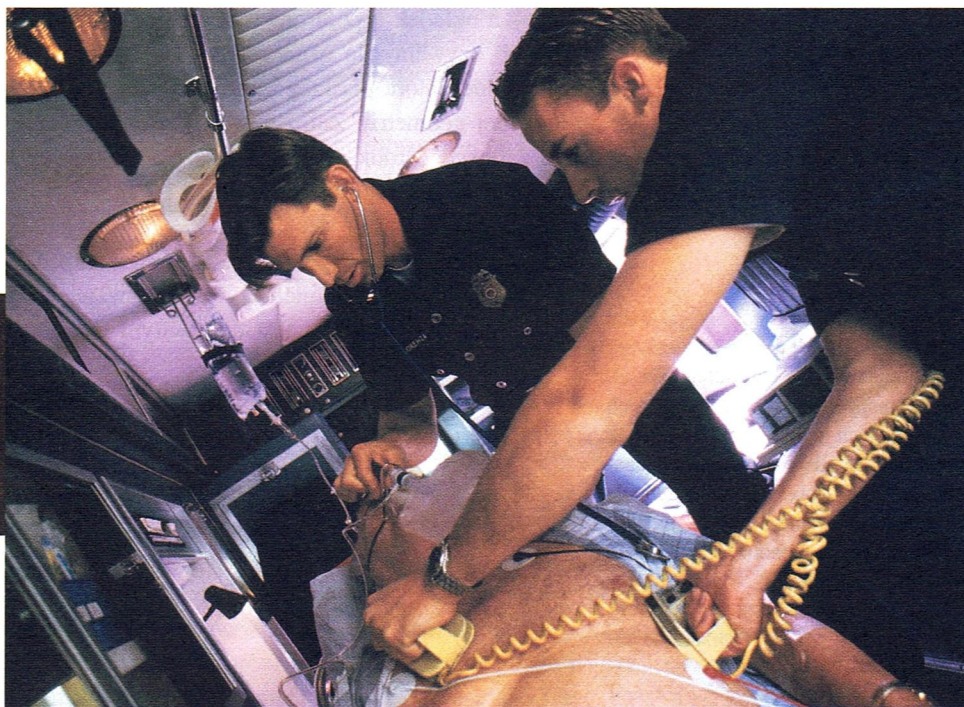


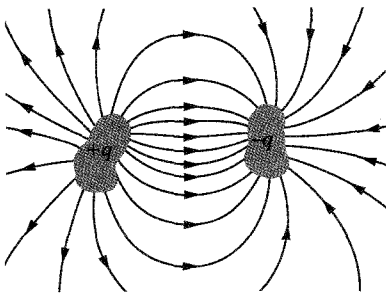
26 Pojemność elektryczna

Przy migotaniu (fibrylacji) komór serca, częściej postaci ataku serca, komory zaprzestają pompowania krwi, ponieważ ich włókna mięśniowe kurczą się i rozluźniają przypadkowo. Ratowanie ofiary migotania komór wymaga poddania mięśnia sercowego wstrząsowi, w celu przywrócenia mu normalnego rytmu. W tym celu przez klatkę piersiową trzeba przepuścić prąd o natężeniu 20 A, aby przekazać energię elektryczną 200 J w ciągu około 2 ms. Wymaga to mocy elektrycznej około 100 kW. Takie wymaganie można łatwo spełnić w szpitalu, ale nie na przykład przy zasilaniu elektrycznym w karetce pogotowia, przyjeżdżającej na ratunek choremu.

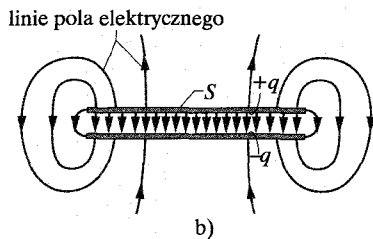
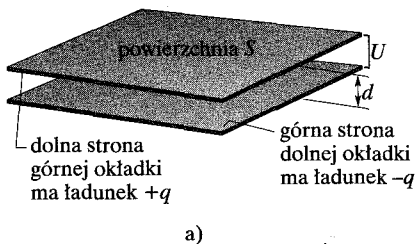
Jak można więc uzyskać moc konieczną do defibrylacji poza szpitalem?

Odpowiedź znajdziesz w tym rozdziale.





Rys. 26.1. Dwa przewodniki, odizolowane elektrycznie od siebie i od otoczenia, tworzą *kondensator*. Jeśli kondensator jest naładowany, to przewodniki, zwane *okładkami* mają ładunki o takich samych wartościach q , ale o przeciwnych znakach



Rys. 26.2. a) Kondensator płaski składa się z dwóch okładek o polu powierzchni S , znajdujących się w odległości d . Okładki mają na swych wewnętrznych powierzchniach ładunki o takich samych wartościach q , ale o przeciwnych znakach. b) Linie pola pokazują, że pole elektryczne wytworzone przez naładowane okładki jest jednorodne w środkowym obszarze między okładkami. Jak widać z wygięcia linii pola przy krawędziach okładek, pole w pobliżu nich jest niejednorodne

26.1. Zastosowanie kondensatorów

Energię możemy magazynować w postaci energii potencjalnej przez: rozciąganie ciężwy łuku, ściskanie sprężyny, sprężanie gazu lub podnoszenie w górę książki. Można także magazynować energię w postaci energii potencjalnej w polu elektrycznym i właśnie do tego celu służy **kondensator**.

Kondensator znajduje się np. w lampie błyskowej, zasilanej z przenośnego źródła. W przerwach między błyskami kondensator dość powoli gromadzi ładunek, wytwarzając coraz silniejsze pole elektryczne. Pole to i związana z nim energia jest utrzymywana do chwili, gdy zostaje nagle uwolniona, wyzwalając błysk.

W dzisiejszej dobie elektroniki i mikroelektroniki kondensatory mają wiele innych zastosowań niż magazynowanie energii potencjalnej. Są one na przykład istotnymi elementami w obwodach, które służą do dostrajania nadawczej i odbiorczej aparatury radiowej i telewizyjnej. Mikroskopijne kondensatory tworzą pamięci komputerów. Te bardzo małe urządzenia są wtedy ważne nie ze względu na zmagazynowaną w nich energię, ale ze względu na informację binarną, jakiej dostarcza obecność lub brak pola elektrycznego.

26.2. Pojemność elektryczna

Na rysunku 26.1 przedstawiono podstawowe elementy kondensatora — dwa odosobnione przewodniki dowolnego kształtu. Przewodniki te bez względu na ich kształt, ich płaskość lub zakrzywienie, nazywamy *okładkami*.

Na rysunku 26.2a przedstawiono mniej ogólny, ale bardzo typowy układ, zwany *kondensatorem płaskim*, który składa się z dwóch równoległych, przewodzących okładek o polu powierzchni S umieszczonych w odległości d . Symbol, jakiego używamy do oznaczenia kondensatora ($\text{—}| \text{—}$) wzorowany jest na budowie kondensatora płaskiego, lecz stosujemy go do oznaczania kondensatorów o dowolnej geometrii. Założymy na razie, że w obszarze między okładkami nie ma żadnego ośrodka materialnego (np. szkła czy plastiku). W paragrafie 26.6 zrezygnujemy z tego ograniczenia.

Gdy kondensator jest *naładowany*, jego okładki, mają ładunki $+q$ i $-q$ o jednakowych wartościach, lecz przeciwnych znakach. Będziemy jednak przez *ładunek kondensatora* rozumieli q , czyli bezwzględną wartość ładunków na okładkach. (Zauważ, że q nie jest całkowitym ładunkiem na kondensatorze, bo taki wynosi zero).

Okładki są przewodnikami, a więc są powierzchniami ekwipotencjalnymi: wszystkie punkty na okładce mają ten sam potencjał elektryczny. Co więcej, istnieje różnica potencjałów między dwiema okładkami. Odtąd bezwzględną wartość tej różnicy będziemy oznaczać przez U , a nie przez ΔV , jak to robiliśmy dotychczas.

Ładunek q i różnica potencjałów U (zwana *napięciem*) dla kondensatora są do siebie proporcjonalne, czyli:

$$q = CU. \quad (26.1)$$

Stałą proporcjonalności C nazywamy **pojemnością** kondensatora. Jej wartość zależy tylko od geometrii okładek, a *nie* od ich ładunku, czy różnicy potencjałów. Pojemność jest miarą ilości ładunku, jaki należy umieścić na okładkach, aby wytworzyć pewną różnicę potencjałów między nimi: *im większa jest pojemność, tym więcej potrzeba ładunku*.

Jednostką pojemności w układzie SI, wynikającą ze wzoru (26.1), jest kulomb na volt. Jednostka ta pojawia się tak często, że nadano jej specjalną nazwę *farad* (F):

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ F} = 1 \text{ kulomb na volt} = 1 \text{ C/V.} \quad (26.2)$$

Jak się przekonasz, farad jest bardzo dużą jednostką. W praktyce bardziej wygodnymi jednostkami są podwielokrotności farada, jak na przykład mikrofarad ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$) lub pikofarad ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$).

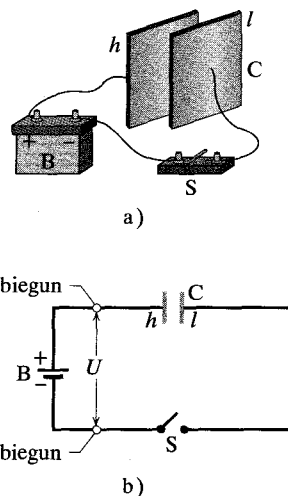
Ładowanie kondensatora

Jedną z metod ładowania kondensatora jest umieszczenie go w obwodzie elektrycznym, zawierającym źródło prądu. *Obwód elektryczny* stanowi drogę, wzdłuż której może przepływać ładunek. *Źródło prądu* jest urządzeniem, które utrzymuje stałą różnicę potencjałów między *biegunami* źródła (punktami, przez które ładunek może wpływać do źródła lub z niego wypływać); zwykle w tym celu wykorzystuje się wewnętrzne reakcje elektrochemiczne, w których siły elektryczne mogą przesuwać wewnętrzne ładunki.

Na rysunku 26.3a obwód tworzą: źródło B, klucz S, nienaładowany kondensator C i przewody łączące te elementy. Ten sam obwód jest przedstawiony na *schemacie* na rysunku 26.3b, gdzie źródło, klucz i kondensator zostały zastąpione symbolami. Źródło utrzymuje różnicę potencjałów U między swymi biegunami. Biegun o wyższym potencjale jest oznaczany znakiem $+$ i zwykle bywa nazywany biegunem *dodatnim*; biegun o niższym potencjale jest oznaczany znakiem $-$ i zwykle bywa nazywany biegunem *ujemnym*.

Obwód, przedstawiony na rysunkach 26.3a i b nazywamy *otwartym*, bo klucz S jest *otwarty*, czyli nie łączy elektrycznie przewodów do niego przyłączonych. Jeśli klucz zostanie *zamknięty*, łącząc elektrycznie te przewody, to obwód zostaje zamknięty i ładunek może przepływać przez klucz i przewody. Jak mówiliśmy w rozdziale 22, przepływ ładunku przez przewodnik metaliczny polega na przepływie elektronów. Gdy obwód z rysunku 26.3 zostanie zamknięty, pole elektryczne, wytworzone w przewodach przez źródło przesuwa elektrony wzdłuż przewodów. W szczególności elektrony z okładki h kondensatora są przesuwane przez pole do dodatniego bieguna źródła i stąd okładka h , tracąc elektrony, staje się naładowana dodatnio. Pole przesuwa także dokładnie tyle samo elektronów z bieguna ujemnego źródła na okładkę l kondensatora i stąd okładka l , gromadząc elektrony, staje się naładowana ujemnie w *takim samym stopniu*, jak okładka h (tracąc elektrony) staje się naładowana dodatnio.

Początkowo, gdy okładki były nienaładowane, różnica potencjałów między nimi wynosiła zero. W miarę, jak okładki są przeciwnie ładowane, różnica potencjałów wzrasta, aż osiągnie wartość różnicy potencjałów U między biegunami źródła. Wtedy okładka h i dodatni biegun źródła mają taki sam potencjał i nie



Rys. 26.3. a) Źródło B, klucz S oraz okładki h i l kondensatora C tworzą po połączeniu obwód. b) Schemat z elementami obwodu przedstawionymi za pomocą ich symboli

ma pola elektrycznego w przewodzie między nimi. Podobnie, okładka l i ujemny biegun źródła mają taki sam potencjał i nie ma pola elektrycznego w przewodzie między nimi. Przy zerowym natężeniu pola nie ma więc dalszego przepływu elektronów. Mówimy, że kondensator jest wtedy *całkowicie naładowany* i ma różnicę potencjałów U oraz ładunek q , które powiązane są wzorem (26.1).

W tej książce zakładamy, że zarówno podczas ładowania kondensatora, jak i potem ładunek nie może przesunąć się z jednej okładki na drugą przez odstęp między nimi. Będziemy także zakładać, że kondensator może zachować (czy *zmagazynować*) ładunek nieskończenie długo, chyba że zostanie umieszczony w obwodzie, w którym może zostać *rozładowany*.



SPRAWDZIAN 1: Czy pojemność C kondensatora wzrasta, maleje, czy pozostaje taka sama: a) jeśli ładunek q wzrośnie dwukrotnie, b) jeśli różnica potencjałów U wzrośnie trzykrotnie?

Sztuka rozwiązywania zadań

Porada 1: Potencjał V i różnica potencjałów U

W poprzednich rozdziałach symbol V oznaczał potencjał elektryczny w punkcie lub na powierzchni ekwipotencjalnej. W zagadnieniach dotyczących urządzeń elektrycznych U oznacza *różnicę potencjałów (napięcie)* między dwoma punktami lub dwiema powierzchniami ekwipotencjalnymi. Wzór (26.1) stanowi przykład takiego właśnie sposobu użycia tego symbolu. W paragrafie 26.3 spotkamy się z obydwoma oznaczeniami. Tam i w następnych rozdziałach trzeba zwracać uwagę na znaczenie tych symboli.

