

Induzione elettromagnetica

Da qualche anno negli Stati Uniti è nata la palestra eco-sostenibile. Si tratta di comuni centri fitness nei quali le cyclette somigliano a enormi dinamo: la corrente elettrica necessaria per alimentare la struttura viene infatti prodotta pedalando. Il motto del fondatore è «Bruciare grassi, non combustibili fossili».

► L'ordine di grandezza

Quanta energia si produrrebbe ogni giorno se l'1% degli italiani pedalasse per 10 minuti su una cyclette collegata a un generatore di tensione?

La risposta a pagina 747

23.1 Forza elettromagnetica indotta e correnti indotte

La corrente elettrica genera un campo magnetico. Un semplice esperimento mostra che un campo magnetico può generare una corrente. La figura 23.1 raffigura un magnete e un circuito formato da una bobina di filo connessa a un amperometro. Quando non c'è alcun moto relativo tra il magnete e la bobina, come nella parte A della figura, l'amperometro indica che non passa corrente. Quando invece il magnete si muove verso la bobina, come nella parte B, si origina una corrente. Mentre il magnete si avvicina, il campo magnetico che esso crea nella posizione della bobina diventa sempre più intenso: è proprio questo campo variabile a generare la corrente.

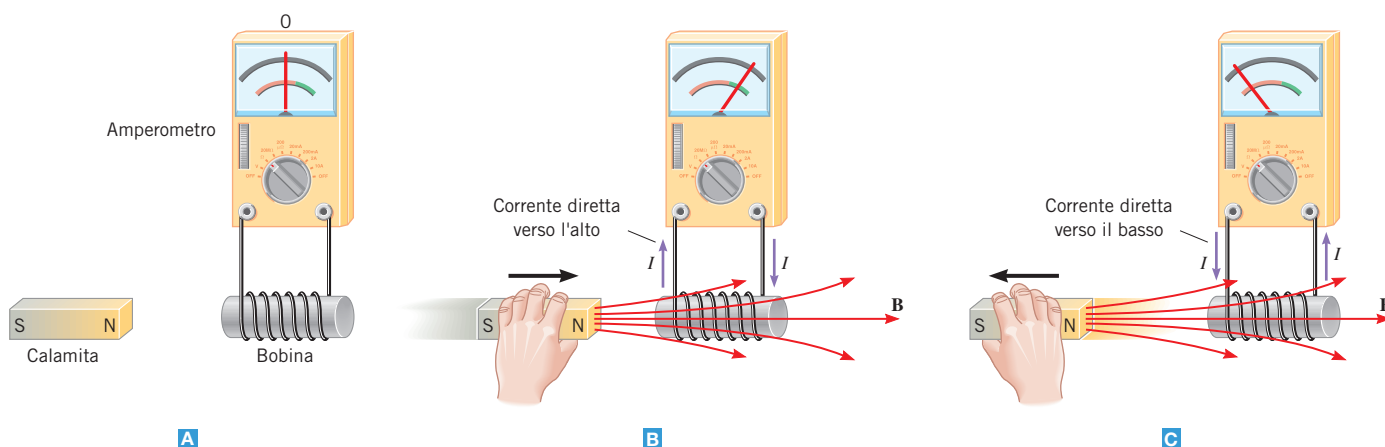
Anche quando il magnete si allontana dalla bobina, come nella parte C, si genera una corrente, ma in verso opposto. Ora il campo magnetico nella posizione della bobina diventa più debole man mano che il magnete si allontana: ancora una volta è proprio il campo variabile che genera la corrente.

Figura 23.1

A. Quando non c'è alcun moto relativo fra la bobina e la calamita, nella bobina non c'è corrente.

B. Si genera una corrente nella bobina quando la calamita si muove verso di essa.

C. Si genera una corrente anche quando la calamita si allontana dalla bobina, ma il verso della corrente è opposto a quello del caso B.



Nella situazione rappresentata in figura 23.1 la corrente si origina anche se il magnete è fermo ed è la bobina a muoversi, perché il campo magnetico nella posizione della bobina cambia mentre questa si avvicina o si allontana dal magnete. **In una bobina si origina una corrente quando c'è un moto relativo fra la bobina e un magnete.**

La corrente nella bobina è detta **corrente indotta** perché è creata dal campo magnetico variabile. Poiché per produrre una corrente è necessaria una sorgente di forza elettromotrice (f.e.m.), la bobina stessa si comporta come se fosse una sorgente di f.e.m. Questa forza elettromotrice è detta **f.e.m. indotta**. Quindi un campo magnetico che cambia nel tempo induce una f.e.m. nella bobina, e la f.e.m. genera una corrente indotta.

Il fenomeno per cui si genera una f.e.m. indotta mediante un campo magnetico è detto **induzione elettromagnetica**.

La figura 23.2 mostra un altro modo di indurre una f.e.m. e una corrente in un circuito. Una f.e.m. può essere indotta cambiando l'area del circuito in un campo magnetico costante. Nella figura la forma del circuito viene distorta in modo da ridurne l'area. Mentre l'area sta cambiando, esistono una f.e.m. e una corrente indotta. Esse si annullano quando l'area rimane costante. Se si aumenta l'area del circuito si genera una corrente di verso opposto.

In ciascuno degli esempi precedenti, la f.e.m. indotta origina una corrente indotta nel circuito. Se il circuito è aperto, per esempio a causa di un interruttore aperto, non scorre alcuna corrente indotta ma è presente comunque una f.e.m. indotta.

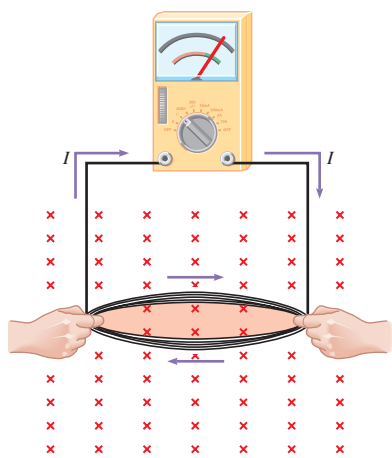


Figura 23.2

Mentre cambia l'area della spira si generano una f.e.m. indotta e una corrente.

23.2 La f.e.m. indotta in un conduttore in moto

Quando una sbarretta conduttrice si muove in un campo magnetico in essa si origina una f.e.m. indotta a causa della forza di Lorentz. Consideriamo la sbarretta metallica di lunghezza L che si muove verso destra, come in figura 23.3A, con velocità \vec{v} costante e perpendicolare al campo magnetico uniforme \vec{B} . Ogni carica q dentro la sbarretta si muove con la stessa velocità \vec{v} e risente di una forza di Lorentz di intensità $F = qvB$. Mediante la prima regola della mano destra, si vede che gli elettroni liberi in movimento sono spinti verso il fondo della sbarretta e lasciano in alto la stessa quantità di carica positiva. (Ricordiamo che bisogna invertire il verso stabilito dalla prima regola della mano destra perché gli elettroni hanno carica negativa.) Le cariche positive e negative si accumulano fino a quando l'attrazione elettrostatica fra esse diventa uguale alla forza magnetica. Quando le due forze si bilanciano si raggiunge l'equilibrio e non avviene più alcuna separazione di carica.

■ F.e.m. cinetica

Le cariche separate alle estremità del conduttore in moto danno luogo a una f.e.m. indotta detta **f.e.m. cinetica**. La f.e.m. esiste finché la sbarretta si muove. Se la sbarretta si ferma la forza di Lorentz si annulla, con il risultato che l'attrazione elettrostatica riunisce le cariche positive e negative e la f.e.m. sparisce.

La f.e.m. nella sbarretta è analoga a quella fra i terminali di una batteria. Però la f.e.m. della batteria è prodotta da reazioni chimiche, mentre la f.e.m. cinetica è creata dall'agente esterno che sposta la sbarretta nel campo magnetico (come la mano nella figura 23.3B).

Si può utilizzare il fatto che le forze elettrica e magnetica si bilanciano all'equilibrio, come in figura 23.3, per determinare l'intensità della f.e.m. cinetica. L'intensità della forza elettrica che agisce su una carica positiva q nell'estremità superiore della sbarretta è qE , dove E è l'intensità del campo elettrico dovuto alle cariche separate. L'intensità del campo elettrico è uguale al rapporto fra la differenza di potenziale (la f.e.m. \mathcal{E}) alle estremità della sbarretta e la lunghezza L della sbarretta stessa. Quindi la forza elettrica sulla carica q è $Eq = (\mathcal{E}/L)q$. La forza di Lorentz sulla carica è $F = qvB$, poiché la carica q si muove perpendicolarmente al campo magnetico. Queste due forze si equilibrano, quindi $(\mathcal{E}/L)q = qvB$, da cui:

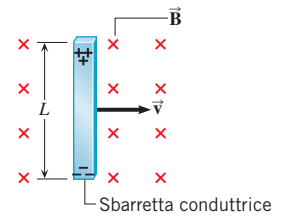
$$\begin{array}{l} \text{F.e.m. di movimento} \\ \text{quando } \vec{v}, \vec{B} \text{ e } L \\ \text{sono perpendicolari} \end{array} \quad \mathcal{E} = vBL \quad (23.1)$$

Come ci aspettavamo, $\mathcal{E} = 0$ V quando $v = 0$ m/s, perché nella sbarretta in quiete non esiste alcuna f.e.m.

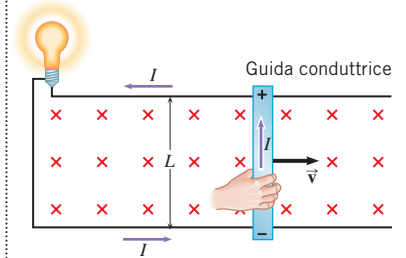
A parità di lunghezza L , velocità maggiori e campi più intensi creano f.e.m. maggiori. Come nelle batterie, \mathcal{E} è espressa in volt. Nella figura 23.3B la sbarretta striscia su guide conduttrici che sono parte di un circuito chiuso, in cui L è la distanza fra le guide. Per effetto della f.e.m., gli elettroni scorrono lungo questo circuito in senso orario. Cariche positive scorrerebbero in verso opposto, per cui nella figura la corrente convenzionale I è disegnata con verso antiorario.

■ F.e.m. cinetica ed energia

La f.e.m. di movimento nasce perché una forza magnetica agisce sulle cariche di un conduttore che si muove in un campo magnetico. Ogni volta che questa f.e.m. genera una corrente, entra in gioco una seconda forza magnetica.



A



B

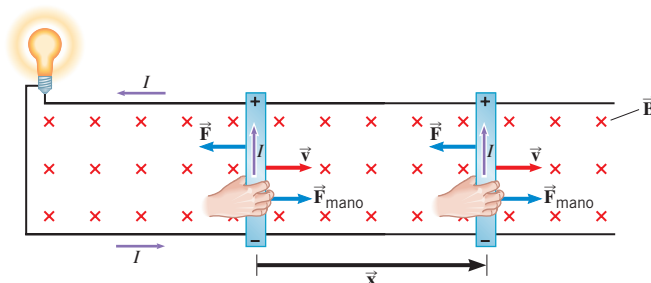
Figura 23.3

A. Quando una sbarretta conduttrice si muove perpendicolarmente a un campo magnetico costante, a causa della forza magnetica appaiono cariche di segno opposto alle estremità della sbarretta che danno luogo a una f.e.m. indotta.
B. La f.e.m. indotta genera una corrente indotta I nel circuito.

Nella figura 23.3B, per esempio, questa seconda forza nasce perché la corrente I nella sbarretta è perpendicolare al campo magnetico. La sbarretta risente di una forza magnetica \vec{F} di intensità $F = ILB \sin 90^\circ$. Il verso di \vec{F} è quello stabilito dalla prima regola della mano destra, è opposto alla velocità \vec{v} della sbarretta e punta verso sinistra (figura 23.4). L'effetto della forza \vec{F} è quello di rallentare la sbarretta. Per mantenerla in moto a velocità costante deve agire una forza uguale e contraria, come la forza \vec{F}_{mano} applicata dalla mano in figura. Questa forza compie lavoro e fornisce l'energia dissipata dalla lampadina.

Figura 23.4

Sulla corrente I nella sbarretta in moto agisce una forza magnetica \vec{F} con verso opposto alla velocità \vec{v} della sbarretta. La sbarretta si muove a velocità costante perché la forza \vec{F}_{mano} bilancia la forza magnetica \vec{F} .



23.3 La legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann

Con una serie di brillanti esperimenti, il fisico inglese Michael Faraday (1791-1867) scoprì attorno al 1830 il fenomeno dell'induzione elettromagnetica e intuì che la f.e.m. indotta nasce da una variazione del flusso magnetico.

■ F.e.m. cinetica e flusso magnetico

Per comprendere la scoperta di Faraday, analizziamo il caso particolare della f.e.m. cinetica. La figura 23.5A mostra una sbarretta che si muove di un tratto x_0 attraverso un campo magnetico fra gli istanti $t = 0$ s e t_0 . In un istante di tempo successivo t , la sbarretta si trova a una distanza x maggiore, come mostra parte B della figura. La velocità della sbarretta ha modulo

$$v = \frac{x - x_0}{t - t_0}$$

Sostituendo questa espressione nell'equazione $\mathcal{E} = vBL$ si ottiene:

$$\mathcal{E} = \frac{x - x_0}{t - t_0} BL = \frac{xL - x_0L}{t - t_0} B$$

Come indica la figura, il termine x_0L è l'area A_0 spazzata dalla sbarretta che si muove di un tratto x_0 , mentre xL è l'area A spazzata nel tratto x . In termini di area, la f.e.m. diviene:

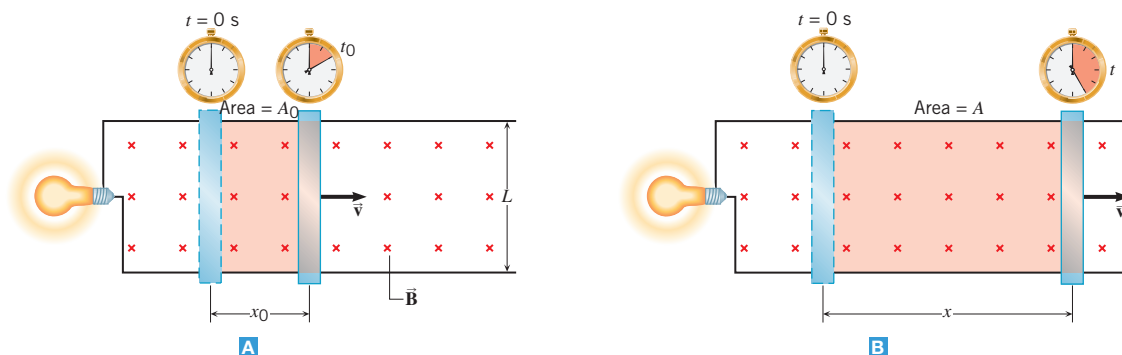
$$\mathcal{E} = \frac{A - A_0}{t - t_0} B = \frac{BA - BA_0}{t - t_0}$$

Figura 23.5

A. In un tempo t_0 la sbarretta in moto spazza un'area $A_0 = x_0L$.

B. L'area spazzata in un tempo t è $A = xL$.

In entrambe le parti della figura le aree sono colorate.



Il termine BA al numeratore è proprio il flusso del campo magnetico uniforme B attraverso la superficie piana di area A : $\Phi(\vec{B}) = BA$. L'intensità della f.e.m. indotta è il rapporto fra la variazione del flusso $\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0$ e l'intervallo di tempo $\Delta t = t - t_0$ in cui ha luogo:

$$\mathcal{E} = \frac{\Phi - \Phi_0}{t - t_0} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

In altri termini: il valore della f.e.m. cinetica è uguale alla velocità di cambiamento del flusso magnetico. Come vedremo nel paragrafo 23.4, per tener conto del verso della f.e.m. indotta è necessario scrivere la relazione precedente nella forma $\mathcal{E} = -\Delta\Phi/\Delta t$.

■ Legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann

Il risultato ottenuto nel caso della f.e.m. cinetica ha validità generale. Attorno al 1840 il tedesco Ernst Neumann (1798-1895) dimostrò infatti la seguente legge:

■ LEGGE DI FARADAY-NEUMANN

La f.e.m. media indotta in un circuito è:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t} \quad (23.2)$$

dove $\Delta\Phi(\vec{B}) = \Phi[\vec{B}(t)] - \Phi_0[\vec{B}(t_0)]$ è la variazione di flusso magnetico attraverso una qualsiasi superficie delimitata dal circuito, e $\Delta t = t - t_0$ è l'intervallo di tempo in cui avviene questa variazione.

Unità di misura: volt (V).

Il valore istantaneo della f.e.m. indotta può essere calcolato valutando il rapporto $\Delta\Phi/\Delta t$ quando Δt tende a zero:

$$\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta\Phi(\vec{B})}{\Delta t} \right) = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt}$$

Quindi la f.e.m. indotta in un circuito è uguale all'opposto della derivata rispetto al tempo del flusso magnetico attraverso una superficie che abbia come bordo il circuito.

ESEMPIO 1 ■ F.e.m. indotta in una spira rotante

F.e.m. indotta in una bobina

Una bobina piatta ha area $0,020 \text{ m}^2$ ed è formata da $N = 50$ avvolgimenti. All'istante $t_0 = 0 \text{ s}$ la normale della bobina è parallela ($\phi_0 = 0^\circ$) a un campo magnetico costante di intensità $0,18 \text{ T}$. La bobina viene poi ruotata di un angolo $\phi = 60^\circ$ in $0,10 \text{ s}$ (figura 23.6).

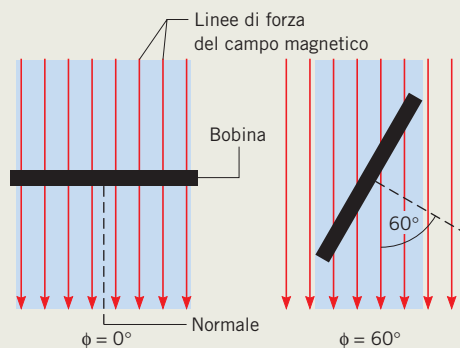


Figura 23.6

Tre orientazioni di una bobina rettangolare (viste in sezione) relative alle linee del campo magnetico. Le linee del campo magnetico che attraversano la bobina sono quelle corrispondenti all'area azzurra.

- ▶ Determina la f.e.m. media indotta.
- ▶ Quale sarebbe la f.e.m. indotta se la bobina fosse riportata alla sua orientazione iniziale in $0,10 \text{ s}$?

Ragionamento e soluzione

► Secondo la legge di Faraday-Neumann:

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= -\frac{N[\Phi(\vec{\mathbf{B}}) - \Phi_0(\vec{\mathbf{B}})]}{t - t_0} = -\frac{N(BA \cos \phi - BA \cos \phi_0)}{t - t_0} = \\ &= -\frac{NBA(\cos \phi - \cos \phi_0)}{t - t_0} \\ \mathcal{E} &= -\frac{(50)(0,18 \text{ T})(0,020 \text{ m}^2)(\cos 60^\circ - \cos 0^\circ)}{0,10 \text{ s} - 0 \text{ s}} = \boxed{+0,14 \text{ V}}\end{aligned}$$

► Quando la bobina è riportata nella sua posizione iniziale in 0,10 s, si scambiano fra loro i valori di ϕ . Come risultato, la f.e.m. indotta ha la stessa intensità ma verso opposto: $\mathcal{E} = -0,14 \text{ V}$.

Fisica quotidiana

L'interruttore automatico differenziale o salvavita



Un'applicazione della legge di Faraday-Neumann che troviamo nelle nostre abitazioni è un dispositivo di sicurezza noto come *interruttore automatico differenziale* o semplicemente *salvavita*, che protegge dai pericoli delle scosse elettriche.

