się przewodnik uziemiający.

10. Przewodnik uziemiający w innym wymiarze

Przewodnik uziemiający musi być w dużej odległości od pierwszego, aby rozkład jego ładunku nie wpływał na proces uziemiania. Ponadto musi mieć o wiele większą pojemność elektryczną mierzoną względem tego samego punktu niż pojemność pierwszego przewodnika. Ale oprócz tych warunków ważne jest też to, aby nasz przewodnik uziemiający nie był poddany działaniu pola, w którym jest przewodnik uziemiany, gdyż mogłoby to doprowadzić do stanu równowagi, w jakim to z uziemienia odpływałyby ładunki, tak aby cały układ dwóch przewodników (uziemiałego i uziemiającego) miał zerowe wewnętrzne pole elektryczne. Czasami przydaje się więc hipotetyczne umiejscowienie uziemienia w innym dodatkowym wymiarze, aby pole 3-wymiarowe na nie nie działało. Ten wybieg musi być zrealizowany np., gdy rozpatrujemy teoretycznie uziemianie w polu pochodzącym od jednorodnie naładowanej płaszczyzny i ładunku punktowego leżącego na niej. Takie pole nie

dąży do zera dla nieskończonej odległości od płaszczyzny; żeby skutecznie uziemiać potrzebujemy zerowego pola działającego na przewodnik uziemiający, które możemy znaleźć w innym dodatkowym wymiarze przestrzennym. Jednak w realnym świecie fizycznym nie spotykamy pól rozciągających się do nieskończoności, tzn. takich, których granica natężenia tam jest niezerowa, więc zawsze możemy znaleźć miejsce w przestrzeni (dostatecznie daleko), w którym umieścimy nasze uziemienie.

11. Fizyczny mechanizm procesu uziemienia

Fizyczna interpretacja procesu uziemienia jest następująca: jest to proces, w wyniku którego z przewodnika zabierane są wszystkie ładunki swobodne (czyli niezwiązane siłami elektrycznymi, dodatkowe). W przypadku przewodników metalicznych występuje ruch elektronów (przepływ prądu elektrycznego), aż do osiągnięcia równości potencjałów obu przewodników. Sam proces przepływu podobny jest do ruchu ładunków między dwoma kondensatorami - nie jest to już proces czysto elektrostatyczny, ani nawet przepływ prądu stałego. Ten dynamiczny układ przewodników można opisywać za pomocą stałej relaksacji obwodu: $\tau = CR$. Tutaj C oznacza pojemność elektryczną układu przewodników, a R to opór elektryczny drutu łączącego oba przewodniki. Im mniejszy jest opór R przewodnika łączącego, tym proces uziemienia przebiega szybciej, dlatego też, aby sprawnie przeprowadzić uziemienie owe przewodniki łączymy za pomocą grubego przewodzącego drutu, który na podstawie II prawa Ohma ma właśnie mały opór elektryczny R . Nie ma znaczenia, czy najpierw uziemy, a potem wstawimy do pola, czy na odwrót - stan końcowy uziemionego przewodnika opisuje teoria elektrostatyki tak samo. Przewodnik uziemiający charakteryzuje się nieskończonym zasobem nośników ładunku, które może przyjmować i oddawać w dowolnych ilościach. Wiąże się to oczywiście z jego nieskończoną pojemnością elektryczną. Przewodnik uziemiony (bez nadmiarowego ładunku elektrycznego) nie będzie oddziaływał w żaden sposób na ładunki próbne umieszczone w polu: ładunki wyindukowane służą tylko do zapewnienia $\vec{E} = 0$ w obszarze przewodnika, a nadmiarowe, które mogłyby oddziaływać zostały zabrane właśnie w trakcie procesu uziemiania.

12. Uziemienie w gospodarstwie domowym

W gospodarstwie domowym często spotykamy się z urządzeniami AGD i RTV, które są uziemione. Rozpoznajemy, to po tym iż, ich wtyczki składają się z trzech bolców. Dwa odpowiedzialne są za przekazywanie napięcia zasilania, a ten trzeci odpowiada właśnie za uziemienie. Powinien on być połączony z ogólną instalacją uziemieniową budynku, a później docelowo z Ziemią. Ponieważ obudowy urządzeń domowych są najczęściej wykonane

z materiałów sztucznych (dielektryki), to zachodzi niebezpieczeństwo przedostania się ładunków elektrycznych z wnętrza urządzenia na jego obudowę. Właśnie, aby zapewnić bezpieczeństwo, uziemia się te elementy, aby taki ładunek na obudowę nie mógł przepłynąć za sprawą ewentualnego przebicia instalacji elektrycznej wewnątrz urządzenia. Ponieważ dielektryk z trudem oddaje ładunek, a napięcia sieci są względnie duże, to do takiej sytuacji nie można dopuścić (gdyż mogłoby to doprowadzić do porażenia prądem człowieka dotykającego taką obudowę - sam stałby się przewodnikiem uziemiającym !). Dlatego też teraz powszechnie stosuje się urządzenia zawierające podłączenie do uziemienia całej instalacji elektrycznej i o takim połączeniu nie należy zapominać.

13. Podsumowanie

Uziemianie przewodników jest więc prostym procesem, którego skutek opisujemy prawami elektrostatyki. Całkowite uziemienie naładowanego przewodnika następuje wtedy, gdy cały jego nadmiarowy ładunek zostanie mu zabrany i nie będzie on już oddziaływał elektrostatycznie, nie oznacza to wyzerowania potencjału, lecz zrównania go z potencjałem uziemiającego przewodnika (np. Ziemi). W tym celu łączy się go zazwyczaj z przewodnikiem o dużo większej pojemności elektrycznej (z dużym zasobem nośników ładunku) (ilościowo proces ten jest rozważany w powyższym zadaniu) odpowiednio oddalonego i niepoddanego działaniu pól zewnętrznych. Zjawisko uziemiania powszechnie wykorzystujemy, aby zwiększać bezpieczeństwo pracy urządzeń domowych (AGD, RTV, sprzęt komputerowy). Potencjał, jaki ustali się po dojściu do stanu równowagi jest zazwyczaj taki sam jak w nieskończoności $V \rightarrow +\infty$ i stąd, że tam zwykle przyjmuje się iż $V_{+\infty} = 0$ (normuje się potencjał), pochodzi nie dość ścisła opinia, że w ten sposób wyzerowujemy potencjał elektryczny uziemianego przewodnika, a cały proces jest jak widać trochę bardziej złożony.