W tej książce i w innych miejscach można spotkać wiele zwrotów, dotyczących różnicy potencjałów. Różnicę potencjałów, a także „potencjał” lub „napięcie”, można *przyłożyć* do urządzenia lub mogą one występować *na* urządzeniu. Kondensator może być naładowany do różnicy potencjałów, na przykład „kondensator jest naładowany do 12 V.” Także źródło prądu może być scharakteryzowane przez różnicę potencjałów wytwarzaną przez źródło, na przykład „bateria 12-woltowa”. Trzeba zawsze pamiętać, co oznaczają takie zwroty: istnieje różnica potencjałów między dwoma punktami, takimi jak dwa punkty w obwodzie, czy na biegunach urządzenia, na przykład źródła prądu.

26.3. Obliczanie pojemności elektrycznej

Będziemy teraz obliczać pojemności kondensatorów, znając ich geometrię. Rozważymy różne rodzaje kondensatorów, a więc sensowne jest przedstawienie ogólnego schematu pracy. Nasz plan jest następujący: 1) przyjmujemy, że na okładkach znajduje się ładunek q , 2) obliczamy odpowiadające temu ładunkowi natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$ między okładkami, korzystając z prawa Gaussa, 3) znając $\vec{E}$, obliczamy różnicę potencjałów U między okładkami ze wzoru (25.18), 4) obliczamy C ze wzoru (26.1).

Na początek, przez poczynienie pewnych założeń możemy uprościć obliczenie zarówno natężenia pola elektrycznego, jak i różnicy potencjałów. Przedyskutujemy po kolei obliczanie każdej z tych wielkości.

Obliczanie natężenia pola elektrycznego

Do powiązania natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ między okładkami kondensatora z ładunkiem q na każdej z okładek, będziemy stosować prawo Gaussa

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = q, \quad (26.3)$$

gdzie q jest ładunkiem, obejmowanym przez powierzchnię Gaussa, a $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S}$ jest wypadkowym strumieniem elektrycznym przez tę powierzchnię. We wszystkich rozważanych przez nas przypadkach powierzchnia Gaussa będzie taka, że jeśli przechodzi przez nią strumień elektryczny, to natężenie $\vec{E}$ ma na niej jednakową wartość i wektory $\vec{E}$ oraz $d\vec{S}$ są równoległe. Wzór (26.3) przyjmuje wtedy prostszą postać:

$$q = \varepsilon_0 E S \quad (\text{szczególny przypadek wzoru (26.3)}), \quad (26.4)$$

gdzie S jest polem tej części powierzchni Gaussa, przez którą przenika strumień. Dla wygody będziemy zawsze rysować powierzchnię Gaussa w ten sposób, aby obejmowała całkowicie ładunek na dodatniej okładce (zob. np. rys. 26.4).

Obliczanie różnicy potencjałów

W oznaczeniach z rozdziału 25 (wzór (25.18)) różnica potencjałów między okładkami kondensatora jest związana z natężeniem pola elektrycznego $\vec{E}$ wzorem:

$$V_{\text{końc}} - V_{\text{pocz}} = - \int_{\text{pocz}}^{\text{końc}} \vec{E} \cdot d\vec{s}, \quad (26.5)$$

gdzie całkę należy obliczyć po dowolnym torze, który zaczyna się na jednej okładce i kończy na drugiej. Będziemy zawsze wybierać tor wzdłuż linii pola elektrycznego, od okładki ujemnej do dodatniej. Dla takiego toru wektory $\vec{E}$ i $d\vec{s}$ będą miały przeciwne kierunki i iloczyn skalarny $\vec{E} \cdot d\vec{s}$ będzie równy $-Eds$. Prawa strona wzoru (26.5) będzie więc dodatnia. Oznaczając przez U różnicę $V_{\text{końc}} - V_{\text{pocz}}$, wzór (26.5) możemy zapisać w postaci:

$$U = \int_{-}^{+} E ds \quad (\text{szczególny przypadek wzoru (26.5)}), \quad (26.6)$$

gdzie $-$ i $+$ przypominają nam, że nasz tor całkowania zaczyna się na okładce ujemnej i kończy na okładce dodatniej.

Jesteśmy teraz gotowi zastosować wzory (26.4) i (26.6) do pewnych szczególnych przypadków.

Kondensator płaski

Założymy, zgodnie z rysunkiem 26.4, że okładki naszego kondensatora płaskiego są tak duże i umieszczone tak blisko siebie, że możemy zaniedbać zakrzywienie linii pola przy krawędziach okładek i traktować natężenie $\vec{E}$ jako stałe w całym obszarze między okładkami.

Narysujemy powierzchnię Gaussa, obejmującą ładunek q na okładce dodatniej (rys. 26.4). Ze wzoru (26.4) wynika wtedy wyrażenie:

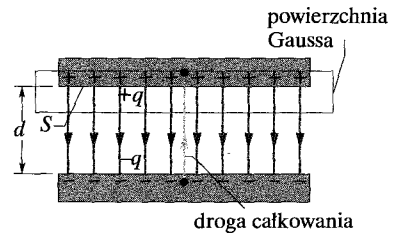
$$q = \varepsilon_0 E S, \quad (26.7)$$

gdzie S jest polem powierzchni okładki.

Wzór (26.6) przyjmuje postać:

$$U = \int_{-}^{+} E ds = E \int_0^d ds = Ed. \quad (26.8)$$

We wzorze (26.8) natężenie E można wyłączyć przed całkę, bo jest stałe; druga całka jest równa po prostu odległości d między okładkami.



Rys. 26.4. Naładowany kondensator płaski. Powierzchnia Gaussa obejmuje ładunek na okładce dodatniej. Całkowanie we wzorze (26.6) wykonujemy wzdłuż odcinka, od okładki ujemnej do okładki dodatniej

Jeśli teraz podstawimy q ze wzoru (26.7) i U ze wzoru (26.8) do związku $q = CU$ (wzór (26.1)), to otrzymamy:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (\text{kondensator płaski}). \quad (26.9)$$

Widzisz, że pojemność rzeczywiście zależy tylko od wielkości geometrycznych, a mianowicie pola powierzchni okładki S i odległości d między okładkami. Zauważ, że C wzrasta, jeśli zwiększamy pole powierzchni okładki S lub zmniejszamy odległość d .

Przy okazji podkreślmy, że wzór (26.9) wskazuje jeden z powodów zapisania stałej elektrostatycznej w prawie Coulomba w postaci $1/(4\pi\epsilon_0)$. Jeśli tego nie zrobilibyśmy, to wzór (26.9), który przez inżynierów jest częściej używany niż prawo Coulomba, nie miałby tak prostej postaci. Zauważ dalej, że wzór (26.9) pozwala wyrazić przenikalność ϵ_0 w jednostkach bardziej przydatnych do zagadnień, związanych z kondensatorami, a mianowicie:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} = 8,85 \text{ pF/m}. \quad (26.10)$$

Poprzednio tę stałą wyrażaliśmy w innych jednostkach:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2). \quad (26.11)$$

Kondensator walcowy

Na rysunku 26.5 przedstawiono w przekroju kondensator walcowy o długości L , zbudowany z dwóch współosiowych powierzchni walcowych, o promieniach a i b . Założymy, że $L \gg b$, co pozwoli nam zaniedbać zakrzywienie linii pola przy końcach powierzchni walcowych. Każda z okładek zawiera ładunek o wartości q . Jako powierzchnię Gaussa wybieramy powierzchnię walca (zamkniętego denkami) o długości L i promieniu r (rys. 26.5). Ze wzoru (26.4) mamy wtedy:

$$q = \epsilon_0 ES = \epsilon_0 E(2\pi r L),$$

gdzie $2\pi r L$ jest polem zakrzywionej części powierzchni Gaussa. Strumień elektryczny przez denka jest równy zeru. Wyznaczając stąd E , otrzymujemy:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L r}. \quad (26.12)$$

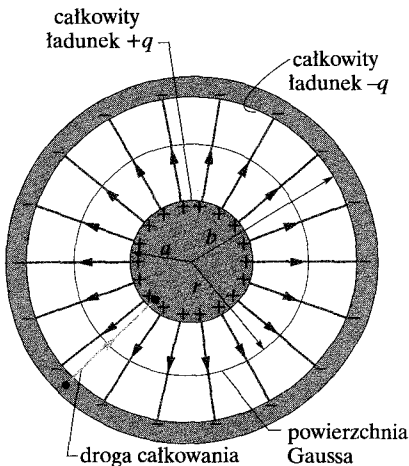
Podstawiając ten wynik do wzoru (26.6), mamy:

$$U = \int_{-}^{+} E ds = -\frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \int_b^a \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} \ln\left(\frac{b}{a}\right), \quad (26.13)$$

gdzie zastosowaliśmy równość $ds = -dr$ (całowaliśmy w kierunku malejącego r). Ze związku $C = q/U$ otrzymujemy ostatecznie:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)} \quad (\text{kondensator walcowy}). \quad (26.14)$$

Widzisz, że pojemność kondensatora walcowego, podobnie jak kondensatora płaskiego, zależy tylko od wielkości geometrycznych, w tym przypadku od L , b i a .



Rys. 26.5. Przekrój długiego kondensatora walcowego, pokazujący walcową powierzchnię Gaussa o promieniu r (obejmującą dodatnią okładkę) i radialną drogę całkowania, wzdłuż której całkujemy według wzoru (26.6). Rysunek może także służyć jako ilustracja kondensatora kulistego w przekroju

Kondensator kulisty

Rysunek 26.6 może także ilustrować przekrój przez środek kondensatora, złożonego z dwóch współśrodkowych powłok sferycznych o promieniach a i b . Jako powierzchnię Gaussa wybieramy sferę o promieniu r , współśrodkową z dwiema powłokami i wtedy ze wzoru (26.4) mamy:

$$q = \varepsilon_0 E S = \varepsilon_0 E (4\pi r^2),$$

gdzie $4\pi r^2$ jest polem sferycznej powierzchni Gaussa. Wyznaczając z tego wzoru E , otrzymujemy:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}, \quad (26.15)$$

w czym rozpoznajemy wyrażenie na natężenie pola elektrycznego, wytworzonego przez ładunek o rozkładzie sferycznym (wzór (24.15)).

Jeśli podstawimy to wyrażenie do wzoru (26.6), otrzymamy:

$$U = \int_{-}^{+} E ds = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \int_b^a \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \frac{b-a}{ab}, \quad (26.16)$$

gdzie znów podstawiliśmy $-dr$ zamiast ds . Jeśli teraz wstawimy wzór (26.16) do wzoru (26.1) i obliczymy C , to otrzymamy:

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \frac{ab}{b-a} \quad (\text{kondensator kulisty}). \quad (26.17)$$

Izolowana kula

Pojemność możemy też przypisać *pojedynczej* izolowanej kuli (lub sferze) przewodzącej, o promieniu R , zakładając, że druga okładka kondensatora jest sferą przewodzącą o nieskończonym promieniu. Linie pola, opuszczające powierzchnię dodatnio naładowanego izolowanego przewodnika muszą się przecieć gdzieś kończyć; ściany pokoju, w którym znajduje się przewodnik, mogą efektywnie służyć za naszą sferę o nieskończonym promieniu.

W celu obliczenia pojemności izolowanego przewodnika, napiszemy najpierw wzór (26.17) w postaci:

$$C = 4\pi\varepsilon_0 \frac{a}{1 - a/b}.$$

Jeśli następnie przejdziemy z $b \rightarrow \infty$ i podstawimy R za a , to otrzymamy:

$$C = 4\pi\varepsilon_0 R \quad (\text{izolowana kula}). \quad (26.18)$$

Zauważ, że zarówno ten wzór, jak i inne wyprowadzone tu wzory na pojemność (wzory (26.9), (26.14) i (26.17)) zawierają stałą ε_0 , pomnożoną przez wielkość o wymiarze długości.

SPRAWDZIAN 2: Czy ładunek zmagazynowany na kondensatorach naładowanych przez to samo źródło wzrasta, maleje czy pozostaje taki sam w każdej z następujących sytuacji: a) odległość między okładkami kondensatora płaskiego wzrasta, b) promień wewnętrznej powierzchni walcowej kondensatora walcowego wzrasta, c) promień zewnętrznej powłoki sferycznej kondensatora kulistego wzrasta?

Przykład 26.1

Kondensator w układzie pamięci o swobodnym dostępie (RAM) ma pojemność 55 fF. Jeśli kondensator jest naładowany do różnicy potencjałów 5,3 V, to ile nadmiarowych elektronów znajduje się na jego ujemnej okładce?

ROZWIĄZANIE:

➡ 1. Liczbę n nadmiarowych elektronów na ujemnej okładce możemy wyznaczyć, jeśli znamy całkowity ładunek nadmiarowy q na tej okładce. Wtedy $n = q/e$, gdzie e jest wartością ładunku każdego elektronu.

➡ 2. Ładunek q jest związany z różnicą potencjałów U , do której jest naładowany kondensator, wzorem (26.1) ($q = CU$). Łącząc te dwa spostrzeżenia, otrzymujemy:

$$n = \frac{q}{e} = \frac{CU}{e} = \frac{(55 \cdot 10^{-15} \text{ F})(5,3 \text{ V})}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ elektronów.} \quad (\text{odpowiedź})$$

Jest to bardzo mała liczba elektronów. Małeńki pyłek kurzu zawiera około 10^{17} elektronów (i taką samą liczbę protonów).

26.4. Kondensatory połączone równolegle i szeregowo

Jeśli w obwodzie występuje układ kondensatorów, to nieraz możemy zastąpić ten układ **kondensatorem równoważnym**, czyli pojedynczym kondensatorem o takiej samej pojemności, jak cały układ. Możemy w ten sposób uprościć obwód, otrzymując prostsze rozwiązania dla nieznanymi wielkości w obwodzie. Przedyskutujemy tu dwa podstawowe układy kondensatorów, które umożliwiają takie zastąpienie.