Il salvavita consiste di un interruttore che blocca il passaggio di corrente nel caso in cui si crei una f.e.m. indotta in una bobina di controllo (figura 23.7). La bobina è avvolta attorno a un anello di ferro attraverso il quale la corrente giunge a un dispositivo, come per esempio l'asciugabiancheria in figura. Nella figura la corrente in ingresso nell'asciugabiancheria è indicata dalle frecce rosse, quella in uscita dalle frecce verdi. Ciascuna delle correnti genera un campo magnetico che circonda il filo corrispondente. Tuttavia le linee di forza hanno verso opposto perché le due correnti scorrono in verso opposto.

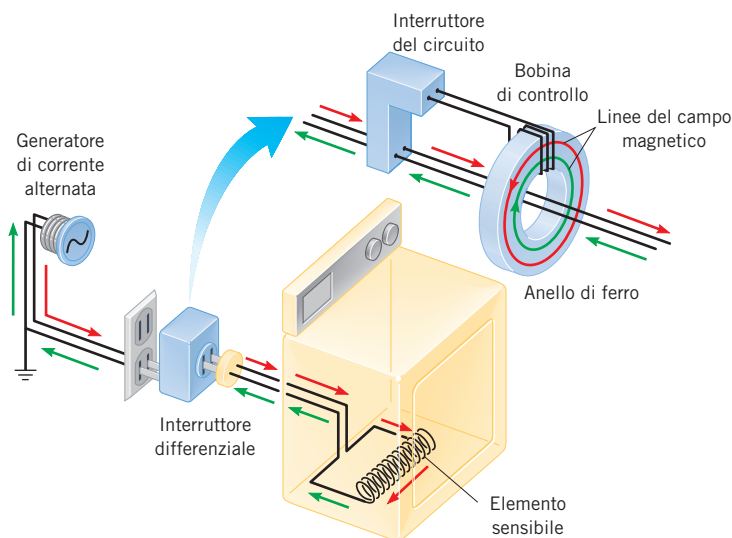


Figura 23.7

L'asciugabiancheria è connesso alla presa a muro attraverso un interruttore differenziale e sta funzionando normalmente.

Come mostra la figura, l'anello di ferro incanala le linee di forza attraverso la bobina di controllo. Poiché la corrente è alternata, i campi delle correnti rossa e verde cambiano nel tempo ma le linee di forza rosse e verdi hanno sempre verso opposto e quindi i campi si annullano sempre. In conseguenza di ciò il flusso totale attraverso la bobina è sempre nullo, per cui non vi è alcuna f.e.m. indotta. In tal modo, quando l'asciugabiancheria funziona correttamente l'interruttore differenziale non è attivato e quindi non interrompe il passaggio di corrente.

La situazione cambia in caso di un guasto elettrico, per esempio quando un filo interno entra in contatto con l'involucro metallico dell'elettrodomestico. Se una persona tocca l'involucro, parte della corrente ne attraversa il corpo e si scarica a terra, ritornando al generatore di tensione senza passare nel filo di ritorno che attraversa l'interruttore differenziale. In queste condizioni il flusso totale attraverso la

bobina di controllo non è più nullo e cambia nel tempo perché la corrente è alternata. La variazione del flusso genera una f.e.m. indotta nella bobina di controllo, che aziona l'interruttore. L'interruttore differenziale agisce in tempi molto rapidi (meno di un millisecondo) e interrompe il passaggio di corrente prima che l'intensità raggiunga un livello pericoloso.

23.4 La legge di Lenz

Il flusso magnetico totale attraverso un circuito è la somma di due contributi: uno è il flusso del campo magnetico esterno e l'altro è il flusso del **campo magnetico indotto**, cioè del campo magnetico generato dalla corrente indotta nel circuito.

In generale esistono due versi in cui la corrente indotta può scorrere nel circuito: per stabilire il verso corretto si usa una regola nota come **legge di Lenz**, dal nome del fisico russo Heinrich Lenz (1804-1865).

■ LEGGE DI LENZ

La corrente indotta ha un verso tale da generare un campo magnetico indotto che si oppone alla variazione del flusso magnetico che l'ha provocata.

Il segno meno della legge di Faraday-Neumann è dovuto proprio alla legge di Lenz, per questo motivo l'equazione (23.2) è detta **legge di Faraday-Neumann-Lenz**.

La figura 23.8A mostra un magnete permanente che si avvicina a una spira. Il flusso magnetico attraverso la spira è crescente, poiché l'intensità del campo magnetico nella spira aumenta all'avvicinarsi del magnete. Per opporsi all'aumento del flusso, il verso del campo magnetico indotto deve essere **opposto** a quello del campo del magnete, cioè dev'essere diretto verso sinistra (figura 23.8B). Per generare questo campo indotto, la corrente indotta deve scorrere nella spira in senso antiorario se vista dalla parte del magnete.



Figura 23.8

A. Mentre la calamita si muove verso destra, il flusso magnetico attraverso la spira cresce.
B. La corrente indotta ha il verso del pollice della mano destra.

Consideriamo ora la figura 23.9A in cui un magnete si allontana da una spira. Il flusso magnetico attraverso la spira è decrescente, poiché l'intensità del campo magnetico nella spira diminuisce all'allontanarsi del magnete. In questo caso il campo magnetico indotto si oppone alla diminuzione del flusso se ha **lo stesso verso** del campo del magnete, cioè se è diretto verso destra (figura 23.9B). Per generare questo campo indotto, la corrente indotta deve scorrere nella spira in senso orario se vista dalla parte del magnete.

In generale, la corrente indotta in un circuito in cui c'è una variazione del flusso magnetico $\Delta\Phi(\vec{B})$ crea:

- un campo magnetico indotto che è opposto al campo magnetico esterno se $\Delta\Phi(\vec{B}) > 0$;
- un campo magnetico indotto che ha lo stesso verso del campo magnetico esterno se $\Delta\Phi(\vec{B}) < 0$.

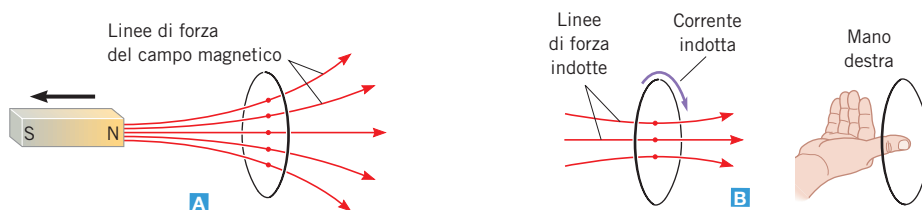


Figura 23.9

A. Mentre la calamita si muove verso sinistra, il flusso magnetico attraverso la spira decresce.
B. La corrente indotta ha il verso del pollice della mano destra.

Problem solving

Campo indotto e campo esterno

Il campo indotto non è sempre opposto al campo esterno: la legge di Lenz richiede solo che esso sia opposto alla variazione del flusso che genera la f.e.m.

ESEMPIO 2 ■ F.e.m. generata in un anello di rame in moto

Cinque posizioni

La figura 23.10 mostra un anello di rame che attraversa una regione in cui è presente un campo magnetico uniforme entrante nella pagina.

► Per ciascuna delle cinque posizioni indicate stabilisci se esiste una corrente indotta nell'anello e, in caso affermativo, il suo verso.

Ragionamento e soluzione

Posizione 1. Il campo magnetico e il suo flusso sono nulli. Quindi **non c'è variazione di flusso e non esistono f.e.m. e corrente indotta.**

Posizione 2. Mentre l'anello entra nella regione in cui c'è il campo, il flusso aumenta e quindi la corrente indotta circola **in verso antiorario**, in modo da creare un campo magnetico opposto a quello esterno.

Posizione 3. Nella regione il campo magnetico è costante e la variazione di flusso è nulla. Quindi **non si originano né f.e.m. indotta né corrente indotta.**

Posizione 4. Mentre l'anello esce dalla regione in cui c'è il campo, il flusso diminuisce e quindi la corrente indotta circola **in verso orario**, in modo da creare un campo magnetico con lo stesso verso di quello esterno.

Posizione 5. Come nella posizione 1, **non c'è alcuna corrente indotta** perché il campo magnetico e il suo flusso sono nulli.

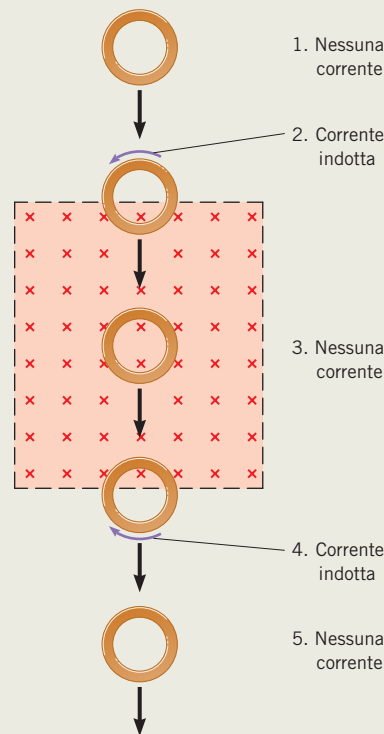


Figura 23.10

Un anello di rame attraversa una regione rettangolare in cui c'è un campo magnetico uniforme diretto nel verso entrante nella pagina. La figura mostra che si origina una corrente indotta nelle posizioni 2 e 4.

Fisica quotidiana



Il microfono a bobina mobile e a magnete mobile

La figura 23.11 mostra un tipo di microfono detto «a bobina mobile». Quando il suono raggiunge il microfono, la membrana oscilla in avanti e indietro e la bobina attaccata si muove con essa. Vicino alla bobina c'è un magnete fisso. Quando la bobina si allontana e si avvicina al magnete, cambia il flusso magnetico che la attraversa. Di conseguenza nella bobina si genera una f.e.m. indotta. Questo segnale elettrico è inviato a un amplificatore e poi ai diffusori acustici.

Nel tipo di microfono detto «a magnete mobile» il magnete è solidale con la membrana e si muove rispetto a una bobina fissa.

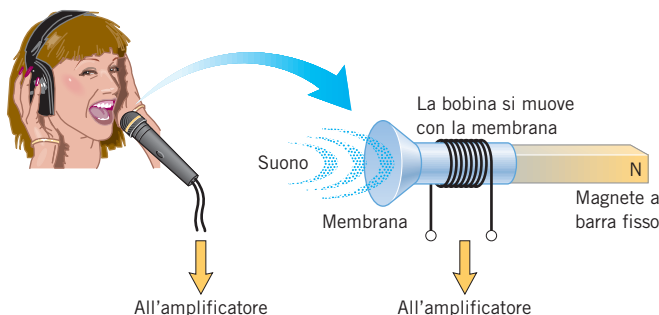


Figura 23.11

Un microfono a bobina mobile.

■ Legge di Lenz e conservazione dell'energia

La legge di Lenz consegue al principio di conservazione dell'energia.

Supponiamo che la corrente indotta scorra in senso opposto a quanto previsto dalla legge di Lenz, per esempio ipotizziamo che nella situazione della figura 23.8 la corrente indotta generi un campo magnetico diretto verso destra. Questo campo aumenterebbe la variazione di flusso totale e quindi l'intensità della corrente indotta. A sua volta, questa creerebbe un campo indotto più grande, che darebbe luogo a una variazione di flusso più grande: è facile comprendere che tale processo non avrebbe termine e genererebbe una quantità infinita di energia.

Quindi il principio di conservazione dell'energia determina il verso della corrente indotta.

■ Correnti di Foucault

In un pezzo di materiale conduttore in cui il flusso magnetico cambia nel tempo si originano correnti indotte. Per comprendere tale fenomeno, consideriamo la situazione dell'esempio 2 ma sostituiamo l'anello con un disco di rame. A causa dell'induzione elettromagnetica, come nel caso dell'anello anche nel disco scorrono correnti indotte, chiamate **correnti di Foucault**, da nome del fisico francese Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868). Esse circolano in percorsi chiusi. Poiché la resistenza elettrica di un blocco di materiale conduttore è molto piccola, le correnti di Foucault dissipano molta energia per effetto Joule: per questa ragione sono dette **correnti parassite**.

Nei dispositivi sottoposti a grandi variazioni di flusso magnetico, come nei nuclei dei motori elettrici, si utilizzano blocchi formati da tante "fettine" di materiale separate da superfici isolanti. In questo modo aumenta la resistenza elettrica totale e diminuisce l'intensità delle correnti parassite. Così facendo si limitano le perdite e si riduce il riscaldamento dei materiali.

La dissipazione di energia provocata dalle correnti di Foucault è utilizzata per diminuire l'energia cinetica, e quindi la velocità, di mezzi pesanti come camion e pullman.



Fisica quotidiana

I freni elettromagnetici

23.5 Mutua induzione e autoinduzione

■ Mutua induzione

Consideriamo le due bobine di figura 23.12: la bobina *primaria* è connessa a un generatore di tensione alternata, mentre la bobina *secondaria* è connessa solo a un voltmetro che misura la f.e.m. indotta. La corrente I_p della bobina *primaria* crea un campo magnetico che genera un flusso magnetico nella bobina *secondaria*. Il flusso varia nel tempo perché la corrente I_p e il campo che essa genera cambiano nel tempo. A causa della variazione del flusso si origina una f.e.m. indotta nella bobina *secondaria*.

L'effetto per cui una corrente variabile in un circuito induce una f.e.m. in un altro circuito è detto **mutua induzione**. Per la legge di Faraday-Neumann, la f.e.m. media \mathcal{E}_s indotta nella bobina *secondaria* è proporzionale alla variazione di flusso $\Delta\Phi_s(\vec{B})$ attraverso essa. Ma $\Delta\Phi_s(\vec{B})$ è prodotto dalla variazione ΔI_p della corrente nella bobina *primaria*. Quindi è conveniente riscrivere la legge di Faraday-Neumann in una forma che metta in relazione \mathcal{E}_s e ΔI_p . A questo proposito, notiamo che il flusso magnetico totale attraverso la bobina *secondaria* è $N_s\Phi_s(\vec{B})$, dove N_s è il numero di spire della bobina *secondaria* e $\Phi_s(\vec{B})$ è il flusso attraverso una spira. Il flusso totale è proporzionale al campo magnetico che, a sua volta, è proporzionale alla corrente I_p nella bobina *primaria*. Quindi $N_s\Phi_s(\vec{B}) \propto I_p$. Introducendo la costante di proporzionalità M , detta **mutua induttanza**, la relazione precedente diviene:

$$N_s\Phi_s(\vec{B}) = MI_p$$

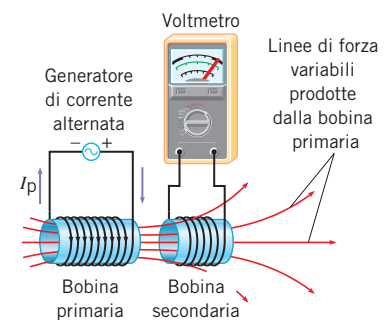


Figura 23.12

Una corrente alternata I_p che scorre nella bobina primaria crea un campo magnetico alternato. Questo campo variabile induce una f.e.m. nella bobina secondaria.

da cui segue:

$$M = N_s \frac{\Phi_s(\vec{\mathbf{B}})}{I_p} \quad (23.3)$$

Sostituendo questa relazione nella legge di Faraday-Neumann otteniamo:

$$\mathcal{E}_s = -N_s \frac{\Delta\Phi_s(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t} = -\frac{\Delta[N_s\Phi_s(\vec{\mathbf{B}})]}{\Delta t} = -\frac{\Delta(MI_p)}{\Delta t} = -M \frac{\Delta I_p}{\Delta t}$$

*F.e.m. media dovuta alla
mutua induzione*

$$\mathcal{E}_s = -M \frac{\Delta I_p}{\Delta t} \quad (23.4)$$

La f.e.m. indotta nella bobina secondaria è quindi dovuta alla variazione della corrente nella bobina primaria.

Il valore istantaneo della f.e.m. indotta può essere calcolato valutando il rapporto $\Delta I_p/\Delta t$ quando Δt tende a zero, cioè calcolando la derivata rispetto al tempo della corrente I_p della bobina primaria:

$$\mathcal{E}_s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-M \frac{\Delta I_p}{\Delta t} \right) = -M \frac{dI_p}{dt}$$

L'unità di misura della mutua induttanza M è detta **henry** (H) in onore del fisico americano Joseph Henry (1797-1878): $1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$. La mutua induttanza è una misura del grado di accoppiamento magnetico fra le due bobine e dipende dalla geometria delle bobine e dai loro eventuali nuclei ferromagnetici. In genere M ha valori minori di 1 H e spesso ha valori compresi fra il millihenry ($1 \text{ mH} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H}$) e il microhenry ($1 \mu\text{H} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ H}$).

■ Autoinduzione

Una f.e.m. può essere indotta in una bobina percorsa da corrente a seguito di una variazione del campo magnetico generato dalla corrente stessa. Per esempio, la figura 23.13 mostra una bobina connessa a un generatore di corrente alternata. La corrente alternata crea un campo magnetico variabile che, a sua volta, crea un flusso variabile attraverso la bobina. La variazione di flusso induce una f.e.m. nella bobina secondo la legge di Faraday-Neumann. Il fenomeno per cui una corrente variabile in un circuito induce una f.e.m. nello stesso circuito è detto **autoinduzione**.

Trasformiamo la legge di Faraday-Neumann in modo che la f.e.m. indotta sia proporzionale alla variazione di corrente nella bobina piuttosto che alla variazione di flusso magnetico. Il flusso magnetico totale $\Phi(\vec{\mathbf{B}})$ attraverso la bobina è proporzionale al campo magnetico e il campo magnetico è proporzionale alla corrente I , per cui $\Phi(\vec{\mathbf{B}}) \propto I$. Inserendo la costante di proporzionalità L , detta **autoinduttanza** o **induttanza** della bobina, si ha $\Phi(\vec{\mathbf{B}}) = LI$, da cui:

$$L = \frac{\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{I} \quad (23.5)$$

La legge di Faraday-Neumann dà la f.e.m. indotta media:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

*F.e.m. media dovuta
all'autoinduzione*

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (23.6)$$

Il valore istantaneo della f.e.m. indotta può essere calcolato valutando il rapporto $\Delta I/\Delta t$ quando Δt tende a zero, cioè calcolando la derivata rispetto al tempo della corrente I nella bobina:

$$\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right) = -L \frac{dI}{dt}$$

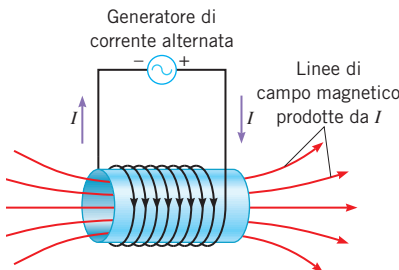


Figura 23.13

La corrente alternata nella bobina genera un campo magnetico alternato che induce una f.e.m. nella bobina.

Come la mutua induttanza, L si misura in henry. Il valore di L dipende dalla geometria della bobina e dal materiale al suo interno. Avvolgendo il filo attorno a un nucleo di materiale ferromagnetico, il flusso magnetico e quindi l'induttanza possono essere aumentati in modo significativo.

■ L'induttanza di un solenoide

L'induttanza di un solenoide con una lunghezza l molto maggiore del diametro può essere calcolata a partire dall'equazione (23.5). Il campo magnetico all'interno del solenoide è perpendicolare al piano degli avvolgimenti e ha modulo costante

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

dove N è il numero di avvolgimenti. Quindi il flusso totale è:

$$\Phi(\vec{B}) = NAB = NA\mu_0 \frac{N}{l} I = A\mu_0 \frac{N^2}{l} I$$

dove A è l'area della sezione del solenoide. Inserendo questa espressione nella equazione (23.5) si ha l'induttanza del solenoide:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} A \quad (23.7)$$

ESEMPIO 3 ■ F.e.m. indotta in un solenoide

Quando cambia la corrente...

Un solenoide lungo $8,0 \cdot 10^{-2}$ m e con sezione di area $5,0 \cdot 10^{-5}$ m² contiene 6500 avvolgimenti per metro di lunghezza.