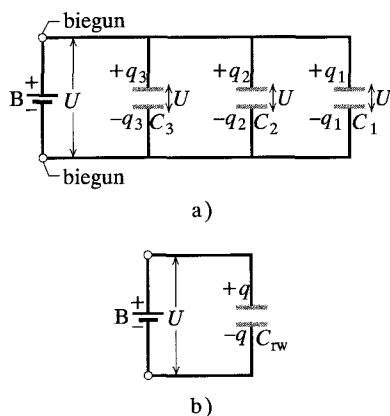
Kondensatory połączone równolegle

Na rysunku 26.6a przedstawiono obwód elektryczny, w którym trzy kondensatory są połączone **równolegle** do źródła B. Nazwa ta ma mało wspólnego z tym, jak zostały narysowane okładki kondensatorów. W rzeczywistości „równolegle” oznacza, że połączono przewodami bezpośrednio jedne okładki kondensatorów i podobnie drugie okładki, oraz że różnica potencjałów U jest przyłożona do tych dwóch połączonych przewodami okładek. Na każdym kondensatorze jest więc ta sama różnica potencjałów U , która wytwarza ładunek na kondensatorze. (Na rysunku 26.6a przyłożony potencjał jest stały, dzięki źródłu). Inaczej mówiąc:

➤ Jeśli różnica potencjałów U jest przyłożona do kilku kondensatorów połączonych równolegle, to taka sama różnica potencjałów U występuje na każdym kondensatorze. Całkowity ładunek q , zgromadzony w układzie jest sumą ładunków, zgromadzonych na poszczególnych kondensatorach.

Jeśli analizujemy obwód z kondensatorami połączonymi równolegle, to możemy go uprościć w następujący sposób:

➤ Kondensatory połączone równolegle można zastąpić równoważnym kondensatorem o takim samym **całkowitym** ładunku q i takiej samej różnicy potencjałów U , jak dla kondensatorów układu.



Rys. 26.6. a) Trzy kondensatory połączone równolegle do źródła B. Źródło zapewnia różnicę potencjałów U na swych biegunach i na **każdym** kondensatorze. b) Równoważny kondensator o pojemności C_{rw} zastępuje układ kondensatorów połączonych równolegle

Na rysunku 26.6b przedstawiono kondensator równoważny (o równoważnej pojemności C_{rw}), którym zastąpiono trzy kondensatory (o pojemnościach C_1 , C_2 i C_3) z rysunku 26.6a. Aby wyprowadzić wyrażenie na C_{rw} z rysunku 26.6b, zastosujemy najpierw wzór (26.1) w celu obliczenia ładunku na każdym z trzech kondensatorów:

$$q_1 = C_1 U, \quad q_2 = C_2 U \quad \text{ i } \quad q_3 = C_3 U.$$

Całkowity ładunek w układzie połączonych równolegle kondensatorów z rysunku 26.6a wynosi więc:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)U.$$

Równoważna pojemność o takim samym, jak w układzie całkowitym ładunku i takiej samej przyłożonej różnicy potencjałów U wynosi więc:

$$C_{rw} = \frac{q}{U} = C_1 + C_2 + C_3,$$

co możemy łatwo rozszerzyć na dowolną liczbę n kondensatorów:

$$C_{rw} = \sum_{j=1}^n C_j \quad (n \text{ kondensatorów połączonych równolegle}). \quad (26.19)$$

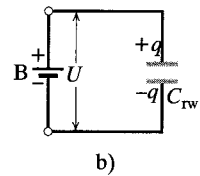
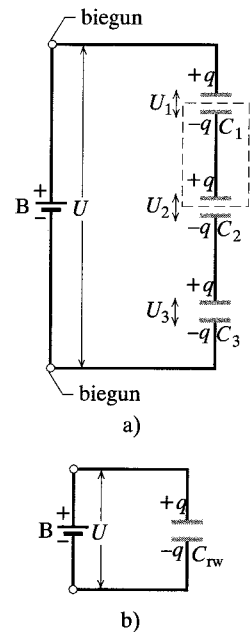
W celu obliczenia równoważnej pojemności układu kondensatorów połączonych równolegle, dodajemy więc po prostu ich pojemności.

Kondensatory połączone szeregowo

Na rysunku 26.7a przedstawiono trzy kondensatory podłączone *szeregowo* do źródła B. Nazwa ta ma mało wspólnego z tym, jak kondensatory zostały narysowane. W rzeczywistości „szeregowo” oznacza, że kondensatory są łączone ze sobą w szereg, jeden za drugim, i że różnica potencjałów U jest przyłożona do dwóch końców szeregu. (Na rysunku 26.7a ta różnica potencjałów jest utrzymywana przez źródło B). Różnice potencjałów, jakie pojawiają się na kondensatorach w szeregu, wytwarzają na nich jednakowe ładunki q .

➤ Jeśli różnica potencjałów U jest przyłożona do kilku kondensatorów połączonych szeregowo, to kondensatory mają identyczne ładunki q . Suma różnic potencjałów na wszystkich kondensatorach jest równa przyłożonej różnicy potencjałów U .

Możesz sobie wyobrazić, że kondensatory uzyskują identyczne ładunki w wyniku *ciągu* zdarzeń, w którym ładowanie każdego kondensatora powoduje ładowanie następnego. Zaczniemy od kondensatora 3 i będziemy się przesuwać do kondensatora 1. Gdy źródło zostaje podłączone do kondensatorów połączonych szeregowo, wytwarza ładunek $-q$ na dolnej okładce kondensatora 3. Ten ładunek odpycha wtedy ładunek ujemny z górnej okładki kondensatora 3 (pozostaje ładunek $+q$). Odepchnięty ładunek ujemny przesuwa się do dolnej okładki kondensatora 2 (dając jej ładunek $-q$). Ładunek na dolnej okładce kondensatora 2 odpycha wtedy ładunek ujemny z górnej okładki kondensatora 2 (zostaje ładunek $+q$) do dolnej okładki kondensatora 1 (dając jej ładunek $-q$). Na koniec ładunek na dol-



Rys. 26.7. a) Trzy kondensatory podłączone szeregowo do źródła B. Źródło zapewnia różnicę potencjałów U między najwyższą i najniższą okładką układu kondensatorów połączonych szeregowo. b) Równoważny kondensator o pojemności C_{rw} zastępuje układ kondensatorów połączonych szeregowo

nej okładce kondensatora 1 powoduje przesunięcie ujemnego ładunku z górnej okładki kondensatora 1 do źródła, pozostawiając górną okładkę z ładunkiem $+q$.

Oto dwa istotne fakty dotyczące kondensatorów połączonych szeregowo:

1. Jeśli ładunek przesuwa się z jednego kondensatora na drugi, w kondensatorach połączonych szeregowo, to może się poruszać tylko po jednej linii, takiej jak na przykład z kondensatora 3 do kondensatora 2 na rysunku 26.7a. Jeśli istnieją dodatkowe połączenia przewodzące, to kondensatory nie są połączone szeregowo (zob. przykład 26.2).
2. Źródło wytwarza bezpośrednio ładunki tylko na tych dwóch okładkach, z którymi jest połączone (na dolnej okładce kondensatora 3 i górnej okładce kondensatora 1, na rys. 26.7a). Ładunki, wytwarzane na innych okładkach powstają w wyniku przesunięć ładunków tam istniejących. Na przykład na rysunku 26.7a część obwodu otoczona linią przerywaną jest elektrycznie odizolowana od reszty obwodu. Stąd ładunek wypadkowy tej części nie może zostać zmieniony przez źródło — ładunek w tej części może mieć tylko zmieniony rozkład.

Gdy analizujemy obwód z kondensatorami połączonymi szeregowo, możemy go uprościć w następujący sposób:

► Kondensatory połączone szeregowo można zastąpić równoważnym kondensatorem, który ma taki sam ładunek q i taką samą całkowitą różnicę potencjałów U , jak kondensatory połączone szeregowo.

Na rysunku 26.7b przedstawiono równoważny kondensator (o równoważnej pojemności C_{rw}), którym zastąpiono trzy kondensatory (o pojemnościach C_1 , C_2 i C_3) z rys. 26.7a.

W celu obliczenia wyrażenia na C_{rw} z rysunku 26.7b skorzystamy najpierw ze wzoru (26.1) i znajdziemy różnicę potencjałów na każdym z kondensatorów:

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q}{C_2} \quad \text{ i } \quad U_3 = \frac{q}{C_3}.$$

Całkowita różnica potencjałów U , wytworzona przez źródło jest sumą tych trzech różnic potencjałów. Stąd:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right).$$

Równoważna pojemność wynosi więc:

$$C_{rw} = \frac{q}{U} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3},$$

czyli:

$$\frac{1}{C_{rw}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Możemy łatwo rozszerzyć ten wynik na dowolną liczbę n kondensatorów:

$$\frac{1}{C_{rw}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j} \quad (n \text{ kondensatorów połączonych szeregowo}). \quad (26.20)$$

Korzystając ze wzoru (26.20), można pokazać, że równoważna pojemność układu kondensatorów połączonych szeregowo jest zawsze *mniejsza* od najmniejszej pojemności rozważanego układu.

SPRAWDZIAN 3: Źródło o różnicy potencjałów U dostarczyło ładunek q układowi dwóch identycznych kondensatorów. Jaka jest różnica potencjałów i ładunek na każdym kondensatorze, jeśli kondensatory są połączone: a) równolegle, b) szeregowo?

Przykład 26.2

a) Oblicz równoważną pojemność dla układu kondensatorów, przedstawionego na rysunku 26.8a, do którego przyłożono różnicę potencjałów U . Przyjmij:

$$C_1 = 12 \mu\text{F}, \quad C_2 = 5,3 \mu\text{F} \quad \text{ i } \quad C_3 = 4,5 \mu\text{F}.$$

ROZWIĄZANIE:

➡ Dowolne kondensatory połączone szeregowo można zastąpić równoważnym im kondensatorem i dowolne kondensatory połączone równolegle można zastąpić równoważnym im kondensatorem. Dlatego powinniśmy najpierw sprawdzić, czy na rysunku 26.8a jakieś kondensatory są połączone równolegle lub szeregowo.

Kondensatory 1 i 3 są połączone jeden za drugim, ale czy są połączone szeregowo? Nie. Różnica potencjałów U , przyłożona do kondensatorów, wytwarza ładunek na dolnej okładce kondensatora 3. Ten ładunek powoduje przesunięcie ładunku z górnej okładki kondensatora 3. Zauważ jednak, że przesuwany ładunek może poruszać się do dolnych okładek zarówno kondensatora 1, jak i kondensatora 2. Istnieje więcej niż jedna droga dla przesuwanego ładunku, a więc kondensator 3 *nie* jest połączony szeregowo z kondensatorem 1 (czy kondensatorem 2).

Czy kondensatory 1 i 2 są połączone równolegle? Tak. Ich górne okładki są bezpośrednio połączone przewodem i ich dolne okładki są bezpośrednio połączone przewodem, a różnica potencjałów jest przyłożona między parę górnych okładek i parę dolnych okładek. Stąd kondensator 1 i kondensator 2 są połączone równolegle i ze wzoru (26.19) wynika, że równoważna pojemność C_{12} dla tej pary wynosi:

$$C_{12} = C_1 + C_2 = 12 \mu\text{F} + 5,3 \mu\text{F} = 17,3 \mu\text{F}.$$

Na rysunku 26.8b zastąpiliśmy kondensatory 1 i 2 równoważnym im kondensatorem, nazwijmy go kondensatorem 12 („jeden dwa”). (Połączenia w punktach A i B są dokładnie takie same na rysunkach 26.8a i 26.8b).

Czy kondensator 12 jest połączony szeregowo z kondensatorem 3? Stosując ponownie test dla kondensatorów połączonych szeregowo, dostrzeżesz, że ładunek przesuwany z górnej okładki kondensatora 3 musi przejść w całości na dolną okładkę kondensatora 12. Stąd kondensatory 12 i 3 są połączone szeregowo i możemy je zastąpić równoważnym im kondensatorem o pojemności C_{123} z rysunku 26.8c. Ze wzoru (26.20) otrzymujemy:

$$\frac{1}{C_{123}} = \frac{1}{C_{12}} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{17,3 \mu\text{F}} + \frac{1}{4,5 \mu\text{F}} = 0,28 \mu\text{F}^{-1},$$

skąd:

$$C_{123} = \frac{1}{0,28 \mu\text{F}^{-1}} = 3,57 \mu\text{F}. \quad (\text{odpowiedź})$$

b) Różnica potencjałów, przyłożona do zacisków wejściowych na rysunku 26.8a wynosi $U = 12,5 \text{ V}$. Jaki jest ładunek na kondensatorze 1?

ROZWIĄZANIE:

➡ 1. W celu obliczenia ładunku q_1 na kondensatorze 1 musimy teraz cofnąć się do tego kondensatora, zaczynając od kondensatora 123. Podana różnica potencjałów $U (= 12,5 \text{ V})$ jest przyłożona do układu trzech kondensatorów z rysunku 26.8a, a więc jest także przyłożona do kondensatora 123 z rysunku 26.8c. Stąd wzór (26.1) ($q = CU$) daje nam:

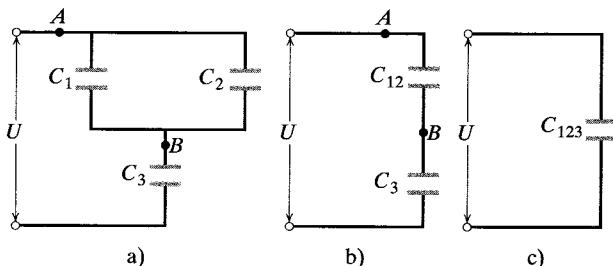
$$q_{123} = C_{123}U = (3,57 \mu\text{F}) \cdot (12,5 \text{ V}) = 44,6 \mu\text{C}.$$

➡ 2. Połączone szeregowo kondensatory 12 i 3 z rysunku 26.8b mają taki sam ładunek, jak równoważny im kondensator 123. Stąd kondensator 12 ma ładunek $q_{12} = q_{123} = 44,6 \mu\text{C}$. Ze wzoru (26.1) różnica potencjałów na kondensatorze 12 musi wynosić:

$$U_{12} = \frac{q_{12}}{C_{12}} = \frac{44,6 \mu\text{C}}{17,3 \mu\text{F}} = 2,58 \text{ V}.$$

➡ 3. Różnica potencjałów na połączonych równolegle kondensatorach 1 i 2 jest taka sama, jak na równoważnym im kondensatorze 12. Stąd różnica potencjałów na kondensatorze 1 $U_1 = U_{12} = 2,58 \text{ V}$. Ze wzoru (26.1) ładunek kondensatora 1 musi więc wynosić:

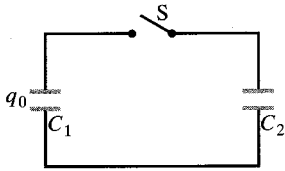
$$q_1 = C_1 U_1 = (12 \mu\text{F})(2,58 \text{ V}) = 31 \mu\text{C}. \quad (\text{odpowiedź})$$



Rys. 26.8. Przykład 26.2. a) Trzy kondensatory. b) Połączone równolegle kondensatory o pojemnościach C_1 i C_2 zastąpiono równoważnym kondensatorem o pojemności C_{12} . c) Połączone szeregowo kondensatory o pojemnościach C_{12} i C_3 zastąpiono równoważnym kondensatorem o pojemności C_{123}

Przykład 26.3

Kondensator 1 o pojemności $C_1 = 3,55 \mu\text{F}$ jest naładowany do różnicy potencjałów $U_0 = 6,3 \text{ V}$, przy użyciu źródła o takiej różnicy potencjałów. Następnie źródło zostaje odłączone, a przyłączony zostaje nienaładowany kondensator 2 o pojemności $C_2 = 8,95 \mu\text{F}$ (rys. 26.9). Gdy klucz S zostaje zamknięty, ładunek przepływa między kondensatorami tak długo, aż uzyskają one taką samą różnicę potencjałów U . Znajdź U .



Rys. 26.9. Przykład 26.3. Do kondensatora 1 przyłożono różnicę potencjałów U_0 i po naładowaniu kondensatora odłączono źródło. Następnie zamknięto klucz S i ładunek na kondensatorze 1 rozdzielił się między kondensatory 1 i 2

ROZWIĄZANIE:

Obecna sytuacja różni się od opisanej w poprzednim przykładzie tym, że układ nie zawiera źródła, które utrzymywałoby stałą różnicę potencjałów. Tuż po zamknięciu klucza różnica potencjałów przyłożona do kondensatora 2 pochodzi od kondensatora 1, a z czasem maleje. W tym przypadku nie możemy mówić ani

o szeregowym, ani o równoległym połączeniu kondensatorów, gdyż w układzie nie ma źródła.

➡ Po zamknięciu klucza początkowy ładunek q_0 na kondensatorze 1 rozdzieli się między kondensatory 1 i 2. Po osiągnięciu równowagi (gdy ładunki przestaną przepływać) na kondensatorach zgromadzą się ładunki q_1 i q_2 , które możemy związać z ładunkiem q_0 wzorem:

$$q_0 = q_1 + q_2.$$

Stosując związek $q = CU$ do każdego z członów tego wzoru, otrzymujemy:

$$C_1 U_0 = C_1 U + C_2 U,$$

skąd

$$U = U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{(6,3 \text{ V})(3,55 \mu\text{F})}{3,55 \mu\text{F} + 8,95 \mu\text{F}} = 1,79 \text{ V} \text{ (odpowiedź)}$$

Gdy różnica potencjałów na kondensatorach osiągnie tę wartość, przepływ ładunku ustanie.

✓ **SPRAWDZIAN 4:** Załóżmy w poprzednim przykładzie, że kondensator 2 został zastąpiony układem kondensatorów 3 i 4, połączonych szeregowo. a) Jaki jest związek między początkowym ładunkiem q_0 , końcowym ładunkiem q_1 na kondensatorze 1 i ładunkiem q_3 na równoważnym kondensatorze 34 po zamknięciu klucza i ustaniu przepływu ładunku? b) Czy ładunek q_3 na kondensatorze 3 jest większy, mniejszy, czy równy ładunkowi q_4 na kondensatorze 4, gdy $C_3 > C_4$?

Sztuka rozwiązywania zadań

Porada 2: Obwody z wieloma kondensatorami

Dokonajmy przeglądu metody rozwiązywania problemu z przykładu 26.2, w którym kilka kondensatorów zostało podłączonych do źródła. Aby znaleźć pojemność pojedynczego równoważnego kondensatora, upraszczamy wyjściowy układ kondensatorów, zastępując je krok po kroku równoważnymi kondensatorami i korzystając ze wzoru (26.19), gdy znajdziemy kondensatory połączone równolegle oraz wzoru (26.20), gdy znajdziemy kondensatory połączone szeregowo. Następnie w celu obliczenia ładunku zgromadzonego na tym pojedynczym równoważnym kondensatorze korzystamy ze wzoru (26.1) i różnicy potencjałów U przyłożonej ze źródła.

Ten wynik określa nam wypadkowy ładunek, zgromadzony na układzie kondensatorów. Aby jednak znaleźć ładunek czy różnicę potencjałów na określonym kondensatorze, musimy teraz zacząć rozumować odwrotnie. Przy każdym kroku powrotnym stosujemy następujące dwie reguły: gdy kondensatory są połączone równolegle, mają taką samą różnicę potencjałów, jak równoważny kondensator i możemy skorzystać ze wzoru (26.1) w celu obli-

czenia ładunku na każdym kondensatorze; gdy kondensatory są połączone szeregowo, mają taki sam ładunek, jak równoważny kondensator i możemy skorzystać ze wzoru (26.1) w celu obliczenia różnicy potencjałów na każdym kondensatorze.

Porada 3: Źródła prądu i kondensatory

Źródło prądu utrzymuje pewną różnicę potencjałów na swoich biegunach. Stąd, jeśli kondensator 1 z przykładu 26.3 zostanie podłączony do źródła o napięciu $6,3 \text{ V}$, to ładunek przepływa między kondensatorem i źródłem do momentu, aż kondensator uzyska taką samą różnicę potencjałów, jaką ma źródło.

Kondensator różni się od źródła tym, że w kondensatorze nie zachodzą reakcje elektrochemiczne potrzebne do uwolnienia cząstek naładowanych (elektronów) z atomów i cząsteczek. Stąd, gdy naładowany kondensator 1 z przykładu 26.3 zostanie odłączony od źródła i połączony z nienaładowanym kondensatorem 2 przy zamkniętym kluczu S, różnica potencjałów na kondensatorze 1 nie będzie stała. Wielkością, która *jest* zachowywana, jest ładunek q_0 układu dwóch kondensatorów, czyli zasada zachowania jest spełniona dla ładunku, a *nie* dla potencjału elektrycznego.

26.5. Energia zmagazynowana w polu elektrycznym

Aby naładować kondensator, konieczne jest wykonanie pracy przez siłę zewnętrzną. Rozpoczynając od nienaładowanego kondensatora, wyobraź sobie, że — używając „magicznych szczypcyków” — usuwamy elektrony z jednej okładki i przenosimy je, jeden po drugim, na drugą okładkę. Pole elektryczne, powstające w obszarze między okładkami ma kierunek, który przeciwdziała dalszemu przenoszeniu. W miarę, jak ładunek gromadzi się na okładkach kondensatora, musimy wykonywać coraz większą pracę przy przenoszeniu dodatkowych elektronów. W rzeczywistości praca ta jest wykonywana nie przez „magiczne szczypczyki”, lecz przez źródło, kosztem zmagazynowanej w nim energii chemicznej.

Praca wykonana przy ładowaniu kondensatora zostaje zmagazynowana w postaci **elektrycznej energii potencjalnej** E_p , w polu elektrycznym między okładkami. Możemy odzyskać tę energię przez rozładowanie kondensatora w obwodzie, podobnie jak możemy odzyskać energię potencjalną, zmagazynowaną w napiętym łuku przez zwolnienie cięciwy, aby zamienić tę energię na energię kinetyczną strzały.

Założmy, że w pewnej chwili ładunek przeniesiony z jednej płytki kondensatora na drugą wyniósł q' . Różnica potencjałów U' między okładkami była wtedy równa q'/C . Jeśli przeniesiemy następnie dodatkowy ładunek dq' , to zgodnie ze wzorem (25.7) praca przy tym wykonana wyniesie:

$$dW = U' dq' = \frac{q'}{C} dq'.$$

Praca, potrzebna do przeniesienia całkowitego ładunku q kondensatora jest równa:

$$W = \int dW = \frac{1}{C} \int_0^q q' dq' = \frac{q^2}{2C}.$$

Praca ta jest zmagazynowana jako energia potencjalna E_p w kondensatorze i stąd:

$$E_p = \frac{q^2}{2C} \quad (\text{energia potencjalna}). \quad (26.21)$$

Stosując wzór (26.1), możemy tę energię zapisać także w postaci:

$$E_p = \frac{1}{2} CU^2 \quad (\text{energia potencjalna}). \quad (26.22)$$

Wzory (26.21) i (26.22) są poprawne bez względu na geometrię kondensatora.

Aby zrozumieć, na czym polega magazynowanie energii, rozważmy dwa płaskie kondensatory, które są identyczne poza tym, że w kondensatorze 1 odległość między okładkami jest dwa razy większa niż w kondensatorze 2. Wtedy kondensator 1 ma dwa razy większą objętość obszaru między okładkami i, zgodnie ze wzorem (26.9), dwa razy mniejszą pojemność niż kondensator 2. Ze wzoru (26.4) wynika, że jeśli na obydwu kondensatorach znajdują się takie same ładunki q , to natężenia pól elektrycznych między ich okładkami są identyczne. Ze wzoru

(26.21) wynika, że energia potencjalna zmagazynowana w kondensatorze 1 jest dwa razy większa niż w kondensatorze 2. Dla dwóch prawie identycznych kondensatorów o takim samym ładunku i takim samym natężeniu pola kondensator o dwa razy większej objętości między okładkami ma więc zmagazynowaną dwa razy większą energię potencjalną. Takie argumenty potwierdzają nasze wcześniejsze założenie:

➤ Energia potencjalna naładowanego kondensatora jest zmagazynowana w polu elektrycznym między okładkami kondensatora.

Defibrylator medyczny

Zdolność kondensatora do magazynowania energii potencjalnej jest podstawą działania *defibrylatorów*, które są używane przez zespoły pogotowia ratunkowego do zatrzymania migotania komór u ofiar ataku serca. W przenośnej wersji defibrylatora bateria ładuje kondensator do dużej różnicy potencjałów, magazynując dużą ilość energii w czasie krótszym niż minuta. Bateria utrzymuje tylko małą różnicę potencjałów, lecz obwód elektroniczny, korzystając z niej cyklicznie, wytwarza na kondensatorze dużo większą różnicę potencjałów. Moc, czyli szybkość przekazu energii, jest także mała w tym procesie.

Przewodzące elektrody umieszcza się na klatce piersiowej chorego. Gdy zostanie zamknięty obwód, kondensator przekazuje porcję zmagazynowanej energii ciału chorego. Na przykład, gdy kondensator $70\text{ }\mu\text{F}$ w defibrylatorze jest naładowany do 5000 V , zgodnie ze wzorem (26.22), energia zmagazynowana w kondensatorze wynosi:

$$E_p = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}(70 \cdot 10^{-6}\text{ F})(5000\text{ V})^2 = 875\text{ J}.$$

Około 200 J tej energii jest przekazywane człowiekowi podczas impulsu trwającego około 2 ms . Moc impulsu wynosi:

$$P = \frac{E_p}{t} = \frac{200\text{ J}}{2 \cdot 10^{-3}\text{ s}} = 100\text{ kW}$$

i jest dużo większa niż moc samego źródła. Ta sama technika zastosowania kondensatora powoli ładującego się ze źródła, a następnie rozładowującego się z dużo większą mocą, jest powszechnie stosowana w fotografii błyskowej i stroboskopowej.

Gęstość energii

W płaskim kondensatorze, przy zaniedbaniu efektów brzegowych, natężenie pola elektrycznego ma taką samą wartość we wszystkich punktach między okładkami. Stąd **gęstość energii** u , czyli energia potencjalna na jednostkę objętości między okładkami, powinna także być stała. Możemy znaleźć u przez podzielenie całkowitej energii potencjalnej przez objętość Sd obszaru między okładkami. Po zastosowaniu wzoru (26.22) otrzymujemy:

$$u = \frac{E_p}{Sd} = \frac{CU^2}{2Sd}.$$

Po podstawieniu $C = \varepsilon_0 S/d$ zgodnie ze wzorem (26.9), powyższe równanie przyjmuje postać:

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left(\frac{U}{d} \right)^2.$$

Jak wynika ze wzoru (25.42) wielkość U/d jest równa wartości natężenia pola elektrycznego E , czyli:

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \quad (\text{gęstość energii}). \quad (26.23)$$

Chociaż wzór ten wyprowadziliśmy dla szczególnego przypadku kondensatora płaskiego, to jest on prawdziwy bez względu na źródło pola elektrycznego. Jeśli w jakimś punkcie przestrzeni istnieje pole elektryczne o natężeniu $\vec{E}$, to możemy z tym punktem wiązać elektryczną energię potencjalną, a jej ilość na jednostkę objętości jest dana wzorem (26.23).

Przykład 26.4

Izolowana kula przewodząca o promieniu $R = 6,85 \text{ cm}$ ma ładunek $q = 1,25 \text{ nC}$.

a) Jaka energia potencjalna jest zmagazynowana w polu elektrycznym tego naładowanego przewodnika?