► Determina la f.e.m. indotta nel solenoide quando la corrente in esso cambia da 0 A a 1,5 A nell'intervallo di tempo da 0 s a 0,20 s.

Ragionamento e soluzione

Per calcolare la f.e.m. indotta mediante la (23.6), determiniamo l'induttanza del solenoide. Il numero N di avvolgimenti è:

$$N = 6500 \text{ avv/m} \cdot 8,0 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 520$$

L'induttanza del solenoide è:

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} A = \frac{(4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(520)^2(5,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2)}{8,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

La f.e.m. indotta nel solenoide è quindi:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{(2,1 \cdot 10^{-4} \text{ H})(1,5 \text{ A})}{0,2 \text{ s}} = \\ &= \boxed{-1,6 \cdot 10^{-3} \text{ V}} \end{aligned}$$

■ L'energia immagazzinata in un solenoide

Un solenoide può immagazzinare energia, come un condensatore. Questa energia deriva dal lavoro compiuto dal generatore per mantenere una corrente I nel solenoide. Si dimostra che il lavoro totale è $W = (1/2)LI^2$. Quindi l'energia immagazzinata da un solenoide percorso da una corrente I è:

$$\text{energia} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (23.8)$$

L'energia di un solenoide è immagazzinata nel suo campo magnetico fino a quando scorre la corrente I .

■ L'ANGOLO MATEMATICO

Dimostrazione della formula per l'energia immagazzinata in un solenoide

Per la legge di Faraday-Neumann, in un solenoide percorso da una corrente I si origina una f.e.m. indotta $\mathcal{E} = -L(di/dt)$. Secondo la legge di Lenz, la f.e.m. indotta è opposta a quella del generatore in modo da opporsi alla variazione di corrente. Il generatore deve quindi compiere un lavoro per spingere le cariche attraverso il solenoide contro questa f.e.m. indotta. Indichiamo con dW il lavoro fatto dal generatore per spingere una carica dQ nel solenoide:

$$dW = -(dQ)\mathcal{E} = -(dQ)\left(-L \frac{di}{dt}\right) = L \frac{dQ \cdot di}{dt}$$

Poiché $i = dQ/dt$, poniamo la formula precedente nella forma:

$$dW = Li \cdot di$$

Per calcolare il lavoro totale fatto mentre la corrente cambia da zero fino al suo valore finale I basta calcolare l'integrale definito:

$$W = \int_0^I Li \cdot di = L \int_0^I i \cdot di = L \left[\frac{1}{2} i^2 \right]_0^I = \frac{1}{2} LI^2$$

L'induttanza di un solenoide molto lungo è $L = \mu_0 N^2 / lA$, dove N è il numero di avvolgimenti, A è l'area della sezione del solenoide e l la sua lunghezza. Quindi l'energia immagazzinata è:

$$\text{energia} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2}{l} AI^2$$

Per l'equazione (22.11) all'interno del solenoide

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

per cui $I = Bl/(\mu_0 N)$. Sostituendo risulta:

$$\text{energia} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{N^2}{l} A \left(\frac{Bl}{\mu_0 N} \right)^2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 Al$$

Il termine Al è il volume dell'interno del solenoide, in cui esiste il campo magnetico, quindi l'energia per unità di volume, o **densità di energia**, è:

$$\text{densità di energia} = \frac{\text{energia}}{\text{volume}} = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (23.9)$$

Questo risultato è stato ottenuto nel caso particolare di un solenoide, ma vale in generale in ogni punto in cui esiste un campo magnetico nell'aria, nel vuoto o in un materiale non magnetico. Possiamo dunque concludere che l'energia può essere immagazzinata in un campo magnetico, proprio come in un campo elettrico.

23.6 L'alternatore e la corrente alternata

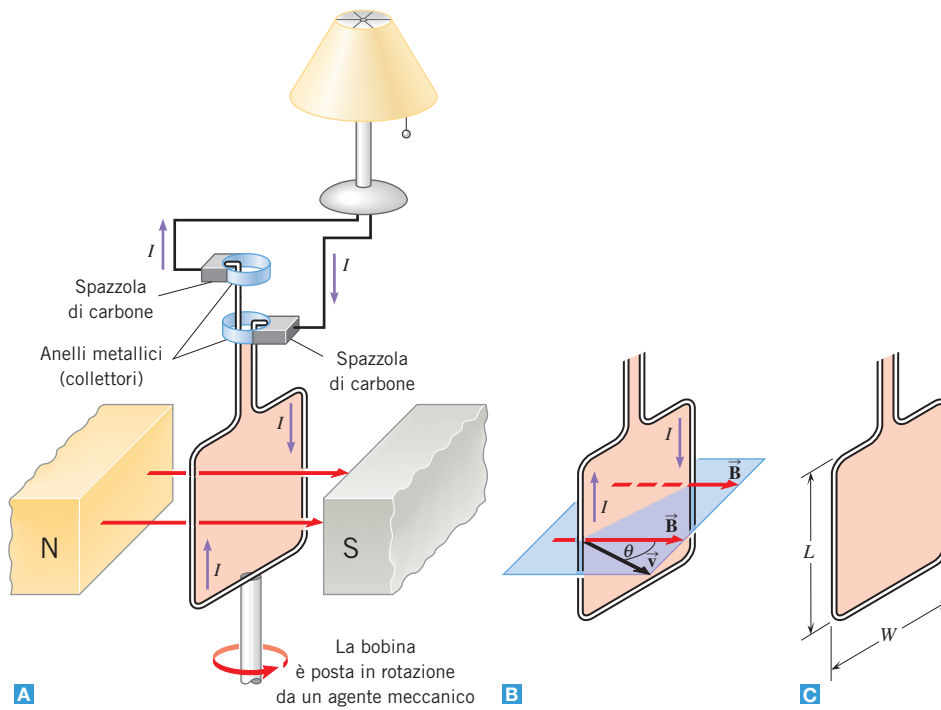
Gli alternatori, come quelli di figura 23.14, producono praticamente tutta l'energia elettrica mondiale. Un alternatore produce energia elettrica a partire da energia meccanica, proprio l'opposto di ciò che fa un motore elettrico. In un motore una corrente elettrica provoca la rotazione di una bobina, compiendo un lavoro meccanico su ogni oggetto attaccato all'asse della bobina. In un alternatore l'asse è posto in rotazione da un qualsiasi mezzo meccanico, come un motore o una turbina, e nella bobina si genera una f.e.m. indotta. Se l'alternatore è connesso a un circuito esterno, l'uscita dell'alternatore è una corrente elettrica.

Nella sua forma più semplice, un alternatore consiste di una spira che ruota in un campo magnetico uniforme, come mostra la figura 23.15A. Ciascun estremo del-



Figura 23.14

Alternatori come questi forniscono energia elettrica producendo una f.e.m. indotta in accordo con la legge di Faraday-Neumann dell'induzione elettromagnetica.


Figura 23.15

- A.** Questo alternatore consiste di una bobina (di cui è mostrato solo un avvolgimento) che viene fatta ruotare in un campo magnetico \vec{B} da un agente meccanico esterno.
- B.** La corrente I nasce a causa della forza magnetica che agisce sulle cariche in moto.
- C.** Le dimensioni della bobina.

la spira termina con un anello metallico che striscia contro una spazzola di carbone ferma, a cui è connesso il circuito esterno.

Supponiamo che all'istante $t = 0$ s sia $\theta = 0^\circ$ l'angolo formato dalla normale alla spira e dal campo magnetico costante \vec{B} (parte **B** della figura). Se la spira è mantenuta in rotazione con velocità angolare ω costante attorno al suo asse, l'angolo θ varia secondo la legge:

$$\theta = \omega t$$

In ogni istante, il flusso magnetico attraverso la spira è:

$$\Phi(\vec{B}) = AB \cos \theta = AB \cos(\omega t)$$

dove A è l'area della spira.

Per la legge di Faraday-Neumann la f.e.m. indotta nella spira è:

$$\mathcal{E}(t) = -\frac{d\Phi(\vec{B})}{dt} = -\frac{d(AB \cos \omega t)}{dt} = \omega AB \sin \omega t \quad (23.10a)$$

dove si è usata la regola

$$\frac{d(\cos \omega t)}{dt} = -\omega \sin \omega t$$

Indicato con $\mathcal{E}_0 = \omega AB$ il valore massimo della f.e.m. indotta, la relazione precedente diviene:

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (23.10b)$$

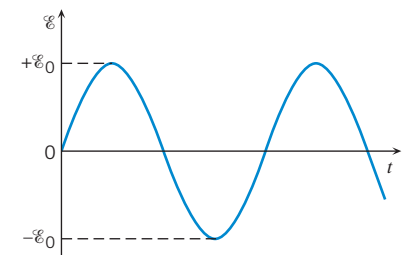
La figura **23.16** è il grafico dell'equazione (23.10b) e mostra che la f.e.m. cambia polarità mentre la bobina ruota.

Quando un alternatore è connesso a un circuito, genera in esso una corrente che inverte il verso con la stessa frequenza f con cui la f.e.m. cambia polarità. Perciò questo alternatore è detto *generatore di corrente alternata*.

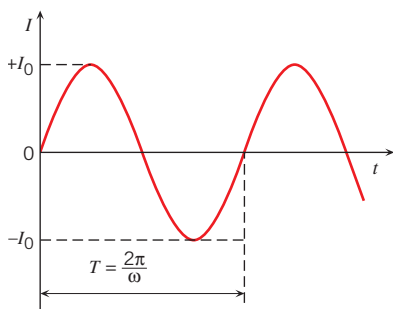
■ La corrente alternata

Se il circuito esterno connesso all'alternatore ha resistenza totale R , in esso scorre una **corrente alternata**:

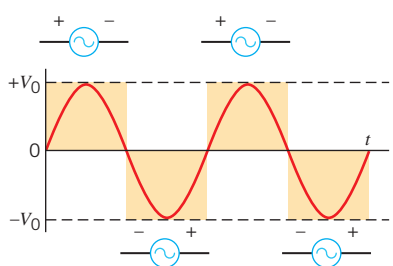
$$I(t) = I_0 \sin \omega t \quad (23.11a)$$


Figura 23.16

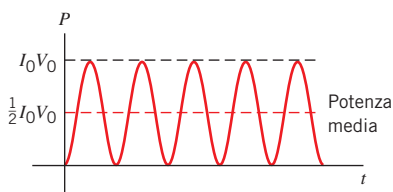
Un generatore di corrente alternata produce una f.e.m. indotta alternata in accordo con l'equazione: $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$.


Figura 23.17

Andamento della corrente che percorre un circuito collegato a un alternatore.


Figura 23.18

Nei casi più comuni, la tensione alternata è una funzione sinusoidale del tempo. Nella figura è indicata la polarità relativa dei terminali del generatore durante la parte positiva e la parte negativa della funzione seno.


Figura 23.19

In un circuito in corrente alternata, la potenza P dissipata da un resistore oscilla fra zero e un valore di picco $I_0 V_0$, dove I_0 e V_0 sono rispettivamente la corrente e la tensione di picco.

dove $I_0 = \mathcal{E}_0/R$ è il valore massimo dell'intensità di corrente. La figura 23.17 visualizza l'andamento dell'intensità di corrente [equazione (23.11a)] in funzione del tempo, che oscilla fra i valori $+I_0$ e $-I_0$.

La frequenza f e il periodo T dell'oscillazione sono legati alla velocità angolare ω dell'alternatore dalle relazioni:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Dalla prima delle relazioni precedenti deriva che la (23.11a) può essere scritta nella forma:

$$I(t) = I_0 \sin 2\pi ft \quad (23.11b)$$

In Italia la frequenza è $f = 50$ Hz. Il periodo di ogni ciclo è quindi $1/50$ s e la polarità della tensione si inverte due volte ogni ciclo, come indica la figura 23.18.

■ Potenza e valori efficaci in corrente alternata

La potenza rilasciata da un generatore in un circuito in corrente alternata è data da $P = I\mathcal{E}$, proprio come nel caso di un circuito in corrente continua. Tuttavia, poiché I ed \mathcal{E} dipendono dal tempo, la potenza varia al variare del tempo:

$$P = (I_0 \sin \omega t)(\mathcal{E}_0 \sin \omega t) = I_0 \mathcal{E}_0 \sin^2 \omega t \quad (23.12)$$

La figura 23.19 mostra il grafico di questa funzione. Si dimostra che il valore medio \bar{P} della potenza è la metà del valore massimo, come mostra la figura:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_0 \mathcal{E}_0 \quad (23.13)$$

A partire da questa espressione, si possono introdurre i valori medi della corrente e della f.e.m., che risultano molto utili quando si ha a che fare con i circuiti in corrente alternata. L'equazione (23.13) può essere posta nella forma:

$$\bar{P} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}} = I_{\text{eff}} \mathcal{E}_{\text{eff}} \quad (23.14)$$

dove I_{eff} ed \mathcal{E}_{eff} sono i **valori efficaci** di corrente e f.e.m., e sono calcolati dividendo per $\sqrt{2}$ i corrispondenti valori massimi:

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (23.15)$$

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}} \quad (23.16)$$

In Italia il valore massimo di \mathcal{E} è 220 V, quindi $\mathcal{E}_{\text{eff}} = \frac{220}{\sqrt{2}} = 156$ V.

23.7 I circuiti semplici in corrente alternata

■ Il circuito resistivo

Nei circuiti che contengono solo resistori, la corrente inverte il suo verso ogni volta in cui si inverte la polarità del generatore ed è proporzionale alla forza elettromotrice applicata:

$$I = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \sin 2\pi ft = I_0 \sin 2\pi ft \quad (23.17)$$

dove $I_0 = \mathcal{E}_0/R$ è l'intensità di corrente massima. La resistenza R ha lo stesso valore per ogni frequenza della corrente alternata.

Il grafico in figura 23.20 mostra che f.e.m. e corrente sono *in fase*. In termini intuitivi ciò significa che si annullano, raggiungono i loro valori massimi e i loro valori minimi negli stessi istanti.

La legge di Ohm può essere formulata in termini di valori efficaci:

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} R \quad (23.18)$$

■ Il circuito capacitivo

La figura 23.21 mostra gli andamenti di tensione e corrente alternata in un circuito che contiene solo un condensatore. La corrente raggiunge il suo valore massimo un quarto di ciclo prima che lo raggiunga la f.e.m. La corrente è sfasata in anticipo di 90° rispetto alla f.e.m.

■ L'ANGOLO MATEMATICO

Sfasamento corrente-f.e.m. in un circuito RC

In un circuito puramente capacitivo vale la relazione fra la capacità C del condensatore, la carica Q sulle armature e la differenza di potenziale V :

$$V = \frac{Q}{C}$$

In presenza di un generatore di f.e.m. $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft$, la legge delle maglie è:

$$\mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft - \frac{Q}{C} = 0$$

e quindi la carica presente all'istante t sulle armature è:

$$Q(t) = C \mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft$$

La corrente che attraversa il circuito è $I(t) = dQ(t)/dt$. Quindi:

$$I(t) = \frac{d(C \mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft)}{dt} = C \mathcal{E}_0 \frac{d(\sin 2\pi ft)}{dt} = C \mathcal{E}_0 2\pi f \cos 2\pi ft$$

La corrente dipende dal tempo secondo il fattore $\cos 2\pi ft = \sin(2\pi ft + \pi/2)$, per cui è sfasata in anticipo di $\pi/2 = 90^\circ$ rispetto alla f.e.m.

Il fatto che f.e.m. e corrente siano sfasati di 90° ha conseguenze importanti dal punto di vista dell'energia elettrica, poiché la potenza è il prodotto di corrente e tensione. Nell'intervallo di tempo fra A e B (o fra A' e B') nella figura 23.21, la corrente e la f.e.m. sono entrambe positive. Quindi anche la potenza istantanea è positiva: il generatore sta inviando energia al condensatore. Tuttavia, nell'intervallo fra B e C (o fra B' e C') la corrente è negativa mentre la f.e.m. è positiva, e quindi la potenza è negativa. Durante questo intervallo di tempo, il condensatore restituisce energia al generatore. Quindi la potenza varia tra valori positivi e negativi in uguali periodi di tempo. In altre parole: il condensatore assorbe e rilascia energia. Di conseguenza la potenza media, e quindi l'energia media, utilizzata da un condensatore in un circuito in corrente alternata è nulla.

Si può dimostrare che i valori efficaci di f.e.m. e corrente sono legati dalla relazione:

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = X_C I_{\text{eff}} \quad (23.19)$$

dove X_C è detta **reattanza capacitiva** e si misura in ohm. Se C è la capacità del condensatore, la reattanza capacitiva è:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (23.20)$$

All'aumentare della frequenza, la reattanza capacitiva X_C tende a zero. Ciò significa che un condensatore offre una resistenza trascurabile al passaggio di corrente alternata di grande frequenza. Al contrario, nel limite di frequenza nulla (cioè cor-

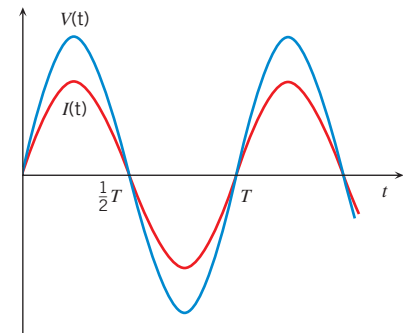
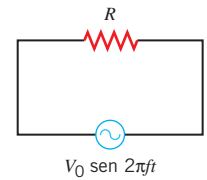


Figura 23.20

La tensione istantanea V e la corrente I in un circuito puramente resistivo sono in fase: ciò significa che aumentano e diminuiscono di pari passo.

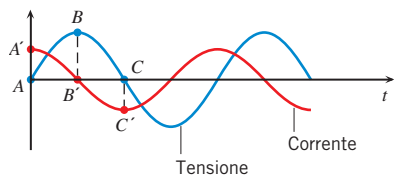
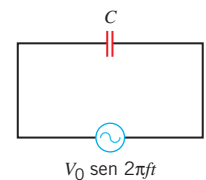
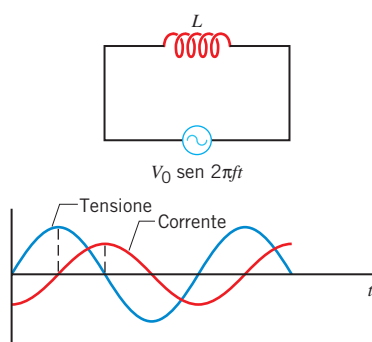


Figura 23.21

In un circuito contenente solo un condensatore, la tensione istantanea e la corrente non sono in fase. Al contrario, la corrente anticipa sulla tensione di un quarto di ciclo, cioè ha uno sfasamento di $+90^\circ$.


Figura 23.22

La tensione istantanea e la corrente in un circuito contenente solo un induttore non sono in fase. Infatti la corrente ritarda sulla tensione di un quarto di ciclo, cioè ha uno sfasamento di -90° .

rente continua) X_C diventa infinita e il condensatore si oppone così tanto al moto delle cariche che non passa corrente nel circuito.

■ Il circuito induttivo

La figura 23.22 mostra gli andamenti di tensione e corrente alternata in un circuito che contiene solo un induttore. La corrente è sfasata in ritardo di 90° rispetto alla tensione.