ROZWIĄZANIE:

☛ Energia E_p zmagazynowana w kondensatorze zależy, zgodnie ze wzorem (26.21), od ładunku q na kondensatorze i pojemności C kondensatora. Podstawiając do wzoru (26.18) wyrażenie na C , ze wzoru (26.21) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{q^2}{2C} = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_0 R} = \frac{(1,25 \cdot 10^{-9} \text{ C})^2}{(8\pi)(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m})(0,0685 \text{ m})} \\ &= 1,03 \cdot 10^{-7} \text{ J} = 103 \text{ nJ}. \end{aligned} \quad (\text{odpowiedź})$$

b) Jaka jest gęstość energii przy powierzchni kuli?

ROZWIĄZANIE:

☛ Gęstość energii u zmagazynowanej w polu elektrycznym zależy od wartości E natężenia pola, zgodnie ze wzorem (26.23) ($u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2$), czyli musimy najpierw znaleźć E przy powierzchni kuli. Wartość ta jest dana wzorem (24.15):

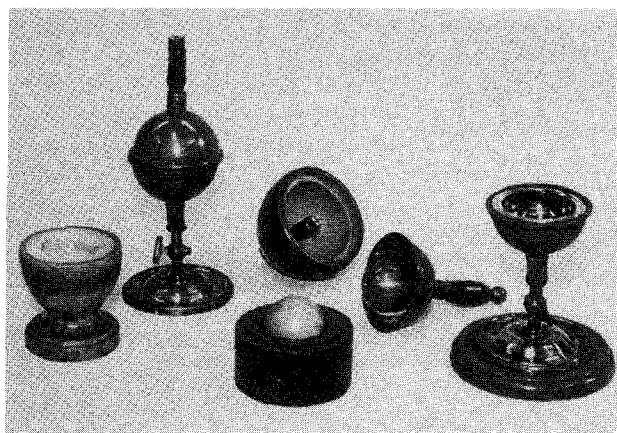
$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{R^2}.$$

Gęstość energii wynosi więc:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = \frac{q^2}{32\pi^2 \varepsilon_0 R^4} \\ &= \frac{(1,25 \cdot 10^{-9} \text{ C})^2}{(32\pi^2)(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2))(0,0685 \text{ m})^4} \\ &= 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ J/m}^3 = 25,4 \mu\text{J/m}^3. \end{aligned} \quad (\text{odpowiedź})$$

26.6. Kondensator z dielektrykiem

Co stanie się z pojemnością kondensatora, jeśli przestrzeń między jego okładkami wypełnimy *dielektrykiem*, czyli materiałem izolującym, na przykład olejem mineralnym lub plastikiem? Pierwszy przeanalizował ten problem w 1837 r. Michael Faraday, któremu w dużym stopniu zawdzięczamy pojęcie pojemności i na cześć którego jednostkę pojemności w układzie SI nazwano faradem. Korzystając z prostych przyrządów, pokazanych na rys. 26.10 odkrył on, że pojemność kondensatora *wzrasta* o czynnik liczbowy ε_r , który nazywamy **przenikalnością elektryczną względną** materiału izolującego. W tabeli 26.1 podano wartości przenikalności elektrycznych dla kilkunastu materiałów dielektrycznych. Przenikalność elektryczna próżni jest z definicji równa jedności, dla powietrza zaś



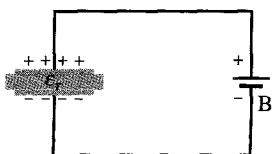
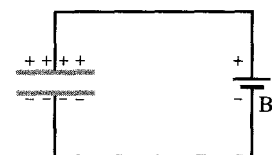
Rys. 26.10. Prosta aparatura elektrostatyczna używana przez Faradaya. Złożony przyrząd (drugi od lewej) jest sferycznym kondensatorem, składającym się z zewnętrznej miedzianej powłoki i znajdującej się wewnątrz miedzianej kuli. W przestrzeni między kulą i powłoką Faraday umieszczał materiały dielektryczne

Niektóre właściwości dielektryków^a

Materiał	Przenikalność elektryczna względna ϵ_r	Wytrzymałość na przebicie [kV/mm]
Powietrze (1 atm)	1,00054	3
Polistyren	2,6	24
Papier	3,5	16
Olej transformatorowy	4,5	
Pyreks	4,7	14
Mika	5,4	
Porcelana	6,5	
Krzem	12	
German	16	
Etanol	25	
Woda (20°C)	80,4	
Woda (25°C)	78,5	
Ceramika tytanowa	130	
Tytanian strontu	310	8

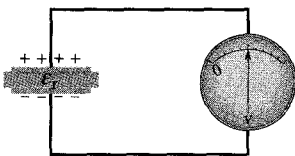
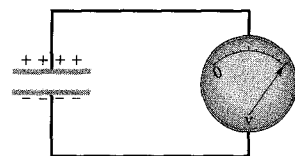
Dla próżni $\epsilon_r = 1$

^a mierzone (poza wodą) w temperaturze pokojowej.



$U = \text{const}$

a)



$q = \text{const}$

b)

(jest to głównie pusta przestrzeń) zmierzona wartość przenikalności elektrycznej względnej jest tylko nieco większa od jedności.

Inną konsekwencją wprowadzenia dielektryka jest konieczność ograniczenia różnicy potencjałów, jaka może być przyłożona do okładek, do pewnej wartości U_{max} , zwanej *napięciem przebicia*. Jeśli tę wartość istotnie przekroczymy, to nastąpi przebicie materiału dielektrycznego i między okładkami powstanie przewodząca ścieżka. Każdy materiał dielektryczny ma charakterystyczną *wytrzymałość na przebicie*, która jest maksymalną wartością natężenia pola elektrycznego, jakie dielektryk może wytrzymać bez przebicia. Kilka takich wartości podano w tabeli 26.1.

Zgodnie z dyskusją przy wzorze (26.18), pojemność dowolnego kondensatora można wyrazić wzorem:

$$C = \epsilon_0 \mathcal{L}, \quad (26.24)$$

gdzie $\mathcal{L}$ ma wymiar długości i np. $\mathcal{L} = S/d$ dla kondensatora płaskiego. Odkrycie Faradaya polegało na tym, że po całkowitym wypełnieniu dielektrykiem obszaru między okładkami kondensatora wzór (26.24) przyjmuje postać:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \mathcal{L} = \epsilon_r C_{\text{pow}}, \quad (26.25)$$

gdzie C_{pow} jest wartością pojemności dla kondensatora z powietrzem (ściślej próżnią) między okładkami.

Rys. 26.11. a) Jeśli różnica potencjałów między okładkami kondensatora jest utrzymywana, na przykład przez źródło B, to wsunięcie dielektryka zwiększa ładunek na okładkach. b) Jeśli ładunek na okładkach kondensatora jest stały (jak w tej sytuacji), to wsunięcie dielektryka zmniejsza różnicę potencjałów między okładkami. Pokazana skala jest skalą *woltomierza*, czyli przyrządu używanego do pomiaru różnicy potencjałów (w tym przypadku między okładkami). Kondensator nie może rozładować się przez woltomierz

Analiza rysunku 26.11 pozwala zrozumieć doświadczenia Faradaya. Na rysunku 26.11a bateria zapewnia stałą różnicę potencjałów U między okładkami kondensatora. Gdy między okładki włożymy płytę dielektryczną, ładunek q na okładkach zwiększy się o czynnik ε_r ; dodatkowy ładunek do okładek kondensatora zostaje dostarczony przez źródło prądu. Na rysunku 26.13b nie ma źródła i dlatego ładunek q musi pozostać stały przy wsuwaniu płyty dielektrycznej; różnica potencjałów U między okładkami maleje więc o czynnik ε_r . Obie te obserwacje są zgodne ze wzrostem pojemności, spowodowanym przez dielektryk (wiemy, że $q = CU$).

Porównanie wzorów (26.24) i (26.25) wskazuje, że wpływ dielektryka można podsumować następująco:

➤ W obszarze wypełnionym całkowicie materiałem dielektrycznym o względnej przenikalności elektrycznej ε_r wszystkie równania elektrostatyki, zawierające przenikalność elektryczną próżni ε_0 należy zmodyfikować, zastępując ε_0 przez $\varepsilon_r \varepsilon_0$.

Ładunek punktowy wewnątrz dielektryka wytwarza więc pole elektryczne, którego natężenie zgodnie z prawem Coulomba ma wartość:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0} \frac{q}{r^2}. \quad (26.26)$$

Wyrażenie na natężenie pola elektrycznego przy powierzchni izolowanego przewodnika, otoczonego dielektrykiem (zob. wzór (24.11)) wynosi wtedy:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_r\varepsilon_0}. \quad (26.27)$$

Obydwa te równania pokazują, że dla ustalonego rozkładu ładunków wpływ dielektryka polega na osłabieniu natężenia pola elektrycznego w stosunku do sytuacji bez dielektryka.

Przykład 26.5

Kondensator płaski, którego pojemność C wynosi 13,5 pF, jest naładowany przez źródło do różnicy potencjałów między okładkami $U = 12,5$ V. Po odłączeniu źródła między okładki kondensatora wsunięto porcelanową płytę ($\varepsilon_r = 6,5$). Jaka jest energia potencjalna układu kondensator–płyta przed wsunięciem płyty i po nim?

ROZWIĄZANIE:

➤ 1. Energię potencjalną E_p kondensatora możemy powiązać z pojemnością C i z różnicą potencjałów U (wzór (26.22)), albo z ładunkiem q (wzór (26.21)):

$$E_{p \text{ pocz}} = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{q^2}{2C}.$$

Znamy początkową różnicę potencjałów $U = 12,5$ V, więc ze wzoru (26.22) znajdziemy początkową energię, zmagazynowaną w kondensatorze:

$$E_{p \text{ pocz}} = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \cdot 13,5 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot (12,5 \text{ V})^2 \\ = 1,055 \cdot 10^{-9} \text{ J} = 1055 \text{ pJ} \approx 1100 \text{ pJ}. \quad (\text{odpowiedź})$$

Znajdźmy obecnie końcową energię potencjalną $E_{p \text{ końc}}$ kondensatora (po włożeniu płyty).

➤ 2. Źródło zostało odłączone, więc ładunek na kondensatorze nie może ulec zmianie przy wsuwaniu dielektryka. Zmianie ulega natomiast różnica potencjałów. Musimy więc teraz użyć wzoru (26.21) (zawierającego q), aby wypisać wzór na końcową energię potencjalną $E_{p \text{ końc}}$. Teraz w kondensatorze jest płyta, a więc jego pojemność wynosi $\varepsilon_r C$. Otrzymujemy więc:

$$E_{p \text{ końc}} = \frac{q^2}{2\varepsilon_r C} = \frac{E_{p \text{ pocz}}}{\varepsilon_r} = \frac{1055 \text{ pJ}}{6,5} = 162 \text{ pJ} \approx 160 \text{ pJ}. \quad (\text{odpowiedź})$$

Po wsunięciu płyty energia potencjalna maleje o czynnik ε_r .

Źródło „brakującej” energii jest oczywiste dla osoby, która wsuwała płytę. Kondensator wciągał lekko płytę i wykonał nad nią pracę

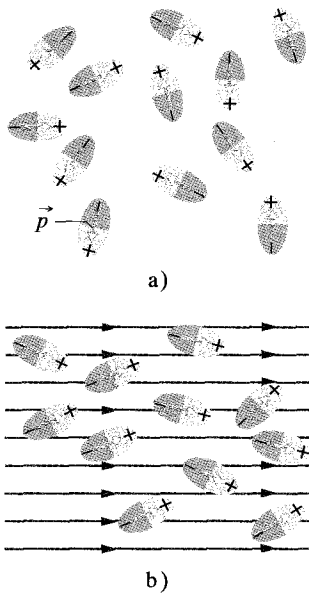
$$W = E_{p \text{ pocz}} - E_{p \text{ końc}} = (1055 - 162) \text{ pJ} = 893 \text{ pJ}.$$

Jeśli nie przytrzymamy płyty między okładkami, to płyta oscylowałaby między nimi tam i z powrotem ze stałą energią mechaniczną 893 pJ i energia ta zmieniałaby się okresowo z energii kinetycznej poruszającej się płyty, na energię potencjalną, zmagazynowaną w polu elektrycznym.

SPRAWDZIAN 5: Gdyby źródło w powyższym przykładzie było nadal podłączone, to czy: a) różnica potencjału między okładkami kondensatora, b) pojemność, c) ładunek na kondensatorze, d) energia potencjalna układu, e) natężenie pola elektrycznego między płytami wzrosłyby, zmalałyby, czy pozostałyby bez zmiany? (Wskazówka: W punkcie (e) należy zwrócić uwagę na to, że ładunek nie jest stały).

26.7. Dielektryki: obraz mikroskopowy

Co się dzieje z atomami i cząsteczkami, gdy włożymy dielektryk w pole elektryczne? Są dwie możliwości, zależnie od rodzaju cząsteczek.



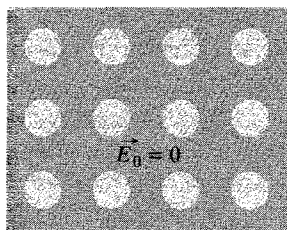
Rys. 26.12. a) Cząsteczki obdarzone elektrycznym momentem dipolowym przy braku zewnętrznego pola elektrycznego mają przypadkowe ustawienia. b) Przyłożenie pola elektrycznego prowadzi do częściowego uporządkowania dipoli. Całkowitemu uporządkowaniu przeszkadza ruch termiczny

1. **Dielektryki polarne.** Cząsteczki pewnych dielektryków, np. wody, mają trwałe elektryczne momenty dipolowe. W takich materiałach (zwanymi *dielektrykami polarnymi*) dipole elektryczne mają tendencję do ustawiania się wzdłuż zewnętrznego pola elektrycznego, jak na rysunku 26.12. Wskutek swego przypadkowego ruchu termicznego cząsteczki ciągle się potracają nawzajem, a więc uporządkowanie nie jest całkowite, ale staje się coraz pełniejsze wraz ze wzrostem wartości natężenia przyłożonego pola (lub zmniejszeniem temperatury, a stąd liczby zderzeń). Uporządkowane dipole elektryczne wytwarzają pole elektryczne o natężeniu skierowanym przeciwnie do przyłożonego pola i mniejszej wartości.
2. **Dielektryki niepolarne.** Bez względu na to, czy cząsteczki mają trwałe elektryczne momenty dipolowe, czy też nie, po umieszczeniu w zewnętrznym polu elektrycznym zyskują indukowane momenty dipolowe. W paragrafie 25.7 (zob. rys. 25.12) pokazaliśmy, że dzieje się tak, ponieważ zewnętrzne pole ma tendencję do „rozciągania” cząsteczek i przesuwania nieco środka ładunku dodatniego i ujemnego.