■ L'ANGOLO MATEMATICO

Sfasamento corrente-f.e.m. in un circuito RL

Secondo la legge di Faraday-Neumann dell'induzione elettromagnetica, in un induttore alimentato da una f.e.m. $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft$ esiste sempre una f.e.m. indotta $-LdI(t)/dt$ che si oppone al passaggio di corrente. In un circuito puramente induttivo la legge delle maglie diviene:

$$\mathcal{E}(t) - L \frac{dI(t)}{dt} = 0$$

da cui:

$$\mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft = L \frac{dI(t)}{dt} \quad (23.21)$$

L'equazione precedente è un'equazione differenziale lineare. Considerando che $I(0) = 0$, la soluzione dell'equazione è la funzione:

$$I(t) = -\frac{\mathcal{E}_0}{2\pi fL} \cos 2\pi ft \quad (23.22)$$

Per verificarlo basta sostituire la (23.22) nella (23.21) e constatare che si ha un'identità:

$$\mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft = L \frac{d\left(-\frac{\mathcal{E}_0}{2\pi fL} \cos 2\pi ft\right)}{dt}$$

da cui segue successivamente:

$$\mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft = -\frac{L\mathcal{E}_0}{2\pi fL} \frac{d(\cos 2\pi ft)}{dt}$$

$$\mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft = -\frac{\mathcal{E}_0}{2\pi f} (-2\pi f) \sin 2\pi ft$$

$$\mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft = \mathcal{E}_0 \sin 2\pi ft$$

La corrente dipende dal tempo secondo il fattore $-\cos 2\pi ft = \sin(2\pi ft - \pi/2)$, per cui è sfasata in ritardo di $\pi/2 = 90^\circ$ rispetto alla f.e.m.

In un induttore lo sfasamento di 90° fra corrente e tensione porta allo stesso risultato per la potenza media visto per il condensatore: la potenza media, e quindi l'energia media, utilizzata da un induttore in un circuito in corrente alternata è nulla.

Si può dimostrare che i valori efficaci di f.e.m. e corrente sono legati dalla relazione:

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = X_L I_{\text{eff}} \quad (23.23)$$

dove X_L è detta **reattanza induttiva** e si misura in ohm. Se L è l'induttanza del solenoide, la reattanza induttiva è:

$$X_L = 2\pi fL \quad (23.24)$$

All'aumentare della frequenza, la reattanza induttiva X_L tende ad aumentare. Ciò significa che un induttore offre una grande resistenza al passaggio di corrente alternata di frequenza elevata. Nel limite di frequenza nulla (cioè corrente continua), X_L diventa praticamente nulla e l'induttore non si oppone al passaggio di corrente.

23.8 Circuiti RLC in corrente alternata

Il più semplice circuito in corrente alternata contenente un resistore, un condensatore e un induttore è il circuito RLC in serie della figura 23.23. Si può dimostrare che la tensione efficace e la corrente efficace nel circuito RLC in serie sono legate dalla relazione:

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} Z \quad (23.25)$$

dove Z è detta **impedenza del circuito**:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (23.26)$$

L'angolo di sfasamento ϕ fra la corrente e la tensione in un circuito RLC in serie è tale che:

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (23.27)$$

L'angolo di sfasamento ha un ruolo importante nella potenza media \bar{P} dissipata nel circuito. Si può infatti dimostrare che:

$$\bar{P} = I_{\text{eff}} \mathcal{E}_{\text{eff}} \cos \phi \quad (23.28)$$

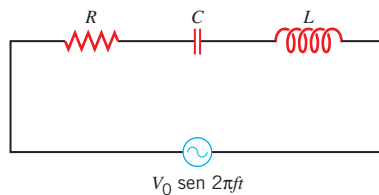


Figura 23.23

Un circuito RLC in serie contiene un resistore, un condensatore e un induttore.

ESEMPIO 4 ■ Corrente in un circuito RLC

Calcoliamo il valore efficace

Un circuito RLC in serie contiene un resistore con $R = 148 \, \Omega$, un condensatore con $C = 1,50 \, \mu\text{F}$ e un solenoide con $L = 35,7 \, \text{mH}$. Il circuito è alimentato da un alternatore con $f = 512 \, \text{Hz}$ ed $E_{\text{eff}} = 35,0 \, \text{V}$.

► Calcola il valore efficace della corrente nel circuito.

Ragionamento

La corrente efficace è legata alla f.e.m. efficace dalla relazione $E_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} Z$. Basta quindi determinare l'impedenza Z del circuito.

Dati e incognite

	Grandezze	Simboli	Valori	Commenti
Dati	Resistenza	R	148 Ω	
	Capacità	C	1,50 μF	1 $\mu\text{F} = 10^{-6} \, \text{F}$
	Induttanza	L	35,7 mH	1 mH = $10^{-3} \, \text{H}$
	Frequenza dell'alternatore	f	512 Hz	
	Valore efficace della f.e.m.	E_{eff}	35,0 V	
Incognita	Valore efficace della corrente	I_{eff}		

Il modello del problema

1 Corrente Dalla relazione $E_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} Z$ il valore efficace della corrente è:

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{Z}$$

Grandezza da determinare: Z

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{Z} \quad (1)$$

2 Impedenza Secondo la (23.26) l'impedenza è:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Grandezze da determinare: X_L e X_C

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{Z}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

3 Reattanza capacitiva e induttiva Sono date dalle relazioni:

$$X_L = 2\pi fL \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

quindi risulta:

$$X_L - X_C = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{Z}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$X_L - X_C = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}$$

Soluzione

Combinando i vari passaggi si ottiene algebricamente:

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{Z} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

Numericamente risulta:

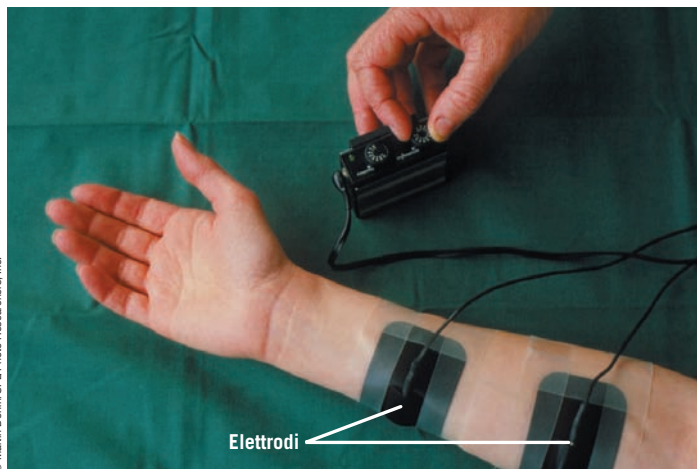
$$I_{\text{eff}} = \frac{35,0 \text{ V}}{\sqrt{(148 \Omega)^2 + \left[2\pi(512 \text{ Hz})(35,7 \cdot 10^{-3} \text{ H}) - \frac{1}{2\pi(512 \text{ Hz})(1,50 \cdot 10^{-6} \text{ F})}\right]^2}} = 0,201 \text{ A}$$

Fisica quotidiana

La stimolazione elettrica transcutanea dei nervi (TENS)



Una corrente elettrica alternata a bassa frequenza viene utilizzata nella stimolazione elettrica transcutanea dei nervi (TENS). La TENS è una terapia antidoloro che impiega frequenze comprese fra 40 Hz e 150 Hz. La corrente passa tra due elettrodi applicati sul corpo e inibisce la trasmissione degli impulsi nervosi che danno la sensazione del dolore (figura 23.24). Si ritiene che questa tecnica agisca sui canali dei neuroni che controllano il passaggio di ioni sodio attraverso la membrana cellulare (paragrafo 20.7).



Elettrodi

Figura 23.24

La TENS è applicata all'avambraccio nel tentativo di limitare la sintomatologia dolorosa dovuta a un sospetto danneggiamento del nervo radiale.

23.9 La risonanza nei circuiti elettrici

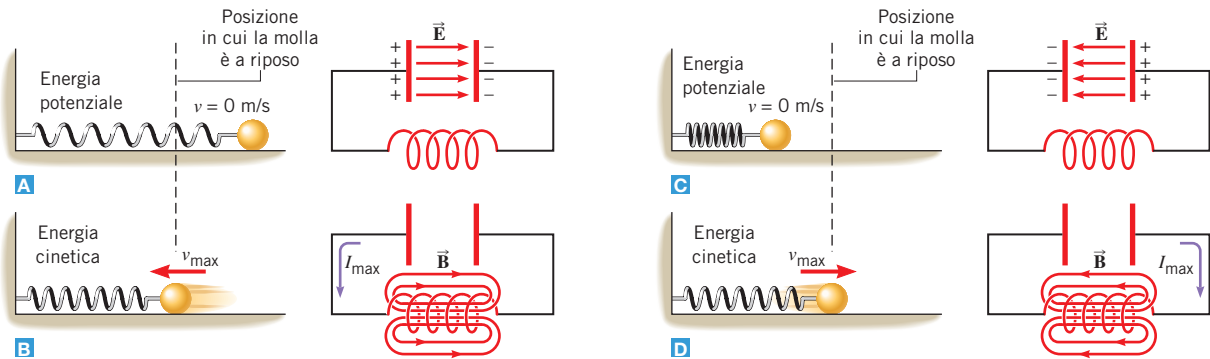
■ Analogie fra risonanza meccanica e risonanza elettrica

Si ha risonanza quando la frequenza della forza esterna applicata a un sistema ha la stessa frequenza di oscillazione del sistema. La figura 23.25 mostra l'analogia tra la risonanza in un circuito elettrico, privo di resistenza, e un sistema meccanico formato da una massa attaccata a una molla che si muove senza attrito su un piano orizzontale. Nella parte **A** la molla, dopo essere stata allungata, viene rilasciata in modo che la velocità iniziale della massa sia $v = 0$ m/s. Tutta l'energia è immagazzinata sotto forma di energia potenziale elastica. Quando la massa si muove la sua energia potenziale si trasforma gradualmente in energia cinetica. Nella parte **B** della figura la massa transita con la massima energia cinetica nel punto in cui la molla è a riposo. A causa della sua inerzia, la massa oltrepassa questa posizione e giunge ferma nella posizione (parte **C**) in cui la molla è compressa e tutta la sua energia cinetica si è convertita in energia potenziale elastica. La parte **D** è simile alla parte **B** ma con la velocità in verso opposto.

Nel caso elettrico, la figura 23.25A mostra un condensatore carico che è stato appena connesso a un solenoide. In questo istante l'energia è immagazzinata nel campo elettrico \vec{E} fra le armature del condensatore. Mentre il condensatore si scarica, il campo elettrico diminuisce e aumenta il campo magnetico \vec{B} attorno al solenoide creato dalla corrente che lo attraversa. La corrente massima e il campo magnetico massimo si hanno nell'istante in cui il condensatore si è completamente scaricato, come nella figura 23.25B. L'energia è ora immagazzinata interamente nel campo magnetico del solenoide. La tensione indotta nel solenoide mantiene una corrente elettrica fino a quando il condensatore si è nuovamente caricato, con polarità opposta rispetto a quella iniziale, come nella parte **C** della figura. Ancora una volta l'energia è tutta immagazzinata nel campo elettrico fra le armature. Nella parte **D** si ripete la parte **B** ma con versi opposti del campo elettrico e della corrente.

Figura 23.25

L'oscillazione di una massa attaccata a una molla è analoga alle oscillazioni dei campi elettrico e magnetico che avvengono rispettivamente nel condensatore e nell'induttore.



■ La frequenza di risonanza

In un circuito in corrente alternata si ha quindi il fenomeno della risonanza perché l'energia tende a circolare fra il campo elettrico del condensatore e il campo magnetico dell'induttore. La corrente efficace in un circuito RLC è $I_{\text{eff}} = \mathcal{E}_{\text{eff}}/Z$: per una data tensione, la corrente è massima quando l'impedenza $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ è minima. Ciò avviene quando

$$X_L - X_C = 2\pi f_0 L - \frac{1}{2\pi f_0 C} = 0$$

cioè per la **frequenza di risonanza**:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (23.29)$$

Notiamo che la frequenza di risonanza dipende dall'autoinduttanza e dalla capacità ma non dalla resistenza. Alla frequenza di risonanza, l'induttanza del circuito è puramente resistiva, $Z = R$: la f.e.m. e la corrente sono in fase.

Fisica quotidiana

I trasformatori



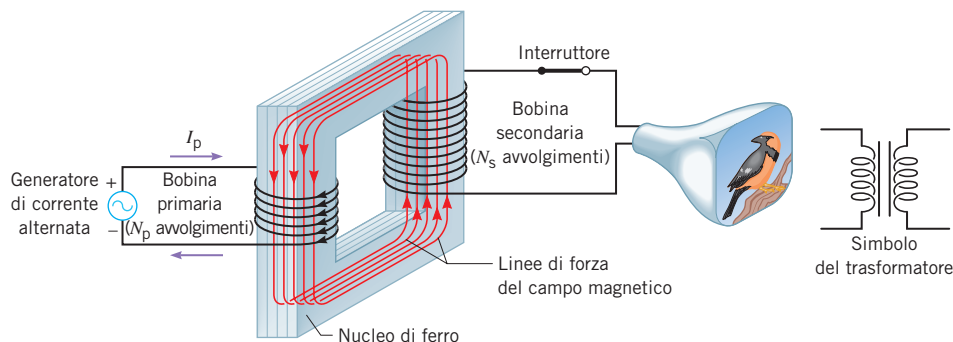
23.10 Il trasformatore

Un **trasformatore** è un dispositivo per aumentare o diminuire una tensione alternata. Per esempio, il caricabatterie del telefono cellulare contiene un trasformatore che riduce la tensione dai 220 V della rete a un valore molto più basso, generalmente attorno ai 3 V.

La figura 23.26 mostra lo schema di un trasformatore, che consiste in un nucleo di ferro sul quale sono avvolte due bobine: una bobina primaria con N_p avvolgimenti e una bobina secondaria con N_s avvolgimenti. Solo la bobina primaria è connessa a un generatore di tensione alternata.

Figura 23.26

Un trasformatore consiste di una bobina primaria e di una bobina secondaria avvolte attorno a un nucleo di ferro. Il flusso magnetico variabile prodotto dalla corrente della bobina primaria induce una f.e.m. nella bobina secondaria. A destra è riportato il simbolo del trasformatore.



La corrente alternata nella bobina primaria genera un campo magnetico variabile nel nucleo di ferro, che amplifica il campo magnetico e ne convoglia le linee di forza attraverso la bobina secondaria. Poiché il campo magnetico varia nel tempo, nella bobina secondaria la f.e.m. indotta \mathcal{E}_s nasce per mutua induzione:

$$\mathcal{E}_s = -N_s \frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t}$$

Nella bobina primaria la f.e.m. indotta \mathcal{E}_p è dovuta all'autoinduzione:

$$\mathcal{E}_p = -N_p \frac{\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})}{\Delta t}$$

Il termine $\Delta\Phi(\vec{\mathbf{B}})/\Delta t$ è lo stesso in entrambe le equazioni perché le bobine sono attraversate dallo stesso flusso. Dividendo membro a membro le due equazioni si ottiene:

$$\frac{\mathcal{E}_s}{\mathcal{E}_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

In un trasformatore di alta qualità la resistenza delle bobine è trascurabile, per cui le f.e.m. indotte \mathcal{E}_s ed \mathcal{E}_p sono praticamente uguali alle differenze di potenziale V_s e V_p ai capi delle bobine. La relazione $\mathcal{E}_s/\mathcal{E}_p = N_s/N_p$ è detta **equazione del trasformatore** ed è normalmente scritta in funzione della tensione ai capi di ciascuna bobina:

$$\text{Equazione del trasformatore} \quad \frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (23.30)$$

Il rapporto N_s/N_p è detto **rapporto di trasformazione**.

La facilità con cui i trasformatori possono cambiare il valore della tensione è una delle principali ragioni per cui si preferisce la corrente alternata a quella continua.

■ Energia di un trasformatore

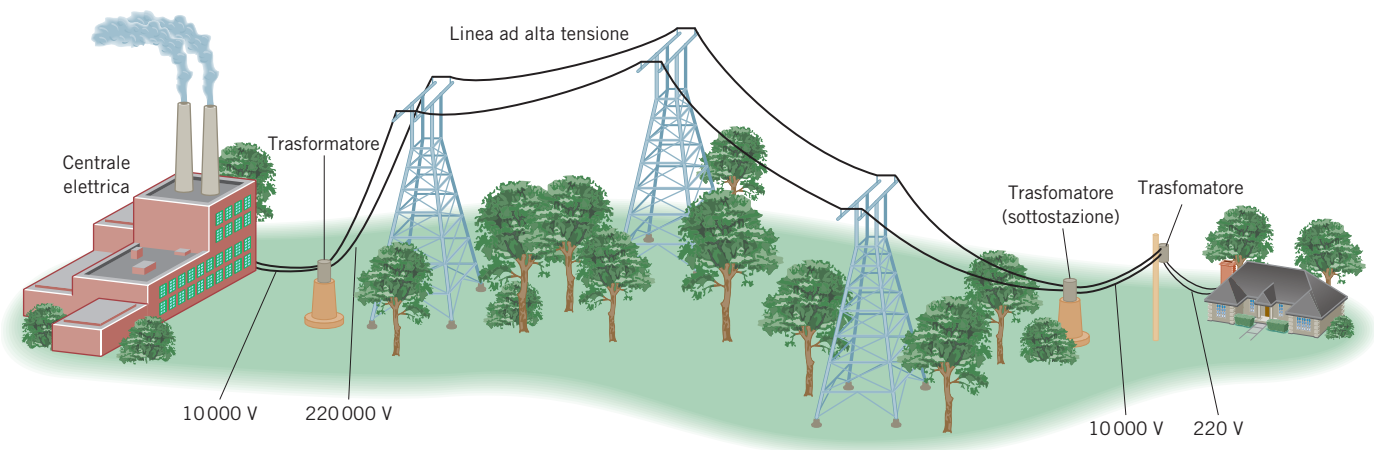
La tensione nel secondario può essere maggiore o minore di quella nel primario, ma l'energia non è creata né distrutta dal trasformatore. Nel caso ideale, le perdi-

te di energia all'interno del trasformatore sono trascurabili. Quindi l'energia che scorre nella bobina secondaria è uguale all'energia che scorre nella bobina primaria. La potenza media \bar{P}_p inviata al primario è uguale alla potenza media \bar{P}_s inviata al secondario: $\bar{P}_p = \bar{P}_s$. Ma $\bar{P} = IV$ e quindi $I_p V_p = I_s V_s$

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (23.31)$$

Notiamo che V_s/V_p è uguale al rapporto di trasformazione N_s/N_p , mentre I_s/I_p è uguale al rapporto inverso N_p/N_s . Quindi un trasformatore che incrementa il voltaggio nello stesso tempo diminuisce l'intensità di corrente, e un trasformatore che diminuisce il voltaggio aumenta l'intensità di corrente. Tuttavia la potenza rimane invariata perché $\bar{P}_p = \bar{P}_s$.

I trasformatori svolgono un ruolo importante nella trasmissione di potenza elettrica dalle centrali agli utenti finali. Ogni volta che viene trasmessa elettricità, nelle linee di trasmissione si verificano alcune perdite a causa dell'effetto Joule. Poiché la resistenza di un filo è proporzionale alla sua lunghezza, più lungo è il filo maggiori sono le perdite di energia. Le compagnie elettriche riducono tali perdite impiegando trasformatori che aumentano la tensione e riducono la corrente inviata. Una corrente minore significa una minore perdita, perché $P = I^2 R$, dove R è la resistenza dei fili di trasmissione.



La figura 23.27 mostra uno schema della distribuzione di energia elettrica. La centrale produce una tensione di 10000 V. Questa tensione è aumentata fino a 220000 V: le linee ad alta tensione trasportano l'energia per lunghe distanze. All'arrivo in una città, la tensione è ridotta a 10000 V. Per l'uso domestico essa viene ulteriormente ridotta a 220 V da un altro trasformatore e poi distribuita nelle abitazioni.