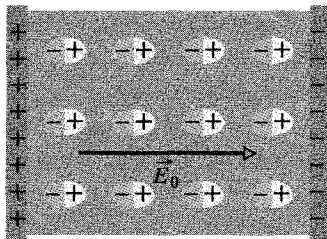
Na rysunku 26.13a przedstawiono płytę z niepolarnego dielektryka, bez zewnętrznego pola elektrycznego. Następnie przyłożono pole elektryczne o natężeniu $\vec{E}_0$, przez umieszczenie płyty w kondensatorze, którego okładki były naładowane (rys. 26.13b). W wyniku tego nastąpiło małe przesunięcie środków rozkładów dodatniego i ujemnego ładunku w płycie, co doprowadziło do pojawienia się ładunku dodatniego na jednej ścianie płyty (wskutek występowania tam dodatnich końców dipoli) i ładunku ujemnego na przeciwnej ścianie (wskutek występowania tam ujemnych końców dipoli). Płyta jako całość pozostała obojętna, a wewnątrz niej nie ma nadmiarowego ładunku w żadnym makroskopowym elemencie objętości.

Na rysunku 26.13c pokazano, że indukowane ładunki powierzchniowe na ścianach płyty wytwarzają pole elektryczne o natężeniu $\vec{E}'$, skierowanym przeciwnie do natężenia przyłożonego pola elektrycznego $\vec{E}_0$. Wypadkowe natężenie pola $\vec{E}$ wewnątrz dielektryka (suma wektorowa natężeń $\vec{E}_0$ i $\vec{E}'$) ma kierunek natężenia $\vec{E}_0$, ale ma mniejszą wartość.

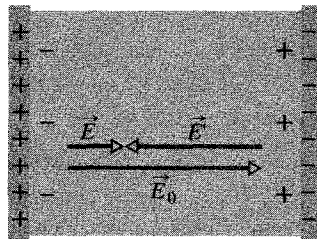
Natężenie pola $\vec{E}'$, utworzonego zarówno przez ładunki powierzchniowe na rysunku 26.13c, jak i przez trwałe dipole elektryczne z rysunku 26.12 jest tak



a)



b)



c)

Rys. 26.13. a) Płyta z niepolarnego dielektryka. Koła przedstawiają elektrycznie obojętne atomy w płycie. b) Przyłożenie pola elektrycznego przez naładowanie okładek kondensatora; pole częściowo rozciąga atomy, rozsuwając środki dodatniego i ujemnego ładunku. c) Rozsuniecie wytwarza ładunki powierzchniowe na ścianach płyty. Ładunki te wytwarzają pole o natężeniu $\vec{E}'$, które jest skierowane przeciwnie do natężenia przyłożonego pola $\vec{E}_0$. Wypadkowe natężenie pola $\vec{E}$ wewnątrz dielektryka (suma wektorowa natężeń $\vec{E}_0$ i $\vec{E}'$) ma ten sam kierunek, jak wektor $\vec{E}_0$, ale mniejszą wartość

samo skierowane — ma ono kierunek przeciwny do natężenia przyłożonego pola $\vec{E}_0$. Stąd zarówno w dielektrykach polarnych, jak i w niepolarnych natężenie dowolnego przyłożonego do nich pola ulega osłabieniu, podobnie jak między okładkami kondensatora.

Możesz teraz zrozumieć, dlaczego dielektryczna płyta porcelanowa w przykładzie 26.5 jest wciągana do kondensatora: przy wchodzeniu w obszar między okładkami, pojawiające się na każdej ścianie płyty ładunki powierzchniowe mają znak przeciwny niż ładunek na pobliskiej okładce kondensatora i dlatego płyta i okładki przyciągają się nawzajem.

26.8. Dielektryki i prawo Gaussa

W naszej dyskusji prawa Gaussa w rozdziale 24 założyliśmy, że ładunki znajdują się w próżni. Teraz zobaczysz, jak zmodyfikować i uogólnić to prawo, gdy występują materiały dielektryczne, np. podane w tabeli 26.1. Na rysunku 26.14 przedstawiono płaski kondensator z okładkami o polu powierzchni S , zarówno z dielektrykiem, jak i bez niego. Załóżmy, że ładunek q na okładkach kondensatora jest w obydwu przypadkach taki sam. Pole między okładkami indukuje ładunki na ścianach dielektryka w jeden z dwóch sposobów, opisanych w paragrafie 26.7.

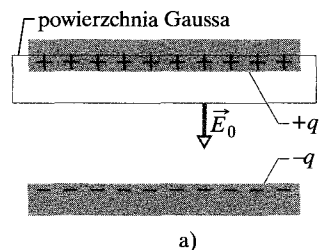
Dla przypadku przedstawionego na rys. 26.14a, czyli bez dielektryka, natężenie pola elektrycznego $\vec{E}_0$ między okładkami możemy znaleźć tak, jak zrobiliśmy to na rys. 26.5: otaczamy ładunek $+q$ na górnej okładce powierzchnią Gaussa i następnie stosujemy prawo Gaussa. Jeśli E_0 oznacza wartość natężenia pola, to

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \epsilon_0 E_0 S = q, \quad (26.28)$$

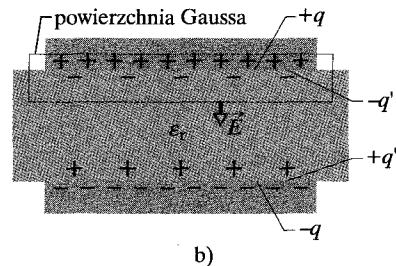
czyli

$$E_0 = \frac{q}{\epsilon_0 S}. \quad (26.29)$$

Na rysunku 26.14b, czyli z dielektrykiem między okładkami, możemy znaleźć natężenie pola elektrycznego między okładkami (czyli wewnątrz dielektryka)



a)



b)

Rys. 26.14. Kondensator płaski a) bez płyty, b) z wsuniętą płytą dielektryczną. Ładunek q na okładkach jest z założenia taki sam w obydwu przypadkach

przy zastosowaniu tej samej powierzchni Gaussa. Teraz jednak powierzchnia ta obejmuje również ładunek indukowany $-q'$ na górnej ścianie dielektryka. Ładunek na płycie przewodzącej nazywamy *ładunkiem swobodnym*, ponieważ może się on przesunąć, jeśli zmienimy potencjał elektryczny okładki; ładunek indukowany na powierzchni dielektryka nie jest swobodny, bo nie może opuścić tej powierzchni.

Całkowity ładunek, otoczony przez powierzchnię Gaussa na rysunku 26.14b wynosi $q - q'$ i prawo Gaussa daje teraz:

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \varepsilon_0 E S = q - q', \quad (26.30)$$

czyli

$$E = \frac{q - q'}{\varepsilon_0 S}. \quad (26.31)$$

Obecność dielektryka powoduje osłabienie wartości natężenia przyłożonego pola E_0 o czynnik ε_r , czyli możemy napisać

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon_r} = \frac{q}{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}. \quad (26.32)$$

Porównanie wzorów (26.31) i (26.32) pokazuje, że:

$$q - q' = \frac{q}{\varepsilon_r}. \quad (26.33)$$

Wzór (26.33) określa poprawnie, że wartość q' indukowanego ładunku powierzchniowego jest mniejsza od wartości ładunku swobodnego q i jest równa zero przy braku dielektryka (wtedy $\varepsilon_r = 1$ we wzorze (26.33)).

Po podstawieniu do wzoru (26.30) wyrażenia na $q - q'$ ze wzoru (26.33), możemy zapisać prawo Gaussa w postaci

$$\varepsilon_0 \oint \varepsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S} = q \quad (\text{prawo Gaussa w dielektryku}). \quad (26.34)$$

To ważne równanie, wyprowadzone przez nas dla płaskiego kondensatora, jest najogólniejszą postacią, w jakiej można zapisać prawo Gaussa. Zauważ, że:

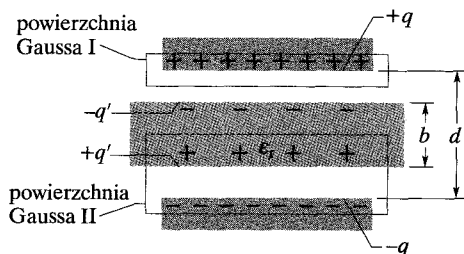
1. Całka strumienia zawiera obecnie $\varepsilon_r \vec{E}$, a nie $\vec{E}$. (Wektor $\varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$ jest nie-raz nazywany *indukcją elektryczną* $\vec{D}$ i wzór (26.34) można wtedy zapisać w postaci $\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = q$).
2. Ładunek q otoczony przez powierzchnię Gaussa jest teraz *tylko ładunkiem swobodnym*. Indukowany ładunek powierzchniowy pomijamy z prawej strony wzoru (26.34), biorąc go pod uwagę przez wprowadzenie przenikalności elektrycznej względnej ε_r z lewej strony.
3. Wzór (26.34) różni się od wzoru (24.7), naszego oryginalnego sformułowania prawa Gaussa, tylko tym, że stała ε_0 w tym ostatnim równaniu została zastąpiona przez $\varepsilon_r \varepsilon_0$. Pozostawiliśmy ε_r pod całką we wzorze (26.34), aby uwzględnić przypadki, gdy wielkość ε_r nie jest stała na całej powierzchni Gaussa.

Przykład 26.6

Na rysunku 26.15 przedstawiono kondensator płaski o polu powierzchni okładki S i odległości między okładkami d . Do okładek przyłożono różnicę potencjałów U_0 . Następnie odłączono źródło i między okładki wsunięto płytę o grubości b i przenikalności elektrycznej względnej ϵ_r , jak pokazano na rysunku. Przyjmijmy

$$S = 115 \text{ cm}^2, \quad d = 1,24 \text{ cm}, \quad U_0 = 85,5 \text{ V},$$

$$b = 0,78 \text{ cm}, \quad \epsilon_r = 2,61.$$



Rys. 26.15. Przykład 26.6. Kondensator płaski z płytą dielektryczną, która tylko częściowo wypełnia obszar między okładkami

a) Ile wynosi pojemność C_0 kondensatora przed włożeniem płyty dielektrycznej?

ROZWIĄZANIE:

Ze wzoru (26.9) mamy:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d} = \frac{(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m})(115 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2)}{1,24 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 8,21 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 8,21 \text{ pF.} \quad (\text{odpowiedź})$$

b) Jaki ładunek swobodny znajduje się na okładkach?

ROZWIĄZANIE:

Ze wzoru (26.1) mamy:

$$q = C_0 U_0 = (8,21 \cdot 10^{-12} \text{ F})(85,5 \text{ V}) = 7,02 \cdot 10^{-10} \text{ C} = 702 \text{ pC.} \quad (\text{odpowiedź})$$

Źródło zostało odłączone przed wsunięciem płyty, a więc ładunek swobodny pozostaje niezmienny przy wsuwaniu płyty.

c) Ile wynosi natężenie pola elektrycznego E_0 w szczelinach między okładkami i płytą dielektryczną?

ROZWIĄZANIE:

➔ 1. Należy zastosować prawo Gaussa w postaci wzoru (26.34) do powierzchni Gaussa I na rysunku 26.15 — powierzchnia ta przechodzi przez szczelinę i otacza *tylko* ładunek swobodny na górnej okładce kondensatora. Dla części powierzchni, od której pochodzi niezerowy wkład do całki, wektor powierzchni $d\vec{S}$

i natężenie pola $\vec{E}_0$ są obydwa skierowane w dół, a więc iloczyn skalarny we wzorze (26.34) wynosi:

$$\vec{E}_0 \cdot d\vec{S} = E_0 dS \cos 0^\circ = E_0 dS.$$

Wzór (26.34) przyjmuje postać:

$$\epsilon_0 \epsilon_r E_0 \int dS = q.$$

Całka daje nam po prostu powierzchnię S okładki i dlatego otrzymujemy

$$\epsilon_0 \epsilon_r E_0 S = q,$$

czyli:

$$E_0 = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r S}.$$

➔ 2. Aby obliczyć E_0 , musimy podstawić $\epsilon_r = 1$, ponieważ powierzchnia Gaussa I nie przechodzi przez dielektryk. Mamy stąd:

$$E_0 = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r S} = \frac{7,02 \cdot 10^{-10} \text{ C}}{(8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m})(1)(115 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2)}$$

$$= 6900 \text{ V/m} = 6,9 \text{ kV/m.} \quad (\text{odpowiedź})$$

Zauważ, że wartość E_0 nie zmienia się przy wprowadzaniu płyty, ponieważ ilość ładunku otoczonego powierzchnią Gaussa I na rysunku 26.15 się nie zmienia.

d) Ile wynosi natężenie pola elektrycznego E_1 w płycie dielektrycznej?

ROZWIĄZANIE:

➔ Należy zastosować wzór (26.34) do powierzchni Gaussa II z rysunku 26.15. Ta powierzchnia otacza ładunek swobodny $-q$ i ładunek indukowany $+q'$, ale ten ostatni pomijamy przy stosowaniu wzoru (26.34). Znajdujemy więc:

$$\oint \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\epsilon_0 \epsilon_r E_1 S = -q. \quad (26.35)$$

(Pierwszy znak minus w tym wzorze pochodzi z iloczynu skalarnego $\vec{E}_1 \cdot d\vec{S}$, ponieważ teraz natężenie pola $\vec{E}_1$ jest skierowane w dół, a wektor powierzchni $d\vec{S}$ jest skierowany do góry). Wzór (26.35) daje nam:

$$E_1 = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon_r S} = \frac{E_0}{\epsilon_r} = \frac{6,9 \text{ kV/m}}{2,61} = 2,64 \text{ kV/m.} \quad (\text{odpowiedź})$$

e) Ile wynosi różnica potencjałów U między okładkami kondensatora po wsunięciu płyty?