Figura 23.27

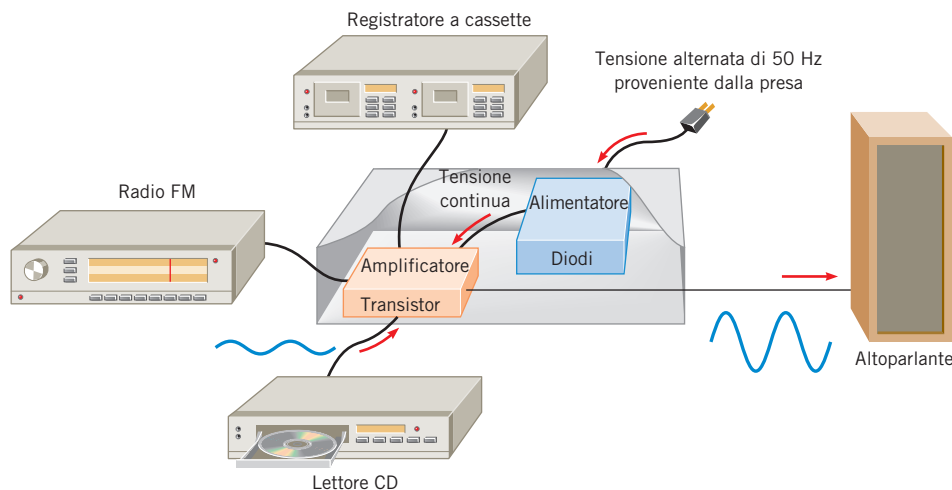
I trasformatori hanno un ruolo chiave nella trasmissione dell'energia elettrica.

23.11 Dispositivi a semiconduttore

I dispositivi a semiconduttore come i diodi e i transistor sono largamente utilizzati nella moderna elettronica. La figura 23.28 a pagina seguente mostra un sistema audio in cui piccole tensioni alternate, generate da un lettore CD, da una radio FM e da un registratore a cassette, sono amplificate in modo che possano pilotare i diffusori. Il circuito elettrico che effettua l'amplificazione utilizza un generatore di tensione continua. Nei dispositivi portatili la sorgente di energia è una semplice batteria. Nei dispositivi fissi, invece, la sorgente di energia è un circuito elettrico separato contenente diodi e altri elementi circuitali. Come vedremo, i diodi convertono la tensione alternata a 50 Hz della presa di casa nella tensione in corrente continua necessaria ai transistor dell'amplificatore.

Figura 23.28

In un normale impianto audio, i diodi sono usati nell'alimentatore per ottenere corrente continua a partire dalla corrente alternata fornita dalla presa elettrica. Questa corrente continua alimenta i transistor presenti nell'amplificatore che aumentano le piccole tensioni alternate prodotte dal lettore CD e dalle altre sorgenti.



■ **Semiconduttori di tipo n e di tipo p**

I diodi e i transistor sono costruiti con materiali semiconduttori, come il silicio e il germanio. Questi materiali non sono puri, perché a essi vengono aggiunte piccole quantità di altri atomi (circa una parte per milione), detti "impurità", che ne modificano la conducibilità.

Per esempio, la figura 23.29A mostra una schiera di atomi che rappresenta la struttura cristallina del silicio puro. Ciascun atomo di silicio ha quattro elettroni negli strati più esterni. Gli elettroni non sono liberi di muoversi nel metallo perché ciascuno di essi forma legami con gli elettroni degli atomi vicini. Per questa ragione il silicio e il germanio non sono buoni conduttori di elettricità. È possibile tuttavia aumentare la loro conducibilità aggiungendo piccole quantità di impurità, come atomi di fosforo o di arsenico, che hanno cinque elettroni negli strati più esterni. Così, quando un atomo di fosforo sostituisce un atomo di silicio nel cristallo, solo quattro dei suoi cinque elettroni più esterni sono coinvolti nei legami della struttura cristallina, mentre il quinto elettrone è relativamente libero di muoversi attraverso il cristallo, come mostra la parte B della figura. Gli elettroni mobili permettono al semiconduttore di condurre l'elettricità.

Il processo che consiste nell'aggiungere impurità si chiama **drogaggio**. Un semiconduttore drogato con impurità che apportano elettroni mobili è detto **semiconduttore di tipo n** (figura 23.30), perché le cariche mobili hanno segno *negativo*. Notiamo che un semiconduttore di tipo n è comunque elettricamente neutro perché contiene un uguale numero di cariche positive e negative.

È possibile drogare un cristallo di silicio anche con atomi che hanno solo tre elettroni negli strati più esterni, per esempio boro o gallio. Poiché manca il quarto elettrone, c'è una "lacuna" nel reticolo cristallino vicino all'atomo di boro, come mostra la figura 23.29C. Un elettrone può spostarsi verso questa lacuna da un vicino atomo di silicio: perciò la regione intorno al boro acquista un elettrone e diventa carica negativamente. Naturalmente l'elettrone che si è spostato lascia dietro di sé un'altra lacuna. Quest'ultima è carica positivamente, perché nasce dalla rimozione di un elettrone vicino a un atomo di silicio.

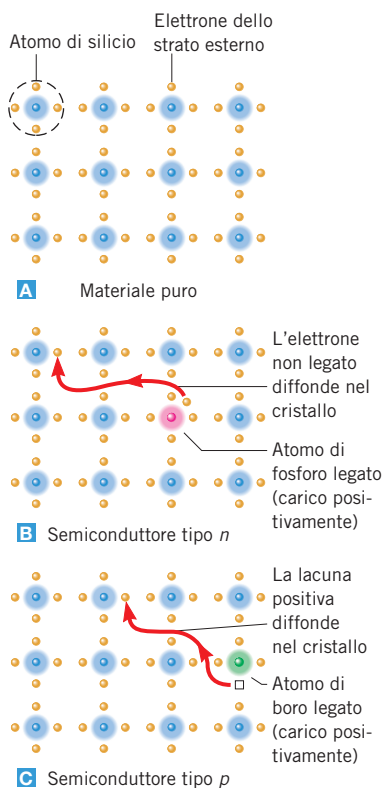
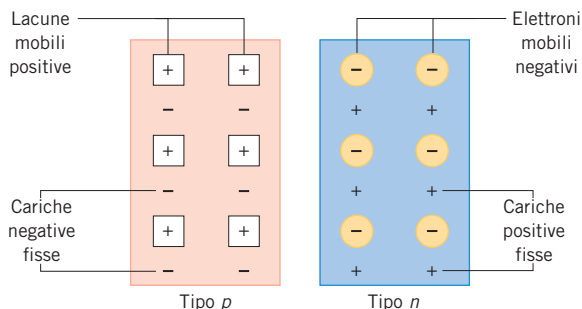


Figura 23.29

Un cristallo di silicio (A) puro, cioè non drogato, (B) drogato con atomi di fosforo per produrre un semiconduttore di tipo n e (C) drogato con atomi di boro per produrre un semiconduttore di tipo p .

Figura 23.30

Un semiconduttore di tipo p e un semiconduttore di tipo n .



La grande maggioranza di atomi nel reticolo è costituita da atomi di silicio, e così la lacuna è quasi sempre vicina a un altro atomo di silicio. Di conseguenza un elettrone può spostarsi in questa lacuna da uno degli atomi vicini, con il risultato che la lacuna si muove da un atomo all'altro, e nel cristallo si ha lo spostamento di una lacuna carica positivamente.

Grazie alle lacune il semiconduttore può condurre elettricità. In questo caso le cariche mobili sono *positive*. Un semiconduttore drogato con impurità che introducono lacune mobili cariche positivamente è detto **semiconduttore di tipo p** (figura 23.30).

■ Il diodo a semiconduttore

Un **diodo a giunzione $p-n$** è un dispositivo formato da un semiconduttore p e da un semiconduttore n . La giunzione $p-n$ fra i due materiali è fondamentale per la funzionalità dei diodi e dei transistor.

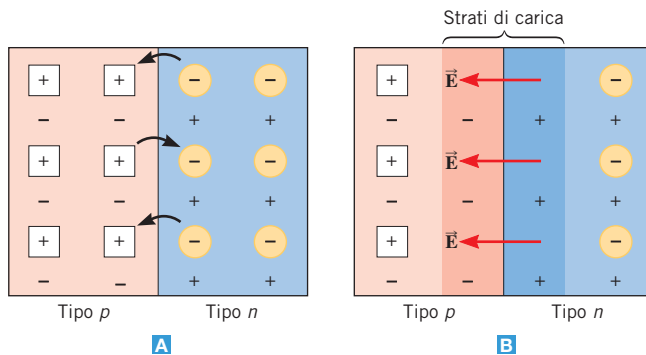


Figura 23.31

Nella giunzione fra i semiconduttori p e n , (A) elettroni e lacune mobili si combinano fra loro e (B) creano uno strato di carica positiva e uno di carica negativa. Il campo elettrico prodotto dagli strati di carica è \vec{E} .

La figura 23.31A mostra un semiconduttore p e uno n uniti insieme a formare un diodo. Gli elettroni mobili dal semiconduttore n e le lacune mobili dal semiconduttore p fluiscono attraverso la giunzione e si ricombinano. Tale processo lascia il semiconduttore n con uno strato di carica positiva e il semiconduttore p con uno strato di carica negativa, come mostra la parte B della figura. Gli strati carichi sui due lati della giunzione creano un campo elettrico \vec{E} simile a quello di un condensatore piano. Questo campo elettrico tende a opporsi a ogni ulteriore movimento di cariche attraverso la giunzione, e quindi il flusso di cariche cessa velocemente.

Supponiamo ora che una batteria sia connessa alla giunzione $p-n$, come in figura 23.32A, in cui il terminale negativo della batteria è connesso al semiconduttore n e il terminale positivo è connesso al semiconduttore p . In questa situazione, detta **polarizzazione diretta**, nel circuito circola corrente. Il terminale negativo della batteria respinge gli elettroni mobili nel semiconduttore n e questi si muovono verso la giunzione. In modo simile, il terminale positivo respinge le lacune del semiconduttore p e queste si muovono verso la giunzione. Nella giunzione gli elettroni si ricombinano con le lacune. Nello stesso tempo il terminale negativo fornisce nuovi elettroni al semiconduttore n e il terminale positivo estrae elettroni dal semiconduttore p , fornendo a esso nuove lacune. In tal modo si mantiene un flusso continuo di cariche e quindi una corrente elettrica.

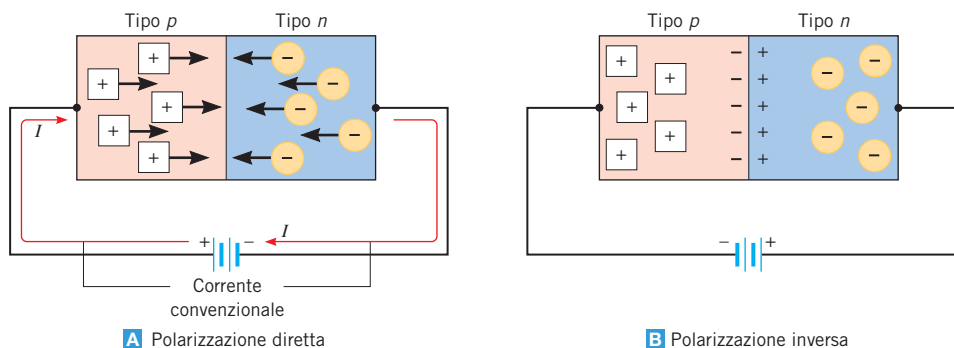
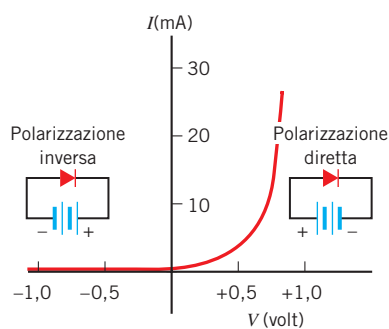


Figura 23.32

A. In caso di polarizzazione diretta attraverso il diodo passa una corrente apprezzabile.
B. In caso di polarizzazione inversa nel diodo non passa praticamente corrente.


Figura 23.33

La caratteristica tensione-corrente di un tipico diodo a giunzione $p-n$.

Fisica quotidiana

Il LED (*light-emitting diode*)


Fisica quotidiana

I circuiti rettificatori



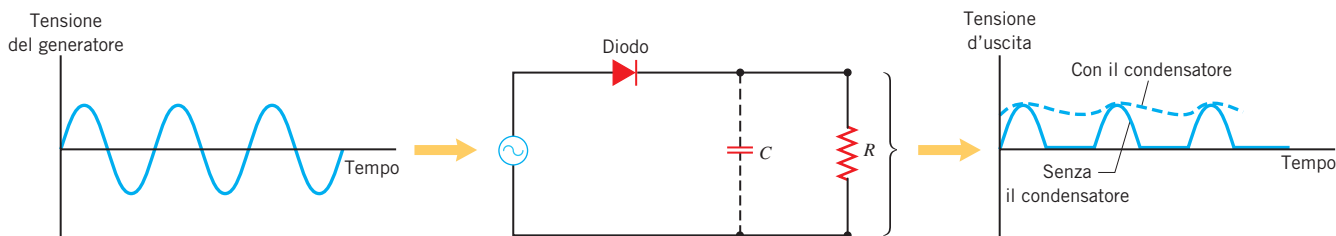
Nella figura 23.32B la polarità della batteria è invertita, e la giunzione è in uno stato detto **polarizzazione inversa**. La batteria forza gli elettroni nel semiconduttore n e le lacune nel semiconduttore p , allontanandoli dalla giunzione. Come risultato il potenziale attraverso la giunzione è opposto a quello della batteria, e solo una piccolissima corrente può attraversare il diodo.

Il diodo quindi è un **dispositivo unidirezionale** perché consente il passaggio di corrente elettrica solo in una direzione.

Il grafico di figura 23.33 mostra la dipendenza della corrente dall'intensità e dalla polarità del voltaggio applicato a un diodo a giunzione $p-n$. Il valore esatto della corrente dipende dalla natura del semiconduttore e dalla quantità di drogaggio. Nella figura è mostrato anche il simbolo per il diodo. La punta della freccia indica il verso della corrente convenzionale nel diodo nel caso di polarizzazione diretta. Nel caso di polarizzazione inversa, il potenziale positivo è dall'altro lato della freccia.

Un tipo di diodo è il LED, acronimo di *light-emitting diode*, cioè diodo a emissione di luce. I LED sono molto comuni nei dispositivi elettronici, come i computer e i sistemi stereofonici, e possono emettere luce gialla, rossa o verde. Un LED emette quando è polarizzato in modalità diretta e gli elettroni e le lacune si ricombinano nella giunzione $p-n$. I LED in commercio sono in genere composti da gallio drogato con arsenico o fosforo.

I diodi sono dispositivi unidirezionali usati comunemente nei **circuiti rettificatori**, che convertono corrente alternata in corrente continua. La figura 23.34, per esempio, mostra un circuito in cui una corrente fluisce in una resistenza R solo quando il generatore alternato alimenta il diodo con polarizzazione diretta. Poiché la corrente scorre solo durante metà di ogni ciclo del generatore, il circuito è detto *rettificatore a semionda*.


Figura 23.34

Un circuito rettificatore a semionda, insieme a un condensatore e a un trasformatore (non mostrato), costituisce un alimentatore in corrente continua perché il rettificatore converte la tensione alternata in tensione continua.

Un grafico della tensione di uscita attraverso il resistore mostra che è presente solo la semionda positiva di ogni ciclo. Se si aggiunge un condensatore in parallelo al resistore, come riportato nella figura, il condensatore si carica e impedisce che la tensione si annulli durante due semicicli successivi.

Quando un circuito come quello di figura 23.34 include un condensatore e anche un trasformatore per ottenere la tensione voluta, il circuito forma un alimentatore.

Nel sistema audio visto in figura 23.28 l'alimentatore riceve una tensione alternata da 50 Hz dalla presa a muro e fornisce una tensione continua che è usata dai transistor dell'amplificatore.

■ Celle solari

Le **celle solari** usano giunzioni $p-n$ per convertire la luce solare direttamente in elettricità, come mostra la figura 23.35. La cella solare nella figura consiste di un semiconduttore p che circonda un semiconduttore n . Nei lati della giunzione si formano due strati di cariche opposte che creano un campo elettrico \vec{E} diretto dallo strato n allo strato p . La copertura esterna dello strato p è così sottile che la luce solare penetra negli strati di carica e ionizza alcuni atomi presenti in essi.

Nel processo di ionizzazione l'energia della luce solare rimuove un elettrone da un atomo e lascia una lacuna positiva. Come mostra la figura, il campo elettrico negli strati di carica allontana gli elettroni e le lacune dalla giunzione. Gli elettroni

Fisica quotidiana

Le celle solari



si muovono verso la parte n e le lacune verso la parte p . Come risultato la luce solare fa sì che nella cella solare nascano un terminale positivo e uno negativo, simili ai terminali di una batteria.

Una cella solare produce una corrente molto piccola: per questa ragione le celle solari sono sempre montate su pannelli di grandi dimensioni, come quelli di figura 23.36.



Figura 23.36

La propulsione del prototipo Helios è garantita dall'energia solare. Le celle solari sono montate sulle ali.

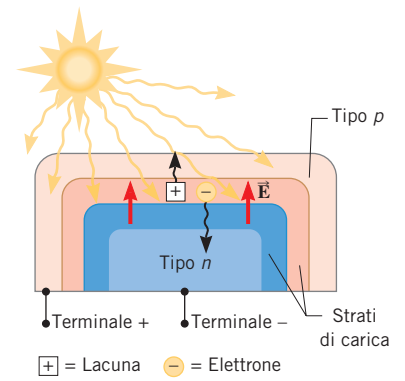


Figura 23.35

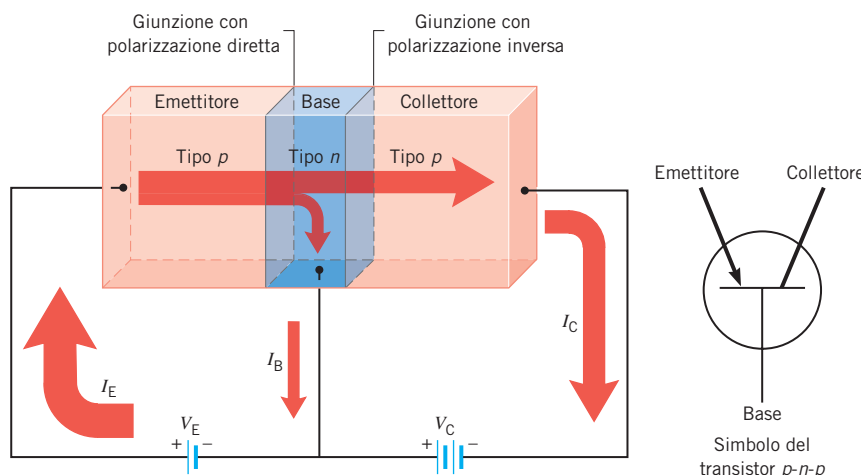
Una cella solare formata da una giunzione $p-n$. Quando la luce solare incide su di essa, la cella solare agisce come una batteria con i terminali $+$ e $-$.

■ Transistor

Esistono vari tipi di transistor. Un tipo è il **transistor a giunzione bipolare**, che consiste di due giunzioni $p-n$ formate da tre strati di semiconduttori drogati. Come indica la figura 23.37, ci sono transistor $p-n-p$ e $n-p-n$. In entrambi i casi la zona centrale è molto sottile rispetto alle due zone esterne.

Il transistor è molto utilizzato nei circuiti per amplificare piccole tensioni e ha lo stesso ruolo di una valvola in una conduttura: come un piccolo cambiamento nell'apertura della valvola provoca una grande variazione nel flusso d'acqua attraverso la conduttura, così una piccola variazione nella tensione in ingresso provoca una grande variazione nella tensione d'uscita del transistor.

La figura 23.38 mostra un transistor $p-n-p$ connesso a due batterie, indicate con V_E e V_C . Le tensioni V_E e V_C sono applicate in modo tale che la giunzione $p-n$ sulla sinistra ha una polarizzazione diretta mentre la giunzione $p-n$ sulla destra ha una polarizzazione inversa. La tensione V_C è in genere molto più grande della tensione V_E per una ragione che discuteremo di seguito. La figura mostra anche i simboli e la nomenclatura delle tre parti di un transistor: l'**emettitore**, la **base** e il **collettore**. La freccia punta nel verso della corrente convenzionale attraverso l'emettitore.



Fisica quotidiana

I transistor

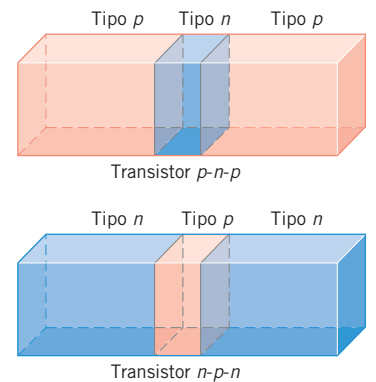


Figura 23.37

Esistono due tipi di transistor con giunzioni bipolari: $p-n-p$ e $n-p-n$.

Figura 23.38

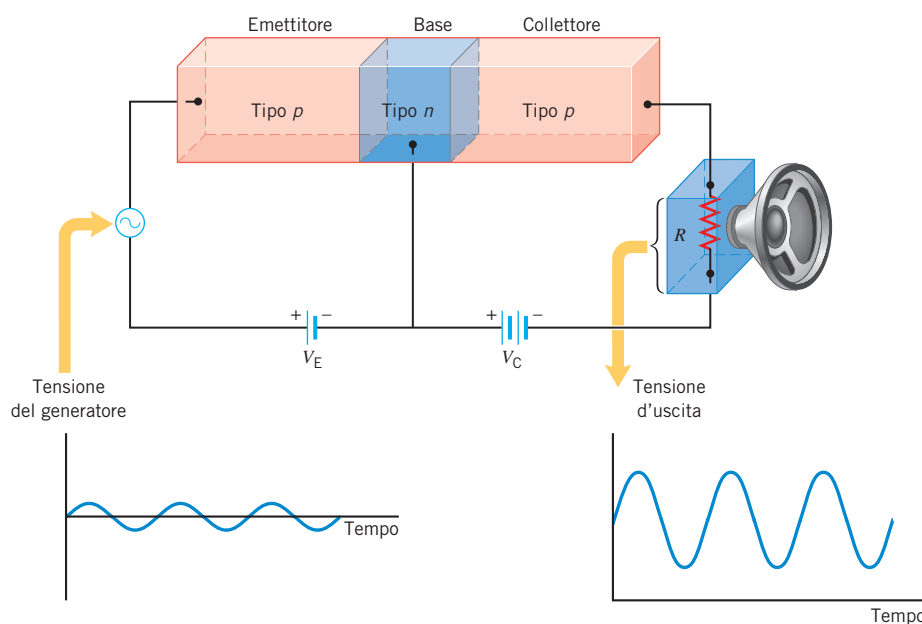
Un transistor $p-n-p$ e i voltaggi di polarizzazione V_E e V_C . Nel simbolo per il transistor $p-n-p$ l'emettitore è rappresentato da una freccia che indica il verso della corrente convenzionale attraverso l'emettitore.

Il terminale positivo di V_E spinge gli elettroni mobili nel materiale n dell'emettitore verso la giunzione emettitore-base. Tale giunzione è polarizzata in modalità diretta e così le lacune penetrano con facilità nella base, dove risentono della forte influenza di V_C e sono attratte dal suo terminale negativo. Siccome la base è molto sottile (circa 10^{-6} m), circa il 98% delle lacune attraversa la base e va verso il collettore. Il rimanente 2% si ricombina con gli elettroni liberi nella base e origina una piccola corrente di base I_B . Come mostra la figura, le lacune in moto nell'emettitore e nel collettore formano correnti indicate con I_E e I_C . La legge dei nodi applicata alla giunzione stabilisce che $I_C = I_E - I_B$.

Poiché la corrente di base I_B è piccola, la corrente del collettore è determinata quasi totalmente da quella dell'emettitore ($I_C = I_E - I_B \approx I_E$). Ciò significa che una variazione di I_E causa una variazione di I_C quasi della stessa entità. Inoltre, una variazione consistente di I_E può essere causata da una piccola variazione del voltaggio V_E che garantisce la polarizzazione diretta. Ce lo dimostra la figura 23.33, dove notiamo com'è ripida la curva corrente-tensione per una giunzione $p-n$: piccole variazioni nel voltaggio della polarizzazione diretta danno luogo a grandi variazioni della corrente.

Figura 23.39

Il transistor $p-n-p$ della figura amplifica la tensione di un piccolo generatore e produce una tensione più grande attraverso la resistenza R .



Con l'aiuto della figura 23.39 si comprende perché una piccola variazione nella tensione d'ingresso porta a una grande variazione della tensione d'uscita. La figura mostra un generatore connesso in serie con la batteria V_E e una resistenza R in serie con il collettore. La tensione del generatore potrebbe essere fornita da varie altre sorgenti, come per esempio un lettore CD, mentre la resistenza R potrebbe rappresentare un diffusore acustico. Il generatore introduce piccole variazioni nella polarizzazione diretta della giunzione emettitore-base e quindi provoca grandi variazioni nella corrente I_C che lascia il collettore e attraversa la resistenza R . Come risultato, la tensione d'uscita attraverso R è la versione amplificata della tensione d'ingresso fornita dal generatore.

Il funzionamento di un transistor $n-p-n$ è simile a quello di un transistor $p-n-p$. La principale differenza è che la tensione di polarizzazione e il verso della corrente sono invertiti.

L'aumento di potenza elettrica all'uscita del transistor non è dovuto al transistor ma è fornito dalla sorgente esterna V_C . Il transistor funziona come una valvola automatica e si limita a far sì che i deboli segnali del generatore controllino la potenza prelevata dalla sorgente V_C e inviata alla resistenza R .

Oggi è possibile costruire circuiti formati da decine di migliaia di transistor, diodi e resistori su sottili wafer di silicio con dimensioni inferiori a un centimetro (figura 23.40). Questi *circuiti integrati* sono alla base del funzionamento di dispositivi elettronici come computer, telefoni cellulari e orologi.

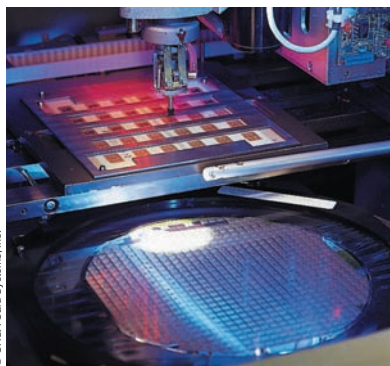


Figura 23.40

I chip di circuiti integrati sono realizzati su wafer di materiale semiconduttore. La foto mostra un wafer contenente molti chip e alcune smart card contenenti chip.

L'ordine di grandezza

Quanta energia si produrrebbe ogni giorno se l'1% degli italiani pedalasse per 10 minuti su una cyclette collegata a un generatore di tensione?

Per calcolare l'energia che l'1% degli italiani riuscirebbe a produrre pedalando per 10 minuti al giorno su una cyclette collegata a un generatore di tensione, bisogna moltiplicare la quantità di energia accumulata da ciascun pedalatore per il numero dei pedalatori.



IL MODELLO

(energia prodotta pedalando dall'1% degli italiani) = (percentuale degli italiani considerata) (popolazione italiana) (energia media prodotta pedalando la speciale cyclette per 10 minuti)

I NUMERI

■ **Popolazione italiana** = $59\,619\,290$ ab = $6 \cdot 10^7$ ab

■ **Energia media prodotta pedalando la speciale cyclette per 10 minuti** =
 = (potenza prodotta mediamente dalla speciale cyclette) (durata dell'allenamento in secondi) =
 = $(200 \text{ W}) (600 \text{ s}) = 1,2 \cdot 10^5 \text{ J} = 0,03 \text{ kW} \cdot \text{h}$

IL RISULTATO

energia prodotta pedalando dall'1% degli italiani =
 = $(1/100) (6 \cdot 10^7 \text{ ab}) (0,03 \text{ kW} \cdot \text{h}) = 2 \cdot 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h} =$
 = $20 \text{ MW} \cdot \text{h}$

L'ordine di grandezza è: $10^1 \text{ MW} \cdot \text{h}$

L'energia elettrica che l'1% degli italiani riuscirebbe a produrre ogni giorno pedalando per 10 minuti su una speciale cyclette collegata a un generatore di tensione è circa $20 \text{ MW} \cdot \text{h}$.

Un paragone Pedalando per 10 minuti, mezzo milione di italiani produrrebbe una quantità di energia elettrica per la quale sarebbe stato necessario bruciare la seguente quantità di petrolio:

(energia elettrica prodotta) (quantità di petrolio per unità di energia elettrica) =
 = $(20 \text{ MW} \cdot \text{h}) (7,7 \cdot 10^{-8} \text{ kg/J}) =$
 = $[20 \cdot 10^6 (3,6 \cdot 10^3) \text{ J}] (7,7 \cdot 10^{-8} \text{ kg/J}) =$
 = $(7 \cdot 10^{10} \text{ J}) (7,7 \cdot 10^{-8} \text{ kg/J}) = 5 \cdot 10^3 \text{ kg} = 5 \text{ tonnellate}$

Le fonti

Popolazione italiana: Statistiche demografiche ISTAT (<http://demo.istat.it/bilmens2007gen/index.html>)

Energia media prodotta pedalando la speciale cyclette per 10 minuti: The New York Times (www.nytimes.com/2008/09/25/fashion/25gym.html)

Stima l'ordine di grandezza



Quante ore dovresti pedalare, se fossi ben allenato, per produrre un decimo dell'energia elettrica che consumi quotidianamente?

IL MODELLO

(durata del tuo allenamento) = $(1/10)$ (consumo quotidiano medio di energia elettrica di un italiano) / (potenza ricavabile dalla cyclette con la pedalata di una persona allenata)

I NUMERI

Consumo quotidiano medio di energia elettrica di un italiano =
 = $(1/365)$ (energia elettrica consumata annualmente in Italia) / (popolazione italiana) =
 = $(1/365) (3,3 \cdot 10^{11} \text{ kW} \cdot \text{h}) / (6 \cdot 10^7 \text{ ab}) = 15 \text{ kW} \cdot \text{h} = 5,4 \cdot 10^7 \text{ J}$

Potenza ricavabile dalla cyclette con la pedalata di una persona allenata = 400 W

IL RISULTATO

Durata dell'allenamento = h

Le fonti

Energia elettrica consumata annualmente in Italia: IEA, International Energy Agency: *Key world energy statistics*, pag. 52 (www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf)

Potenza ricavabile dalla cyclette con la pedalata di una persona allenata: Pedal Power Generator (www.los-gatos.ca.us/davidbu/pedgen.html)

1. Forza elettromagnetica indotta e correnti indotte

Induzione elettromagnetica

- L'induzione elettromagnetica è il fenomeno in cui una f.e.m. è indotta in un circuito mediante un campo magnetico. La f.e.m. è detta f.e.m. indotta e la corrente che si origina è detta corrente indotta.

2. La f.e.m. indotta in un conduttore in moto

F.e.m. cinetica

- Una f.e.m. cinetica \mathcal{E} è indotta in una sbarretta conduttrice di lunghezza L quando la sbarretta si muove con velocità v in un campo magnetico di intensità B secondo la relazione:

$$\mathcal{E} = vBL \quad (23.1)$$

L'equazione (23.1) vale nel caso in cui la velocità della sbarretta, la lunghezza della sbarretta e il campo magnetico sono mutuamente perpendicolari.

3. La legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann

Legge di Faraday-Neumann

- La legge di Faraday-Neumann dell'induzione elettromagnetica stabilisce che la f.e.m. media indotta in un circuito è

$$\mathcal{E} = -\frac{\Phi - \Phi_0}{t - t_0} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (23.2)$$

dove $\Delta\Phi$ è la variazione di flusso magnetico attraverso una qualsiasi superficie delimitata dal circuito e Δt è l'intervallo di tempo in cui avviene questa variazione. La f.e.m. di movimento è un caso particolare di f.e.m. indotta.

4. La legge di Lenz

Legge di Lenz

- La legge di Lenz fornisce un metodo per determinare la polarità di una f.e.m. indotta. La corrente indotta ha un verso tale da generare un campo magnetico indotto che si oppone alla variazione del flusso magnetico che l'ha provocata. La legge di Lenz è una conseguenza del principio di conservazione dell'energia.

Correnti di Foucault

- A causa dell'induzione elettromagnetica si creano correnti indotte chiamate correnti di Foucault o anche correnti parassite perché dissipano molta energia.

5. Mutua induzione e autoinduzione

F.e.m. dovuta a mutua induzione

- La mutua induzione è il fenomeno in cui una variazione di corrente nella bobina primaria induce una f.e.m. nella bobina secondaria.

Mutua induzione

- La f.e.m. media \mathcal{E}_s indotta nella bobina secondaria da una variazione ΔI_p della corrente nella bobina primaria è:

$$\mathcal{E}_s = -M \frac{\Delta I_p}{\Delta t} \quad (23.4)$$

dove Δt è l'intervallo di tempo in cui ha luogo la variazione. La costante M è la mutua induttanza fra le due bobine e si misura in henry (H).

F.e.m. dovuta ad autoinduzione e induttanza

- L'autoinduzione è il fenomeno in cui una variazione ΔI della corrente in una bobina induce una f.e.m. media nella stessa bobina secondo la legge:

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (23.6)$$

La costante L è detta induttanza della bobina e si misura in henry.

Induttanza di un solenoide

- Nel caso di un solenoide lungo l , con N avvolgimenti ciascuno di area A :

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{l} A \quad (23.7)$$

Energia immagazzinata in un solenoide

- Per generare una corrente I in un solenoide un agente esterno deve compiere un lavoro. Questo lavoro è immagazzinato come energia nel solenoide secondo la relazione:

$$\text{energia} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (23.8)$$

L'energia di un solenoide è immagazzinata nel suo campo magnetico.

Densità di energia del campo magnetico

- In ogni punto dello spazio in cui esiste un campo magnetico \vec{B} (in aria, nel vuoto o in un materiale non magnetico) la densità di energia, o energia immagazzinata per unità di volume, è:

$$\text{densità di energia} = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (23.9)$$

6. L'alternatore e la corrente alternata

F.e.m. di un alternatore

- Nella sua forma più semplice, un alternatore consiste di una spira che ruota in un campo magnetico uniforme \vec{B} . La f.e.m. prodotta da questo generatore è:

$$\mathcal{E} = \omega AB \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t \quad (23.10)$$

dove A è l'area della spira, ω è la velocità angolare (in rad/s) della spira ed $\mathcal{E}_0 = \omega AB$ è la f.e.m. massima. La velocità angolare in rad/s è legata alla frequenza f in cicli/s o Hz dalla relazione $\omega = 2\pi f$.

Corrente in un circuito di soli resistori

- In un circuito contenente solo resistori e alimentato da una f.e.m. $\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ la corrente alternata è:

$$I(t) = I_0 \sin \omega t \quad (23.10c)$$

dove $I_0 = \mathcal{E}_0/R$ è il valore massimo dell'intensità di corrente.

Valori efficaci

- Nel caso di correnti e tensioni sinusoidali, i valori efficaci di corrente e tensione sono legati ai corrispondenti valori di picco dalle seguenti equazioni:

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (23.15)$$

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}} \quad (23.16)$$

Potenza media

- La potenza in un circuito in corrente alternata oscilla nel tempo. La potenza media è data da:

$$\bar{P} = I_{\text{eff}} \mathcal{E}_{\text{eff}} \quad (23.14)$$

7. I circuiti semplici in corrente alternata

Reattanza capacitiva

- In un circuito in corrente alternata la tensione efficace sulle armature di un condensatore è legata alla corrente efficace I_{eff} dalla relazione:

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = X_C I_{\text{eff}} \quad (23.19)$$

dove X_C , detta reattanza capacitiva, si misura in ohm ed è data da:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (23.20)$$

in cui f è la frequenza e C è la capacità del condensatore.

Sfasamento fra tensione e corrente in un condensatore ■ La corrente alternata in un condensatore anticipa la tensione di un angolo di 90° ($\pi/2$ radianti). In conseguenza di ciò, un condensatore in media non dissipa energia elettrica.

Reattanza induttiva ■ In un circuito in corrente alternata la tensione efficace in un induttore è legata alla corrente efficace I_{eff} dalla relazione:

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = X_L I_{\text{eff}} \quad (23.23)$$

dove X_L , detta reattanza induttiva, si misura in ohm ed è data da:

$$X_L = 2\pi fL \quad (23.24)$$

in cui f è la frequenza e L è l'induttanza.

Sfasamento fra tensione e corrente in un induttore ■ La corrente alternata in un induttore ritarda rispetto alla tensione di un angolo di 90° ($\pi/2$ radianti). In conseguenza di ciò, un induttore come un condensatore in media non dissipa energia elettrica.

8. Circuiti RLC in corrente alternata

Impedenza ■ Quando un resistore, un condensatore e un induttore sono connessi in serie la tensione efficace e la corrente efficace nel circuito RLC sono legate dalla relazione:

$$\mathcal{E}_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} Z \quad (23.25)$$

dove l'impedenza Z (misurata in ohm) è data dall'espressione:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2} \quad (23.26)$$

in cui R , X_C e X_L sono rispettivamente la resistenza, la reattanza capacitiva e la reattanza induttiva del circuito.

Sfasamento fra tensione e corrente ■ L'angolo di sfasamento ϕ fra la corrente e la tensione in un circuito RLC in serie è tale che:

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (23.27)$$

Potenza media dissipata ■ Solo il resistore dissipa potenza. La potenza media \bar{P} dissipata nel circuito è:

$$\bar{P} = I_{\text{eff}} \mathcal{E}_{\text{eff}} \cos \phi \quad (23.28)$$

9. La risonanza nei circuiti elettrici

Frequenza di risonanza ■ Un circuito RLC in serie ha una frequenza di risonanza:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (23.29)$$

dove L è l'induttanza e C la capacità.

10. Il trasformatore

Equazione del trasformatore ■ Un trasformatore consiste di una bobina primaria con N_p avvolgimenti e una bobina secondaria con N_s avvolgimenti. Se la resistenza delle bobine è trascurabile, la f.e.m. \mathcal{E}_p ai capi della bobina primaria e la f.e.m. \mathcal{E}_s ai capi della bobina secondaria sono legate dalla relazione nota come equazione del trasformatore:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (23.30)$$

dove N_s/N_p è detto rapporto di trasformazione.

Rapporto fra le correnti del primario e del secondario

- Un trasformatore funziona in corrente alternata ma non in corrente continua. Se il trasformatore ha il 100% di efficienza nel trasferire potenza dal primario al secondario, il rapporto fra le correnti del secondario I_s e del primario I_p è:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad (23.31)$$

11. Dispositivi a semiconduttore

Semiconduttore di tipo n

- In un semiconduttore di tipo n , la corrente è dovuta al moto degli elettroni. Un materiale di tipo n viene prodotto drogando un semiconduttore come il silicio con piccole quantità di atomi come il fosforo.

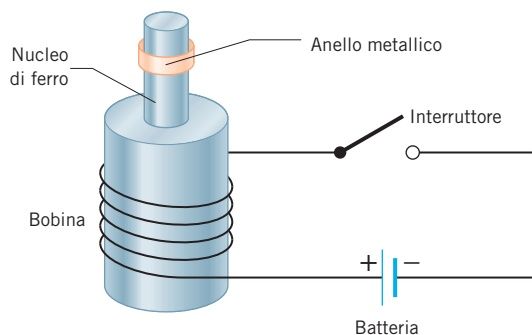
Semiconduttore di tipo p

- In un semiconduttore di tipo p , la corrente è dovuta al moto delle lacune positive. Un materiale di tipo p viene prodotto drogando un semiconduttore come il silicio con piccole quantità di atomi come il boro. Questi due tipi di semiconduttori sono usati nei diodi a giunzione $p-n$, nei LED, nelle celle solari e nei transistor a giunzione bipolare $n-p-n$ e $p-n-p$.