ROZWIĄZANIE:

➔ Należy znaleźć U przez scałkowanie natężenia wzdłuż odcinka prostej prostopadłej do okładek, od dolnej okładki do górnej okładki. W dielektryku długość odcinka prostej wynosi b

i natężenie pola jest równe E_1 . W dwóch szczelinach powyżej i poniżej dielektryka długość odcinka prostej wynosi łącznie $d-b$ i natężenie pola jest równe E_0 . Wzór (26.6) daje zatem:

$$\begin{aligned} U &= \int_{-}^{+} E ds = E_0(d-b) + E_1 b \\ &= (6900 \text{ V/m})(0,0124 \text{ m} - 0,0078 \text{ m}) \\ &\quad + (2640 \text{ V/m})(0,00780 \text{ m}) \\ &= 52,3 \text{ V}, \end{aligned} \quad (\text{odpowiedź})$$

czyli różnica potencjałów jest mniejsza od początkowej różnicy potencjałów 85,5 V.

f) Ile wynosi pojemność kondensatora z płytą dielektryczną między okładkami?

ROZWIĄZANIE:

➡ Pojemność C jest związana z ładunkiem swobodnym i różnicą potencjałów U wzorem (26.1), takim samym, jak przy braku dielektryka. Biorąc q z punktu (b) i U z punktu (e), otrzymujemy:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{7,02 \cdot 10^{-10} \text{ C}}{52,3 \text{ V}} = 1,34 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 13,4 \text{ pF}. \quad (\text{odpowiedź})$$

Pojemność kondensatora z dielektrykiem jest więc większa niż początkowa pojemność 8,21 pF.

✓ **SPRAWDZIAN 6:** Czy w opisanym wyżej przykładzie, wraz ze wzrostem grubości b płyty wzrastają, maleją, czy pozostają bez zmian: a) natężenie pola elektrycznego E_1 , b) różnica potencjałów między okładkami, c) pojemność kondensatora?

Podsumowanie

Kondensator, pojemność Kondensator składa się z dwóch odizolowanych przewodników (okładek) o ładunkach $+q$ i $-q$, o takich samych wartościach i przeciwnych znakach. Jego **pojemność** C jest zdefiniowana wzorem:

$$q = CU, \quad (26.1)$$

gdzie U jest różnicą potencjałów (napięciem) między okładkami. Jednostką pojemności w układzie SI jest farad (1 farad = 1 kulomb na volt (1 F = 1 C/V)).

Obliczanie pojemności Pojemność kondensatora o określonej konfiguracji obliczamy w następujący sposób: 1) zakładamy, że na okładkach umieszczono ładunek q , 2) znajdujemy natężenie pola elektrycznego $\vec{E}$, wytworzonego przez ten ładunek, 3) obliczamy różnicę potencjałów U , 4) wyznaczamy C ze wzoru (26.1). Oto kilka szczególnych wyników:

Kondensator płaski o płaskich równoległych okładkach, o polu powierzchni S i odległości d między nimi ma pojemność:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}. \quad (26.9)$$

Kondensator walcowy w postaci dwóch długich współosiowych powierzchni walcowych o długości L i promieniach a i b ma pojemność:

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{L}{\ln(b/a)}. \quad (26.14)$$

Kondensator kulisty o współśrodkowych sferycznych okładkach o promieniach a i b ma pojemność:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{b-a}. \quad (26.17)$$

Jeśli przyjmujemy $b \rightarrow \infty$ i $a = R$ we wzorze (26.17), to otrzymamy pojemność *izolowanej kuli* o promieniu R :

$$C = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (26.18)$$

Kondensatory połączone równolegle i szeregowo Pojemności **równoważne** C_{rw} układów kondensatorów połączonych **równolegle** i **szerelowo** można obliczyć ze wzorów:

$$C_{rw} = \sum_{j=1}^n C_j \quad (n \text{ kondensatorów połączonych równolegle}), \quad (26.19)$$

$$\frac{1}{C_{rw}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{C_j} \quad (n \text{ kondensatorów połączonych szeregowo}). \quad (26.20)$$

Pojemności równoważne można zastosować także do obliczenia pojemności przy bardziej skomplikowanych połączeniach szeregowo-równoległych.

Energia potencjalna i gęstość energii Elektryczna energia potencjalna E_p naładowanego kondensatora

$$E_p = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} CU^2 \quad (26.21, 26.22)$$

jest równa pracy, potrzebnej do jego naładowania. Energię tę można powiązać z natężeniem pola elektrycznego $\vec{E}$ w kondensatorze i wyciągnąć stąd wniosek, że energia ta jest zmagazynowana w polu elektrycznym. W próżni **gęstość energii** u , czyli energia potencjalna na jednostkę objętości, w obszarze pola elektrycznego o wartości natężenia E wynosi:

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2. \quad (26.23)$$

Kondensator z dielektrykiem Jeśli przestrzeń między okładkami kondensatora jest wypełniona całkowicie materiałem dielektrycznym, to pojemność C kondensatora jest większa o czynnik ϵ_r , zwany **przenikalnością elektryczną względną**, która charakteryzuje materiał. W obszarze całkowicie wypełnionym dielektrykiem wszystkie równania elektrostatyki, zawierające ϵ_0 muszą być zmodyfikowane przez zastąpienie ϵ_0 przez $\epsilon_r \epsilon_0$.

Effekt dodania dielektryka można zrozumieć, analizując działanie pola elektrycznego na trwałe lub indukowane dipole elektryczne w dielektryku, w wyniku czego powstają indukowane ładunki na powierzchniach dielektryka, prowadzące przy ustalonym

ładunku swobodnym na okładkach do osłabienia pola w dielektryku.

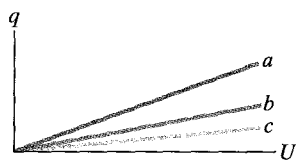
Prawo Gaussa w dielektryku Dla dielektryka prawo Gaussa można uogólnić do postaci:

$$\epsilon_0 \oint \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S} = q, \quad (26.34)$$

gdzie q jest ładunkiem swobodnym; cały indukowany ładunek powierzchniowy jest uwzględniony przez wstawienie przenikalności elektrycznej ϵ_r do całki.

Pytania

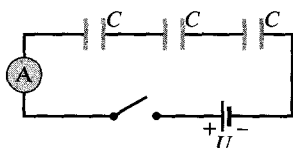
1. Na rysunku 26.16 przedstawiono wykresy ładunku w zależności od różnicy potencjałów dla trzech kondensatorów płaskich, których pola powierzchni okładek i odległości między nimi zostały podane w tabeli. Które wykresy odpowiadają którym kondensatorom?



Rys. 26.16. Pytanie 1

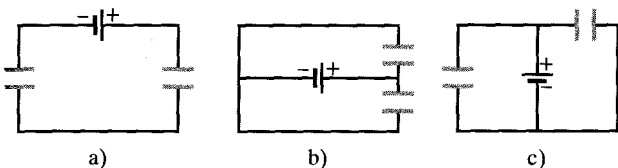
Kondensator	Pole powierzchni	Odległość
1	S	d
2	$2S$	d
3	S	$2d$

2. Na rysunku 26.17 przedstawiono obwód z otwartym kluczem, źródłem o różnicy potencjałów U , amperomierzem A i trzema takimi samymi nienaładowanymi kondensatorami o pojemności C . Jeśli zamkniemy klucz i obwód osiągnie stan równowagi, to jakie będą: a) różnica potencjałów na każdym kondensatorze, b) ładunek na lewej okładce każdego kondensatora? c) Jaki wypadkowy ładunek przepływa przez amperomierz podczas procesu ładowania?



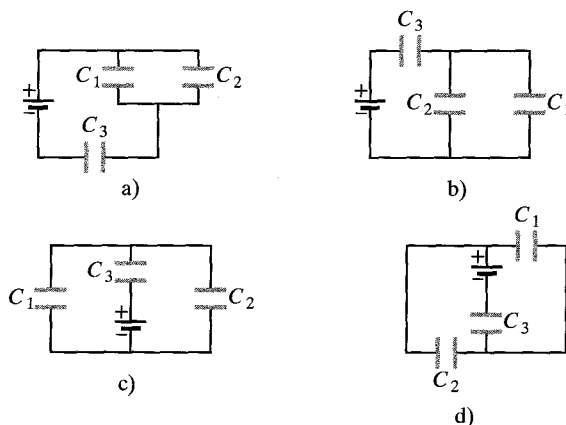
Rys. 26.17. Pytanie 2

3. Czy kondensatory w obwodach na rysunku 26.18 połączone są szeregowo, równolegle, czy w żaden z tych sposobów?



Rys. 26.18. Pytanie 3

4. a) Czy na rysunku 26.19a kondensatory C_1 i C_3 są połączone szeregowo? b) Czy kondensatory C_1 i C_2 na tym samym rysunku są połączone równolegle? c) Uszereguj pojemności równoważne czterech obwodów na rysunku 26.19, zaczynając od największej.



Rys. 26.19. Pytanie 4

5. Jaka jest pojemność równoważna dla trzech kondensatorów, każdy o pojemności C , jeśli są one połączone do źródła: a) szeregowo, b) równolegle? c) Na którym kondensatorze równoważnym jest większy ładunek?

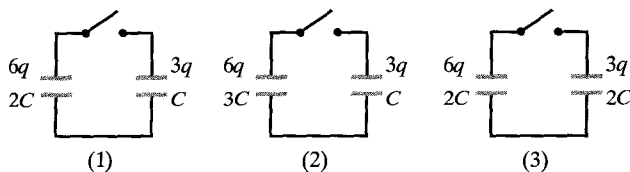
6. Do źródła podłączamy kondensatory o pojemnościach C_1 i C_2 , $C_1 > C_2$, najpierw pojedynczo, potem szeregowo i następnie równolegle. Uszereguj te układy ze względu na zmagazynowany ładunek, zaczynając od największego.

7. Początkowo do źródła podłączony jest kondensator o pojemności C_1 . Następnie zostaje dołączony kondensator o pojemności C_2 i oba kondensatory są połączone równolegle. Czy: a) różnica potencjałów na kondensatorze C_1 , b) ładunek q_1 na kondensatorze C_1 są teraz większe, mniejsze, czy takie same jak poprzednio? c) Czy pojemność równoważna C_{12} dla kondensatorów C_1 i C_2 jest większa, mniejsza czy równa pojemności C_1 ? d) Czy całkowity ładunek zgromadzony na kondensatorach C_1 i C_2 razem

jest większy, mniejszy czy równy ładunkowi zmagazynowanemu poprzednio na kondensatorze C_1 ?

8. Odpowiedz na pytania 7, jeśli kondensator C_2 dołączono szeregowo, a nie równolegle.

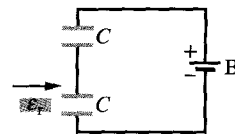
9. Na rysunku 26.20 przedstawiono trzy obwody, każdy składający się z klucza i dwóch kondensatorów, naładowanych początkowo jak na rysunku (na którym podano również ich pojemność). W którym obwodzie (może w żadnym) po zamknięciu klucza ładunek na lewym kondensatorze a) wzrośnie, b) zmaleje, c) pozostanie taki sam?



Rys. 26.20. Pytanie 9

10. Dwie odizolowane metalowe kule A i B mają odpowiednio promienie R i $2R$ i taki sam ładunek q . a) Czy pojemność kuli A jest większa, mniejsza, czy równa pojemności kuli B? b) Czy gęstość energii tuż przy powierzchni kuli A jest większa, mniejsza, czy równa gęstości przy powierzchni kuli B? c) Czy gęstość energii w odległości $3R$ od środka kuli A jest większa, mniejsza, czy równa gęstości w tej samej odległości od środka kuli B? d) Czy całkowita energia pola elektrycznego, wytworzonego przez kulę A jest większa, mniejsza, czy równa całkowitej energii dla kuli B?

11. Czy po włożeniu płyty dielektrycznej między okładki jednego z dwóch identycznych kondensatorów na rys. 26.21: a) pojemność, b) ładunek, c) różnica potencjałów, d) energia potencjalna tego kondensatora wzrosną, zmaleją, czy pozostaną takie same? e) Czy i jak zmienią się wymienione wyżej wielkości drugiego kondensatora?



Rys. 26.21. Pytanie 11

Zadania

Rozwiązanie jest dostępne na stronie internetowej podręcznika: <http://www.wiley.com/college/hrw>
Rozwiązanie jest dostępne w postaci interaktywnej, wykorzystującej oprogramowanie Interactive LearningWare (na tej samej stronie)

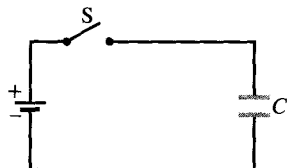
26.2. Pojemność

1. Elektrometr jest przyrządem używanym do pomiaru ładunku statycznego — nieznany ładunek umieszcza się na okładkach kondensatora elektrometru i mierzy się różnicę potencjałów. Jaki minimalny ładunek może zostać zmierzony za pomocą elektrometru z kondensatorem o pojemności 50 pF , przy czułości pomiaru napięcia $0,15 \text{ V}$?

2. Dwa metalowe przedmioty na rys. 26.22 mają wypadkowe ładunki $+70 \text{ pC}$ i -70 pC , co prowadzi do różnicy potencjałów 20 V między nimi. a) Ile wynosi pojemność układu? b) Jeśli ładunki zmienimy na $+200 \text{ pC}$ i -200 pC , to jaka będzie pojemność? c) Jaka będzie różnica potencjałów?