Esercizi

Domande

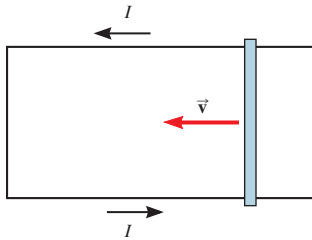
- 1 Supponi che la calamita e la bobina della figura 23.1 si muovano con la stessa velocità rispetto al terreno. Si originerebbe una f.e.m. indotta nella bobina?
- 2 Un fulmine può indurre una corrente in un dispositivo elettrico anche se non lo colpisce direttamente. Perché?
- 3 Considera gli avvolgimenti di filo della figura 23.2. La legge di Lenz prevede il verso della corrente che si origina in essi quando vengono tirati come indicato?
- 4 Quando l'interruttore del circuito in figura viene chiuso, nella bobina scorre una corrente e l'anello metallico si muove. In quale verso?
- 5 I capi di un filo rettilineo molto lungo sono connessi ai terminali di un generatore in corrente alternata e si misura l'intensità di corrente. Il filo viene poi disconnesso, avvolto a formare una bobina con molte spire e quindi riconnesso al generatore. In quale delle due situazioni il generatore fornisce la corrente più intensa?
- 6 È possibile che due circuiti RLC in serie abbiano la stessa frequenza di risonanza avendo:
 - ▶ valori diversi di R ?
 - ▶ valori diversi di C e L ?



Test

- 1 Una spira conduttrice è posta in un campo magnetico che è perpendicolare al suo asse. Quale delle seguenti azioni non genera una corrente indotta nella spira?
- A Ruotare la spira attorno al suo proprio asse.
 B Aumentare l'intensità del campo magnetico.
 C Diminuire l'intensità del campo magnetico.
 D Diminuire l'area della spira.

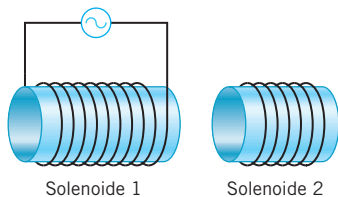
- 2 Un'asta conduttrice si muove verso sinistra a velocità costante \vec{v} su due guide conduttrici, come mostra la figura. La presenza di un campo magnetico costante genera la corrente indotta indicata. Come è diretto il campo magnetico?
- A Verso destra.
 B Verso sinistra.
 C Uscente dalla pagina.
 D Entrante nella pagina.



- 3 Una spira circolare di rame è posta perpendicolarmente a un campo magnetico di 0,50 T. Per effetto di forze esterne, l'area della spira diminuisce con un tasso di $1,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Qual è la f.e.m. indotta nella spira?
- A $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ V}$
 B $6,3 \cdot 10^{-4} \text{ V}$
 C $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ V}$
 D $7,9 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

- 4 Un campo magnetico è perpendicolare a una bobina composta da 120 avvolgimenti rettangolari di lati 0,15 m e 0,30 m. Quando il campo magnetico cambia da 0,1 T a 1,5 T in un intervallo di tempo Δt , nella bobina si origina una f.e.m. di $-1,2 \text{ V}$. Determina Δt .
- A 0,054 s
 B 0,13 s
 C 1,6 s
 D 6,3 s

- 5 I due solenoidi mostrati in figura hanno l'asse in comune. È noto che la mutua induttanza è 6,0 mH. La corrente nel solenoide 1 cambia con un tasso di 3,5 A/s. Qual è la f.e.m. indotta nel solenoide 2?

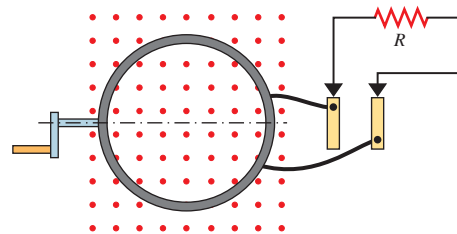


- A $5,8 \cdot 10^{-4} \text{ V}$
 B $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ V}$
 C $2,1 \cdot 10^{-2} \text{ V}$
 D $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ V}$

- 6 La corrente in un solenoide passa da 1,2 A a 0,6 A in 1 s. Quale delle seguenti affermazioni relative all'induttanza del solenoide è vera?
- A Rimane invariata.
 B Aumenta di un fattore 2.
 C Aumenta di un fattore 4.
 D Diminuisce di un fattore 2.

- 7 Un solenoide con una resistenza di $0,15 \Omega$ ha un'induttanza di 0,083 H. Una batteria da 5,0 V è connessa agli estremi del solenoide. La corrente nel solenoide raggiunge il suo valore massimo. Quanta energia è immagazzinata dal solenoide?
- A 92 J
 B 46 J
 C 16 J
 D 4,1 J

- 8 Un alternatore ha una bobina circolare con 275 avvolgimenti e un raggio di 0,045 m. La bobina ruota in un campo magnetico di 0,500 T, come mostra la figura. A quale velocità angolare deve ruotare la bobina perché la f.e.m. massima sia 175 V?
- A 28 rad/s
 B 59 rad/s
 C 130 rad/s
 D 200 rad/s



- 9 In un asciugacapelli di potenza 1500 W scorre una corrente che varia nel tempo secondo la legge

$$I(t) = (17,7 \text{ A}) \text{ sen } [(120 \text{ Hz}) \pi t]$$

La frequenza e il valore efficace della corrente sono rispettivamente:

- A 120 Hz 12,5 A
 B 120 Hz 17,7 A
 C 60 Hz 12,5 A
 D 60 Hz 17,7 A

- 10 Un ferro da stiro è alimentato da una f.e.m.

$$f(t) = (220 \text{ V}) \text{ sen } [(100 \text{ Hz}) \pi t]$$

In esso scorre una corrente

$$I(t) = (10 \text{ A}) \text{ sen } [(100 \text{ Hz}) \pi t]$$

Qual è la potenza dissipata dal ferro?

- [A] 2,2 kW
 [B] 1,6 kW
 [C] 1,1 kW
 [D] 500 W
- 11** Una batteria è connessa a un circuito: dopo pochi istanti la corrente si annulla. Quando lo stesso circuito è alimentato da un alternatore, la corrente oscilla. Puoi concludere che nel circuito sono presenti:

[A] solo resistori.

[B] solo condensatori.

[C] solo induttori.

[D] induttori e resistori ma non condensatori.
- 12** Quando la frequenza di un circuito in corrente alternata diminuisce, la corrente nel circuito aumenta. Puoi concludere che nel circuito sono presenti:

[A] solo resistori.

[B] solo condensatori.

[C] solo induttori.

[D] induttori e resistori ma non condensatori.
- 13** Quale delle seguenti affermazioni relativa a un circuito RLC in serie è vera?

[A] A basse frequenze l'impedenza è dominata dalla reattanza capacitiva.

[B] Ad alte frequenze l'impedenza è dominata dalla resistenza.

[C] L'impedenza dipende solo da C e L .

[D] L'impedenza è indipendente dalla frequenza.
- 14** Un circuito RLC in serie è formato da un induttore da 6,00 mH e da un condensatore da 2,50 μF . Qual è la frequenza di risonanza del circuito?

[A] 11,9 Hz

[B] $1,06 \cdot 10^2$ Hz

[C] $1,30 \cdot 10^3$ Hz

[D] $3,03 \cdot 10^4$ Hz
- 15** Un trasformatore ha 450 avvolgimenti nel primario e 30 nel secondario. Quale delle seguenti affermazioni relative a esso è vera?

[A] Il rapporto di trasformazione è 15.

[B] $V_s/V_p = 15$.

[C] $I_s/I_p = 0,067$.

[D] La potenza rilasciata dal secondario è praticamente uguale alla potenza rilasciata dal primario.

Problemi

1. Forza elettromagnetica indotta e correnti indotte ■ 2. La f.e.m. indotta in un conduttore in moto

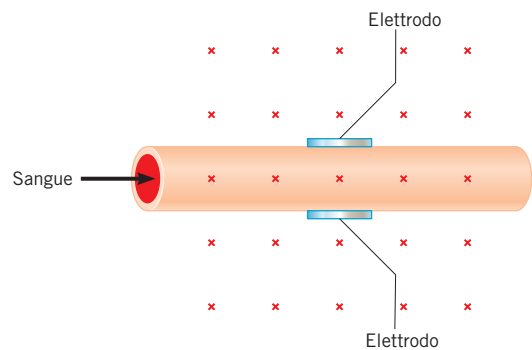
- 1** L'apertura alare di un Boeing 747 è 59 m. L'aereo vola orizzontalmente a 220 m/s. La componente verticale del campo magnetico terrestre è $5,0 \cdot 10^{-5}$ T.

► Calcola la f.e.m. indotta nelle ali.
- 2** Nel 1996 la NASA lanciò la missione Tethered, in cui lo shuttle Atlantis doveva trascinare un cavo lungo $2,0 \cdot 10^4$ m per generare f.e.m. indotta. Lo shuttle aveva una velocità orbitale di $7,6 \cdot 10^3$ m/s e si muoveva in un campo magnetico terrestre di intensità $5,1 \cdot 10^{-5}$ T.

► Se il cavo si fosse mosso perpendicolarmente al campo magnetico terrestre, quale sarebbe stata la f.e.m. generata fra i suoi estremi?
- 3** Fra due conduttori non a contatto scocca una scintilla elettrica se fra di loro esiste una differenza di potenziale abbastanza grande. Per produrre una scintilla in uno strato d'aria di $1,0 \cdot 10^{-4}$ m è necessaria una differenza di potenziale di circa 940 V. Supponi che la lampadina di figura 23.3B sia sostituita da due terminali posti a quella distanza.

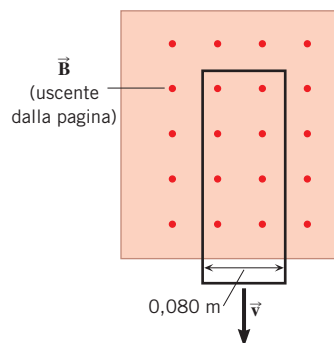
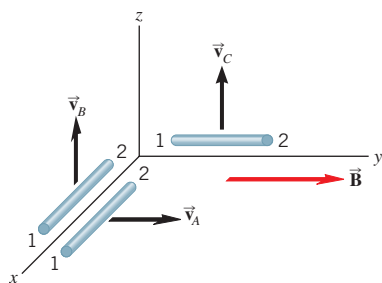
► Con quale velocità si dovrebbe muovere la sbarretta in un campo magnetico di 4,8 T per provocare una scintilla fra i terminali?
- 4** La figura mostra un tipo di flussometro che può essere usato per misurare la velocità del sangue in un vaso sufficientemente esposto, per esempio durante un intervento chirurgico. Il sangue può essere considerato come un conduttore in moto. Quando scorre perpendicolarmente rispetto a un campo magnetico, come in figura, si possono usare elettrodi per misurare la piccola differenza di potenziale che si origina attraverso il vaso. Supponi che la velocità del sangue sia 0,30 m/s e che il diametro del vaso sia 5,6 mm.

► Quale voltaggio misurano gli elettrodi in un campo di intensità 0,60 T?



- 5** La figura mostra tre sbarrette identiche A , B e C che si muovono su piani diversi. Un campo magnetico costante di 0,45 T è diretto lungo l'asse y . La lunghezza di ciascuna sbarretta è $L = 1,3$ m e le velocità hanno modulo $v_A = v_B = v_C = 2,7$ m/s.

► Per ciascuna sbarretta, calcola la f.e.m. di movimento e indica quale delle estremità (1 o 2) è positiva.

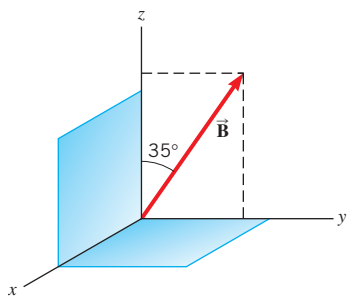


- 6** Supponi che la lampadina della figura 23.3B dissipi una potenza di 60,0 W e abbia una resistenza di 240 Ω. Il campo magnetico ha intensità 0,40 T e la lunghezza della sbarretta è 0,60 m. La sola resistenza nel circuito è quella della lampadina.
- Qual è la lunghezza minima delle guide perché la lampadina stia accesa per mezzo secondo?

3. La legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday-Neumann

Nei problemi che seguono si assume che il flusso magnetico sia positivo.

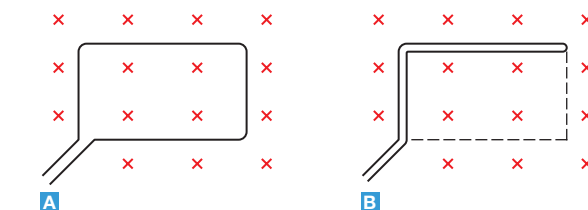
- 7** Una casa ha un pavimento di area 112 m² e una parete esterna di 28 m². Il campo magnetico terrestre in quel punto ha una componente orizzontale di 2,6 · 10⁻⁵ T che punta verso nord e una componente verticale di 4,2 · 10⁻⁵ T che punta verso il basso.
- Determina il flusso magnetico attraverso la parete se questa è orientata a nord.
 - Determina il flusso magnetico attraverso la parete se questa è orientata a est.
 - Calcola il flusso magnetico attraverso il pavimento.
- 8** La figura mostra due superfici con la stessa area immerse in campo magnetico uniforme \vec{B} orientato parallelamente al piano yz come indicato.
- Calcola il rapporto Φ_{xz}/Φ_{xy} dei flussi magnetici attraverso le due superfici.



- 9** Una spiria rettangolare si muove verso il basso della pagina con velocità 0,020 m/s (figura). La spiria sta uscendo da una regione in cui c'è un campo magnetico uniforme di 2,4 T. All'esterno della regione il campo magnetico è nullo.
- Qual è la variazione di flusso magnetico durante 2,0 s?

- 10** Una spiria è formata da un solo avvolgimento di filo. La normale alla spiria è parallela a un campo magnetico uniforme e costante nel tempo di 1,7 T. Mentre la sua area A viene ridotta nella spiria si origina una f.e.m. indotta di 2,6 V.
- Qual è la velocità $\Delta A/\Delta t$ (in m²/s) con cui cambia l'area della spiria?

- 11** Una spiria rettangolare con lati di 0,20 m e 0,35 m giace in un piano perpendicolare a un campo magnetico costante (parte A della figura). Il campo magnetico è 0,65 T ed è parallelo alla normale alla superficie della spiria. In 0,18 s, metà della spiria è ripiegata verso l'altra, come indica la parte B della figura.



- Calcola l'intensità media della f.e.m. indotta nella spiria.

- 12** Una spiria circolare (950 avvolgimenti, raggio 0,060 m) ruota in un campo magnetico uniforme. All'istante $t = 0$ s la normale alla spiria è perpendicolare al campo magnetico. All'istante $t = 0,010$ s la normale forma un angolo di 45° con il campo perché la spiria ha ruotato di un ottavo di giro. Nella spiria viene indotta una f.e.m. media di 0,065 V.

- Calcola l'intensità del campo magnetico.

- 13** Il flusso magnetico attraverso un avvolgimento dei 12 che formano una bobina cambia da 4,0 Wb a 9,0 Wb in 0,050 s. La corrente media indotta nella bobina è 230 A.

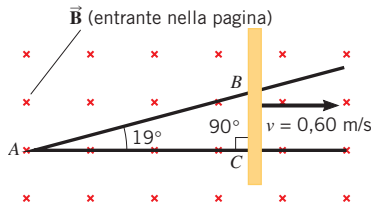
- Qual è la resistenza della bobina?

- 14** Una spiria rettangolare di dimensioni 0,35 m e 0,55 m è posta in un campo magnetico uniforme di 2,1 T. Il campo magnetico è inclinato di 65° rispetto alla normale al piano della spiria.

- Se il campo magnetico decresce fino a zero in 0,45 s, qual è la f.e.m. indotta media nella spiria?
- Se l'intensità del campo magnetico rimane 2,1 T, qual è la velocità $\Delta A/\Delta t$ con cui deve cambiare l'area della spiria per avere la stessa f.e.m. indotta?

- 15** Una sbarretta di rame scivola su due guide conduttrici che formano tra loro un angolo di 19° . La sbarretta si muove verso destra con velocità costante $0,60 \text{ m/s}$. Un campo magnetico uniforme di $0,38 \text{ T}$ è perpendicolare al piano del foglio (figura).

► Determina l'intensità della f.e.m. media indotta nel triangolo ABC durante un intervallo di $6,0 \text{ s}$ dopo che la sbarretta ha superato il punto A .



- 16** Una bobina con 1850 avvolgimenti è inserita in un circuito con la resistenza totale di $45,0 \Omega$. L'area di ciascun avvolgimento è $4,70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. La bobina è spostata da una regione in cui il campo magnetico è nullo a una regione in cui il campo magnetico è presente, mantenendo la normale alla bobina parallela al campo magnetico. La carica indotta che fluisce nel circuito è $8,87 \cdot 10^{-3} \text{ C}$.

► Determina l'intensità del campo magnetico.

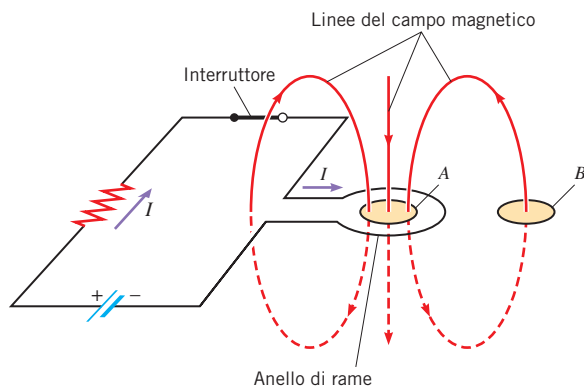
- 17** Un solenoide ha una sezione di area $6,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, è formato da 400 avvolgimenti ed è percorso da una corrente di $0,40 \text{ A}$. Una bobina con 10 spire è avvolta strettamente attorno al solenoide. I terminali della bobina sono connessi a un resistore da $1,5 \Omega$. A causa dell'apertura di un interruttore, la corrente si annulla in $0,050 \text{ s}$.

► Determina la corrente media indotta nella bobina.

4. La legge di Lenz

- 18** La figura mostra una spira piatta di rame su un tavolo (non mostrato) e connessa a una batteria attraverso un interruttore chiuso. La corrente I nella spira genera un campo magnetico di cui sono mostrate alcune linee di forza. L'interruttore viene aperto e la corrente si annulla. Sul tavolo ci sono anche due spire conduttrici più piccole A e B non connesse ad alcuna batteria.

► Determina il verso (orario o antiorario visto da sopra il tavolo) della corrente indotta nelle spire A e B .



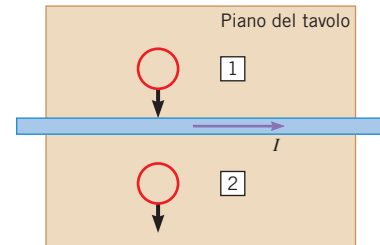
- 19** Supponi che la calamita di figura 23.1 sia ferma mentre la bobina sia libera di muoversi. Con quale verso la corrente attraversa l'amperometro quando la bobina è mossa:

► verso sinistra?

► verso destra?

- 20** Un filo rettilineo molto lungo giace su un tavolo e conduce una corrente I (figura). Una piccola spira viene spostata sopra il tavolo dalla posizione 1 alla posizione 2.

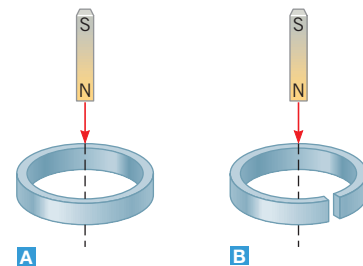
► Determina il verso della corrente indotta quando la spira passa sopra (a) 1 e (b) sopra 2.



- 21** La figura mostra un magnete che cade attraverso un anello metallico. Nella parte A l'anello è intero, mentre in B l'anello è tagliato.