Rys. 26.22. Zadanie 2



Rys. 26.23. Zadanie 3

3. Kondensator na rys. 26.23 ma pojemność $25 \mu\text{F}$ i jest początkowo nienaładowany. Bateria ma różnicę potencjałów 120 V . Jaki ładunek przepłynie przez przełącznik S po jego zamknięciu?

26.3. Obliczanie pojemności

4. Jeśli wyznaczysz stałą ϵ_0 z równania (26.9), to zauważysz, że jej wymiarem jest farad na metr (F/m). Pokaż, że ta jednostka jest równoważna poprzednio otrzymanej jednostce dla ϵ_0 , a mianowicie kulombowi do kwadratu na niuton razy metr kwadrat ($\text{C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$).

5. Kondensator płaski ma kołowe okładki o promieniu $8,2 \text{ cm}$ umieszczone w odległości $1,3 \text{ mm}$. a) Oblicz jego pojemność. b) Jaki ładunek znajdzie się na okładkach, jeśli przyłożymy do nich różnicę potencjałów 120 V ?

6. Masz dwie płaskie okładki metalowe, każda o polu powierzchni 1 m^2 i chcesz zbudować z nich kondensator płaski. Jeśli pojemność kondensatora ma wynosić 1 F , to jaka musi być odległość między okładkami? Czy taki kondensator można w rzeczywistości zbudować?

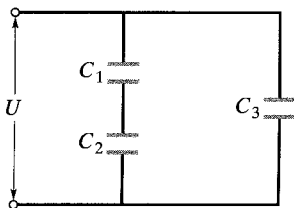
7. Kulista kropla rtęci o promieniu R ma pojemność, określoną wzorem $C = 4\pi\epsilon_0 R$. Jeśli dwie takie krople połączą się w jedną większą kroplę, to jaka będzie jej pojemność?

8. Okładki kondensatora kulistego mają promienie 38 mm i 40 mm . a) Oblicz jego pojemność. b) Jakie jest pole powierzchni okładek kondensatora płaskiego o takiej samej odległości okładek i takiej samej pojemności?

9. Załóż, że dwie powłoki sferyczne kondensatora kulistego mają w przybliżeniu jednakowe promienie. W tych warunkach urządzenie to można potraktować jako kondensator płaski, dla którego $b - a = d$. Pokaż, że wzór (26.17) rzeczywiście sprawdza się do wzoru (26.9) w tym przypadku.

26.4. Kondensatory połączone równolegle i szeregowo

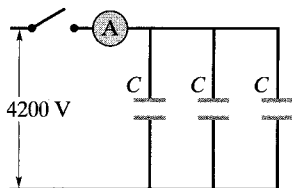
10. Znajdź pojemność równoważną układu kondensatorów, przedstawionego na rysunku 26.24. Przyjmij $C_1 = 10 \mu\text{F}$, $C_2 = 5 \mu\text{F}$ i $C_3 = 4 \mu\text{F}$.



Rys. 26.24. Zadanie 10 i 30

11. Ile kondensatorów o pojemności $1 \mu\text{F}$ trzeba połączyć równolegle, aby zmagazynować ładunek 1 C po przyłożeniu różnicy potencjałów 110 V ?

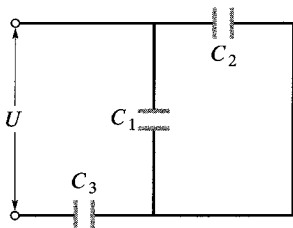
12. Każdy z nienaładowanych kondensatorów na rysunku 26.25 ma pojemność $25 \mu\text{F}$. Po zamknięciu klucza pojawiła się na nich różnica potencjałów 4200 V . Jaki ładunek przepłynął przez amperomierz A?



Rys. 26.25. Zadanie 12

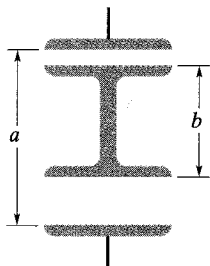
13. Znajdź równoważną pojemność układu, przedstawionego na rysunku 26.26. Przyjmij $C_1 = 10 \mu\text{F}$, $C_2 = 5 \mu\text{F}$ i $C_3 = 4 \mu\text{F}$.

14. Załóż, że w kondensatorze 3 na rysunku 26.26 następuje przebicie elektryczne, czyli pojawia się ścieżka przewodząca. Jak zmieni się: a) ładunek, b) różnica potencjałów na kondensatorze 1? Przyjmij $U = 100 \text{ V}$.



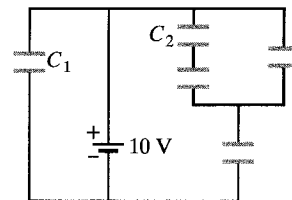
Rys. 26.26. Zadania 13, 14 i 28

15. Na rysunku 26.27 przedstawiono dwa kondensatory połączone szeregowo; część środkową o długości b można przesunąć w kierunku pionowym. Wykaż, że pojemność równoważna tego układu jest niezależna od położenia środkowej części i wynosi $C = \epsilon_0 S / (a - b)$, gdzie S jest polem powierzchni okładki.



Rys. 26.27. Zadanie 15

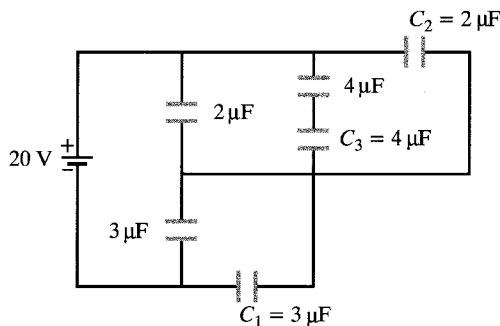
16. Na rysunku 26.28 bateria ma różnicę potencjałów 10 V , a każdy z pięciu kondensatorów ma pojemność $10 \mu\text{F}$. Jaki jest ładunek na a) kondensatorze 1, b) kondensatorze 2?



Rys. 26.28. Zadanie 16

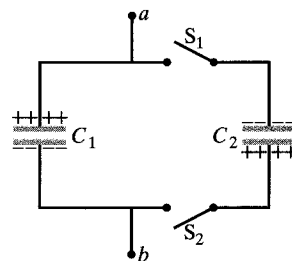
17. Kondensator o pojemności 100 pF naładowano do różnicy potencjałów 50 V , a następnie źródło odłącono. Kondensator ten połączono równolegle z drugim (początkowo nienaładowanym) kondensatorem. Jeśli różnica potencjałów na pierwszym kondensatorze zmalała do 35 V , to jaka jest pojemność drugiego kondensatora?

18. Na rysunku 26.29 bateria ma różnicę potencjałów 20 V . Znajdź: a) równoważną pojemność wszystkich kondensatorów, b) ładunek zmagazynowany na kondensatorze równoważnym. Oblicz różnicę potencjałów i ładunek na: c) kondensatorze 1, d) kondensatorze 2, e) kondensatorze 3.



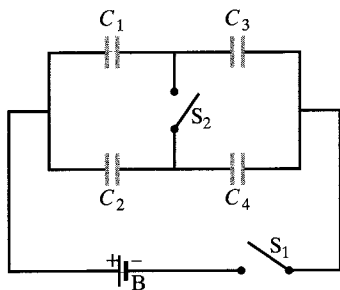
Rys. 26.29. Zadanie 18

19. Na rysunku 26.30 kondensatory o pojemnościach $C_1 = 1 \mu\text{F}$ i $C_2 = 3 \mu\text{F}$ naładowano do różnicy potencjałów o wartości $U = 100 \text{ V}$, ale przeciwnym znaku, co zaznaczono na rysunku. Następnie zamknięto klucze S_1 i S_2 . a) Jaka jest teraz różnica potencjałów między punktami a i b? Jakie są teraz ładunki na kondensatorach b) 1, c) 2?



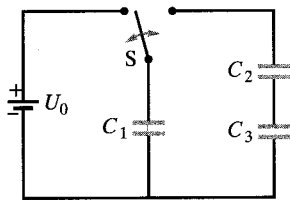
Rys. 26.30. Zadanie 19

20. Na rysunku 26.31 bateria B dostarcza różnicę potencjałów 12 V . Znajdź ładunek na każdym kondensatorze: a) po zamknięciu tylko klucza S_1 , b) po zamknięciu także klucza S_2 . Przyjmij $C_1 = 1 \mu\text{F}$, $C_2 = 2 \mu\text{F}$, $C_3 = 3 \mu\text{F}$ i $C_4 = 4 \mu\text{F}$.



Rys. 26.31. Zadanie 20

21. Gdy na rysunku 26.32 klucz S jest przesunięty na lewo, okładki kondensatora 1 uzyskują różnicę potencjałów U_0 . Kondensatory 2 i 3 są początkowo nienaładowane. Następnie klucz zostaje przesunięty w prawo. Jakie są końcowe ładunki q_1 , q_2 i q_3 na kondensatorach?



Rys. 26.32. Zadanie 21

26.5. Energia zgmagazynowana w polu elektrycznym

22. Ile energii jest zgmagazynowanej w metrze sześciennym powietrza przy dobrej pogodzie, w polu elektrycznym o wartości natężenia 150 V/m ?

23. Jaka pojemność jest potrzebna do zgmagazynowania energii 10 kWh , przy różnicy potencjałów 1000 V ?

24. Płaski kondensator powietrzny o polu powierzchni okładek 40 cm^2 i ich odległości 1 mm jest naładowany do różnicy potencjałów 600 V . Znajdź: a) pojemność, b) wartość ładunku na każdej okładce, c) zgmagazynowaną energię, d) natężenie pola elektrycznego między okładkami, e) gęstość energii między okładkami.

25. Dwa kondensatory o pojemnościach $2 \mu\text{F}$ i $4 \mu\text{F}$ są połączone równolegle i jest do nich przyłożona różnica potencjałów 300 V . Oblicz całkowitą energię zgmagazynowaną w kondensatorach.

26. Układ połączonych równolegle kondensatorów o pojemności $5 \mu\text{F}$ służy do magazynowania energii. Ile kosztuje naładowanie 2000 kondensatorów układu do $50\,000 \text{ V}$, jeśli cena energii elektrycznej wynosi $0,3 \text{ zł/kWh}$?

27. Kondensator jest ładowany do momentu zgmagazynowania w nim energii 4 J . Następnie zostaje do niego dołączony równolegle drugi, nienaładowany kondensator. a) Jeśli ładunek rozłoży się równo, to jaka będzie teraz całkowita energia, zgmagazynowana w polach elektrycznych? b) Co stało się z nadwyżką energii?

28. Znajdź: a) ładunek, b) różnicę potencjałów, c) zgmagazynowaną energię dla każdego z kondensatorów na rysunku 26.26. Przyjmij wartości liczbowe z zadania 13 oraz $U = 100 \text{ V}$.

29. Kondensator płaski ma okładki o polu powierzchni S w odległości d i jest naładowany do różnicy potencjałów U . Bateria ładująca została odłączona i okładki rozsunięto na odległość $2d$. Wyraż przez S , d i U : a) różnicę potencjałów, b) początkową $E_p \text{ pocz}$ i końcową $E_p \text{ końc}$ energię zgmagazynowaną w kondensatorze, c) pracę potrzebną do rozsunięcia okładek.

30. Oblicz: a) ładunek, b) różnicę potencjałów, c) energię zgmagazynowaną dla każdego kondensatora na rysunku 26.24. Przyjmij wartości liczbowe z zadania 10 oraz $U = 100 \text{ V}$.

31. Kondensator walcowy ma okładki o promieniach a i b (rys. 26.4). Pokaż, że połowa zgmagazynowanej elektrycznej energii potencjalnej znajduje się w walcu o promieniu $r = \sqrt{ab}$.

32. Izolowana naładowana kula metalowa o średnicy 10 cm ma potencjał 8000 V względem $V = 0$ w nieskończoności. Oblicz gęstość energii w polu elektrycznym, przy powierzchni kuli.

33. a) Pokaż, że okładki kondensatora płaskiego przyciągają się nawzajem siłą $F = q^2/(2\epsilon_0 S)$. Oblicz w tym celu pracę, potrzebną do zwiększenia odległości między okładkami z x do $x + dx$, przy ustalonym ładunku q . b) Pokaż następnie, że *naprężenie elektrostatyczne* (siła na jednostkę powierzchni), działające na każdą okładkę kondensatora wynosi $\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$. (W rzeczywistości jest to siła na jednostkę powierzchni *dowolnego* przewodnika o *dowolnym* kształcie, znajdującego się w polu elektrycznym o natężeniu $\vec{E}$ przy powierzchni przewodnika).

26.6. Kondensator z dielektrykiem

34. Płaski kondensator powietrzny ma pojemność $1,3 \text{ pF}$. Odległość między płytkami zwiększono dwukrotnie i włożono między nie wosk. Nowa pojemność wynosi $2,6 \text{ pF}$. Znajdź względną przenikalność elektryczną wosku.

35. Mając kondensator powietrzny o pojemności $7,4 \text{ pF}$, chcesz przekształcić go w kondensator mogący zgmagazynować energię do $7,4 \mu\text{J}$ przy maksymalnej różnicy potencjałów 652 V . Którego dielektryka z tabeli 26.1 mógłbyś użyć do wypełnienia przestrzeni w kondensatorze?

36. Płaski kondensator powietrzny ma pojemność 50 pF . a) Ile wynosi odległość między okładkami, jeśli każda z nich ma pole powierzchni $0,35 \text{ m}^2$? b) Ile wynosić będzie jego pojemność, jeśli obszar między okładkami zostanie wypełniony materiałem o $\epsilon_r = 5,6$?

37. Kabel koncentryczny (współosiowy) używany w linii przesyłowej ma promień wewnętrzny $0,1 \text{ mm}$ i promień zewnętrzny $0,6 \text{ mm}$. Oblicz pojemność kabla, przypadającą na metr jego długości. Załóż, że przestrzeń między przewodnikami jest wypełniona polistyrenem.

38. Masz za zadanie skonstruować kondensator o pojemności około 1 nF i napięciu przebicia ponad $10\,000 \text{ V}$. Zamierzasz użyć