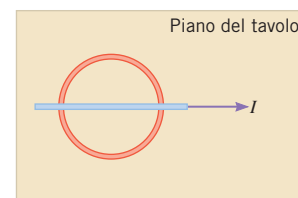
► Spiega perché il moto del magnete in A è ritardato sia quando è sopra sia quando è sotto all'anello. Disegna le correnti indotte nell'anello.

► Spiega perché il moto del magnete non è alterato dall'anello nella situazione B .



- 22** Una spira circolare è appoggiata su un tavolo. Un filo rettilineo molto lungo giace su un diametro della spira come mostra la figura. La corrente I nel filo sta diminuendo.

► Qual è il verso della corrente indotta, se ce n'è una?



5. Mutua induzione e autoinduzione

- 23** Il campo magnetico terrestre immagazzina energia. L'intensità massima del campo terrestre è $7,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.

► Calcola l'energia magnetica massima immagazzinata

nella regione di spazio sopra un città (area $5,0 \cdot 10^8 \text{ m}^2$, altezza 1500 m).

24 Due bobine sono poste una vicino all'altra. Inizialmente una corrente di 2,5 A scorre in una bobina mentre nell'altra non c'è corrente. La corrente è poi azzerata in un intervallo di $3,7 \cdot 10^{-2}$ s. Durante questo intervallo, la f.e.m. media indotta nell'altra bobina è 1,7 V.

► Qual è la mutua induttanza delle due bobine?

25 Durante un intervallo di 72 ms nella bobina primaria cambia la corrente. Questo cambiamento provoca una corrente di 6,0 mA nella bobina secondaria, che fa parte di un circuito con una resistenza di 12 Ω . La mutua induttanza fra le due bobine è 3,2 mH.

► Qual è la variazione della corrente primaria?

26 Fra le armature di un condensatore di 3,0 μF c'è una differenza di potenziale di 35 V.

► Quale dev'essere la corrente in un solenoide da 5,0 mH perché questo immagazzini la stessa energia del condensatore?

27 Un solenoide molto lungo ha 1750 avvolgimenti per metro e un raggio di 0,0180 m. Una bobina con 125 spire è avvolta attorno al solenoide.

► Qual è la mutua induttanza del sistema?

28 La bobina 1 è una bobina circolare piatta con N_1 avvolgimenti di raggio R_1 . Nel suo centro sta una bobina molto più piccola con N_2 avvolgimenti di raggio R_2 . I piani delle bobine sono paralleli. La bobina 2 è così piccola che il campo magnetico della bobina 1 è uniforme in tutta la sua area.

► Esprimi la mutua induttanza in termini di μ_0 , N_1 , N_2 , R_1 e R_2 .

6. L'alternatore e la corrente alternata

29 Un generatore ha una bobina quadrata formata da 248 avvolgimenti. La bobina ruota a 79,1 rad/s in un campo magnetico di 0,170 T. La tensione di picco del generatore è 75,0 V.

► Qual è la lunghezza di un lato della bobina?

30 Un generatore usa un campo magnetico di 0,10 T e ha una bobina con avvolgimenti di area 0,045 m^2 ciascuno. Un secondo generatore ha una bobina con avvolgimenti di area 0,015 m^2 ciascuno. I due generatori hanno lo stesso numero di avvolgimenti e ruotano alla stessa velocità angolare.

► Quale campo magnetico deve usare il secondo generatore per avere la stessa f.e.m. di picco del primo generatore?

31 L'intensità massima del campo magnetico terrestre è circa $6,9 \cdot 10^{-5}$ T in prossimità del polo sud magnetico. In linea di principio, questo campo magnetico potrebbe essere utilizzato con una bobina rotante per generare corrente elettrica alternata a 60,0 Hz.

► Qual è il numero minimo di avvolgimenti (ciascuno di area 0,022 m^2) che dovrebbe avere la bobina per produrre una f.e.m. efficace di 120,0 V?

32 Un generatore usa una bobina con 100 avvolgimenti e un campo magnetico di 0,50 T. La frequenza del generatore è 60,0 Hz e la f.e.m. ha un valore efficace di 120 V.

► Supponendo che ogni avvolgimento sia quadrato, determina la lunghezza del filo con cui è fatta la bobina.

33 La corrente alternata in un circuito ha il valore di picco di 2,50 A.

► Determina il suo valore efficace.

34 Il valore efficace della corrente in una fotocopiatrice è 6,50 A e la resistenza è 18,6 Ω . Calcola:

► la potenza media della fotocopiatrice.

► la potenza di picco della fotocopiatrice.

35 La potenza media utilizzata da un diffusore è 55 W. Supponi che il diffusore si comporti come un resistore da 4,0 Ω .

► Calcola il valore di picco della corrente alternata che scorre nel diffusore.

36 Una stufa elettrica funziona 9 ore al giorno nel mese di gennaio (31 giorni). Attraverso l'elemento riscaldatore di 5,3 Ω scorre una corrente di 25 A. Il costo dell'elettricità è 0,12 €/kWh.

► Calcola la spesa totale del mese.

37 Una caffettiera elettrica e una lampada sono connesse in parallelo alla stessa presa a 120 V. Insieme utilizzano una potenza di 111 W. La resistenza della caffettiera è $4,0 \cdot 10^2 \Omega$.

► Calcola la resistenza della lampada.

38 Per risparmiare sul riscaldamento, un agricoltore tiene un contenitore con 660 kg di acqua dentro una serra. Durante un giorno invernale, l'acqua è riscaldata dal sole a 10,0 °C. Durante la notte l'acqua ghiaccia a 0,0 °C in nove ore e rilascia calore latente nella serra.

► Qual è la minima intensità di corrente che si dovrebbe fornire a un impianto di riscaldamento elettrico a 240 V per ottenere la stessa quantità di energia?

39 Una lampadina a incandescenza è alimentata da una presa a 120 V. La corrente nel filamento varia nel tempo secondo la legge

$$I = (0,707 \text{ A}) \sin [(314 \text{ Hz})t]$$

► Qual è la frequenza della corrente alternata?

► Calcola la resistenza del filamento.


► Qual è la potenza media dissipata dalla lampadina?

7. I circuiti semplici in corrente alternata

40 Quale tensione è necessaria per creare una corrente di 35 mA in un circuito contenente solo un condensatore da 0,86 μF quando la frequenza è 3,4 kHz?

41 La reattanza di un condensatore è 68 Ω quando la corrente alternata ha una frequenza di 460 Hz.

► Qual è la reattanza quando la frequenza è 870 Hz?

- 42** Due condensatori uguali sono connessi in parallelo a un generatore che ha una frequenza di 610 Hz con una tensione di 24 V. La corrente nel circuito è 0,16 A.
- Qual è la capacità di ciascun condensatore?
- 43**  A circuit consists of a 3.00- μ F and a 6.00- μ F a capacitor connected in series across the terminals of a 510-Hz generator. The voltage of the generator is 120 V.
- Determine the equivalent capacitance of the two capacitors.
 - Find the current in the circuit.
- 44** Una bobina da 0,047 H è collegata ai terminali di un generatore da 2,1 V che eroga una corrente efficace di 0,023 A.
- Calcola la frequenza del generatore.
- 45** A quale frequenza (in Hz) la reattanza di una bobina da 52 mH è uguale a quella di un condensatore da 76 μ F?
- 46** Una bobina da 8,2 mH è connessa a un generatore di corrente alternata (10,0 V_{eff} , 620 Hz).
- Determina il valore massimo dell'intensità di corrente erogata dal generatore.
- 47** ***** Un condensatore è connesso a un generatore in corrente alternata di frequenza 750 Hz e tensione massima di 140 V. La corrente efficace nel circuito è 3,0 A.
- Qual è la capacità del condensatore?
 - Qual è la massima carica che si accumula su un'armatura del condensatore?
- 48** Una bobina da 30,0 mH ha una reattanza di 2,10 Ω .
- ****
- Qual è la frequenza della corrente alternata che passa attraverso la bobina?
 - Qual è la capacità del condensatore che ha la stessa reattanza alla stessa frequenza?
 - Se la frequenza è triplicata, e quindi le due reattanze non sono più uguali, qual è la nuova reattanza della bobina?
 - E quale quella del condensatore?

8. Circuiti RLC in corrente alternata

- 49** Un circuito RLC in serie è composto da una resistenza di 275 Ω , una reattanza induttiva di 648 Ω e una reattanza capacitiva di 415 Ω . La corrente nel circuito è 0,23 A.
- Qual è la tensione?
- 50** ***** Una resistenza di 2700 Ω e un condensatore da 1,1 μ F sono connessi in serie a un generatore (60 Hz, 120 V).
- Calcola la potenza erogata al circuito.
- 51** ****** Un circuito consiste di una resistenza di 85 Ω in serie con un condensatore da 4,0 μ F, connessi a un generatore in corrente alternata di voltaggio fissato.
- A quale frequenza la corrente diventa la metà di quella che passa nel circuito quando la frequenza è molto elevata?

- 52** ****** Un circuito RLC in serie contiene un condensatore ($C = 6,60 \mu\text{F}$), una bobina ($L = 7,20 \text{ mH}$) e un generatore (tensione di picco = 32,0 V, $f = 1,50 \cdot 10^3 \text{ Hz}$). Quando $t = 0 \text{ s}$, la tensione è nulla e diventa massima un quarto di periodo più tardi.
- Determina il valore istantaneo della tensione ai capi della combinazione bobina/condensatore quando $t = 1,20 \cdot 10^{-4} \text{ s}$.
 - Qual è il valore istantaneo della corrente quando $t = 1,20 \cdot 10^{-4} \text{ s}$?
- Suggerimento:* in assenza di resistori, lo sfasamento della corrente rispetto alla tensione è quello dell'elemento di circuito che in quel momento ha l'induttanza maggiore.

9. La risonanza nei circuiti elettrici

- 53** La frequenza di risonanza di un circuito RLC in serie è 690 kHz. La capacità è $2,0 \cdot 10^{-9} \text{ F}$.
- Qual è il valore dell'induttanza?
- 54** La frequenza di risonanza di un circuito RLC in serie è 9,3 kHz. La capacità e l'induttanza vengono triplicate.
- Qual è la nuova frequenza di risonanza?
- 55** Un resistore da 10,0 Ω , un condensatore da 12,0 μF e un induttore da 17,0 mH sono connessi in serie con un generatore da 155 V.
- A quale frequenza si ha la massima corrente?
 - Qual è il massimo valore della corrente efficace?

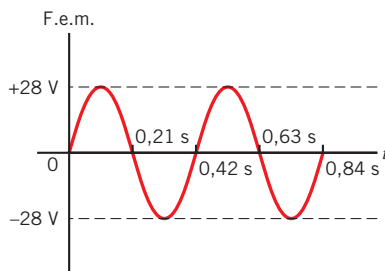
10. Il trasformatore

- 56** Le batterie in un lettore CD sono ricaricate da un caricabatterie che consiste in un trasformatore con rapporto di trasformazione 1:3. La presa fornisce una tensione di 120 V.
- Qual è il voltaggio nella bobina secondaria del trasformatore?
- 57** La bobina secondaria di un trasformatore alimenta un dispositivo. Il rapporto di trasformazione è 50:1. La bobina primaria è alimentata da una presa a 120 V. Nella bobina secondaria scorre una corrente di $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ A}$.
- Calcola la potenza utilizzata dal dispositivo.
- 58** Un trenino elettrico è alimentato con un trasformatore avente rapporto di trasformazione 1:8. Mentre il trenino si muove la corrente nella bobina secondaria è 1,6 A.
- Qual è la corrente nella bobina primaria?
- 59** I campanelli elettrici di molte abitazioni funzionano a 10,0 V. Per ottenere questo voltaggio si usano trasformatori che operano con la tensione di rete 220 V.
- Qual è il rapporto N_s/N_p ?
- 60** Una centrale elettrica produce una potenza di $1,2 \cdot 10^6 \text{ W}$ che deve essere inviata a una piccola città distante 7,0 km. Ciascuno dei due fili di trasmissione ha una resistenza di $5,0 \cdot 10^{-2} \Omega$ per kilometro.

- ▶ Calcola la potenza dissipata in calore nei fili se l'energia elettrica è trasferita a 1200 V.
- ▶ Un trasformatore con rapporto 100:1 innalza il voltaggio prima che l'energia sia trasmessa. Quanta potenza viene dissipata in questo caso?

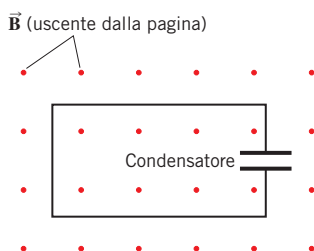
PROBLEMI FINALI

- 61** Due bobine risentono della stessa variazione di flusso magnetico in ciascun avvolgimento. La f.e.m. indotta nella bobina 1, che ha 184 avvolgimenti, è 2,82 V. La f.e.m. indotta nella bobina 2 è 4,23 V.
- ▶ Quanti avvolgimenti ha la bobina 2?
- 62** La figura mostra l'andamento della f.e.m. prodotta da un generatore in funzione del tempo. La bobina del dispositivo è formata da 150 spire ciascuna di area 0,020 m². Determina:
- ▶ la frequenza f del generatore in hertz.
 - ▶ la velocità angolare ω in rad/s.
 - ▶ l'intensità del campo magnetico.



- 63** Supponiamo che i poli della figura 23.1 sia scambiati fra loro.
- ▶ Determina il verso della corrente nell'amperometro nelle parti **B** e **C** della figura. Fornisci una spiegazione del risultato.
- 64** La bobina di un generatore ha 500 avvolgimenti ciascuno di area $1,2 \cdot 10^{-2}$ m². La bobina è posta in un campo magnetico di 0,13 T e ruota con una velocità angolare di 34 rad/s.
- ▶ Qual è la f.e.m. indotta nella bobina nell'istante in cui la normale alle spire forma un angolo di 27° con il campo magnetico?

- 65** Indica direzione e verso del campo elettrico fra le armature del condensatore mostrato in figura mentre il campo magnetico sta diminuendo.

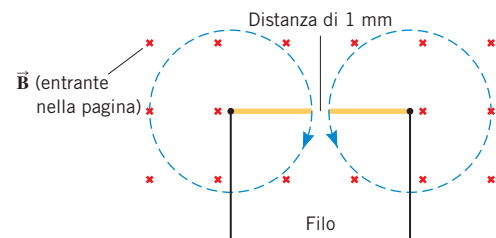


- 66** Un campo magnetico attraversa una spira la cui area è 0,018 m². La direzione del campo magnetico è parallela alla normale alla spira e l'intensità del campo sta crescendo al tasso di 0,20 T/s.

- ▶ Determina l'intensità della f.e.m. indotta nella spira.
- ▶ Supponi che l'area della spira possa essere aumentata o diminuita. Se il campo magnetico aumenta come nel caso della domanda precedente, a quale tasso (in m²/s) l'area dovrebbe cambiare nell'istante in cui $B = 1,8$ T perché la f.e.m. indotta sia zero?

- 67** Due sbarrette conduttrici lunghe 0,68 m ruotano alla stessa velocità in sensi opposti in un piano perpendicolare a un campo magnetico di 4,7 T. Come mostra la figura, le estremità delle sbarrette si avvicinano fino a 1 mm durante la rotazione. Le estremità fisse sono connesse mediante un filo e quindi hanno lo stesso potenziale elettrico. Perché scocchi una scintilla di 1 mm in aria è necessaria una differenza di potenziale di $4,5 \cdot 10^3$ V.

- ▶ Qual è la velocità angolare (in rad/s) delle sbarrette quando scocca una scintilla fra le loro estremità in moto?



- 68** Un resistore da 16,0 Ω, un condensatore da 4,10 μF e un induttore da 5,30 mH sono connessi in serie con un generatore (15,0 V, 1350 Hz).

- ▶ Calcola la differenza di potenziale ai capi di ciascun elemento di circuito.

- 69** Un circuito RLC in serie contiene un condensatore da 5,10 μF e un generatore da 11,0 V. Alla frequenza di risonanza 1,30 kHz la potenza rilasciata al circuito è 25,0 W. Calcola:

- ▶ il valore dell'induttanza.
- ▶ il valore della resistenza.
- ▶ il fattore di potenza quando la frequenza del generatore è 2,31 kHz.

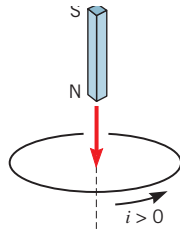
QUESITI

- 1 Discuti il fenomeno dell'induzione elettromagnetica.
- 2 Dimostra l'espressione della legge di Faraday-Neumann.
- 3 Enuncia la legge di Lenz, spiegandone il significato alla luce del principio di conservazione dell'energia.
- 4 Nell'ambito delle correnti alternate, spiega il significato di valore efficace di una corrente o di una forza elettromotrice.

- 5 Descrivi in quali modi può essere variato il flusso di un campo magnetico.

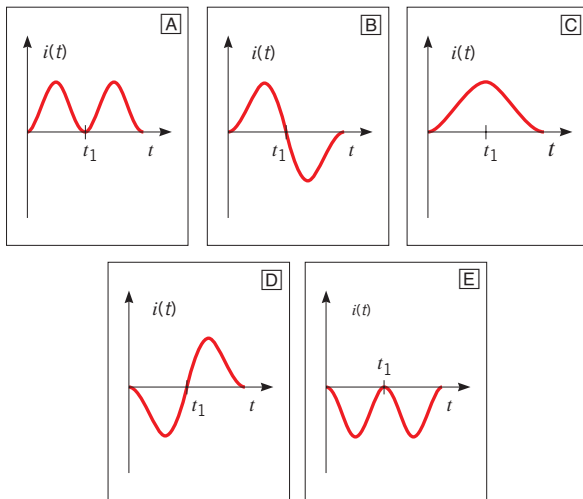
OLIMPIADI DELLA FISICA

- 1 Una calamita viene fatta passare a velocità costante attraverso una spira formata da un filo metallico, come mostrato in figura.



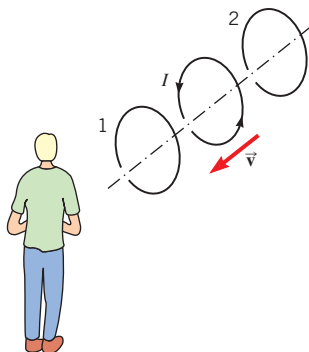
Sia t_1 l'istante di tempo in cui il punto centrale della calamita attraversa il piano della spira. Quale dei seguenti grafici rappresenta meglio la relazione che esiste tra la corrente elettrica indotta nella spira e il tempo?

Nota: In una vista dall'alto della spira la corrente indotta si considera positiva se circola in senso antiorario, come mostrato in figura.



(Gara di 1° livello edizione 2007)

- 2 Tre spire conduttrici sono disposte come in figura con l'asse in comune. Una corrente I viene vista dall'osservatore scorrere in verso antiorario nella spira centrale mentre questa si muove a velocità \vec{v} verso l'osservatore; le spire 1 e 2 sono ferme.

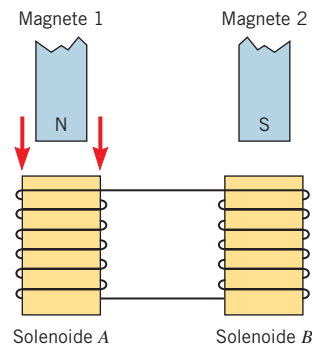


Allora l'osservatore vedrà:

- A correnti indotte che scorrono nelle spire 1 e 2 in verso orario.
- B correnti indotte che scorrono nelle spire 1 e 2 in verso antiorario.
- C una corrente indotta che scorre nella spira 1 in verso orario e una nella 2 in verso antiorario.
- D una corrente indotta che scorre nella spira 1 in verso antiorario e una nella 2 in verso orario.
- E una corrente indotta che scorre nella spira 1 in verso antiorario mentre nella spira 2 non scorre corrente.

(Gara di 1° livello edizione 2005)

- 3 Due solenoidi A e B , vuoti al loro interno, sono collegati con un filo, come mostrato in figura. Due barre magnetizzate, 1 e 2, sono sospese appena sopra i due solenoidi.

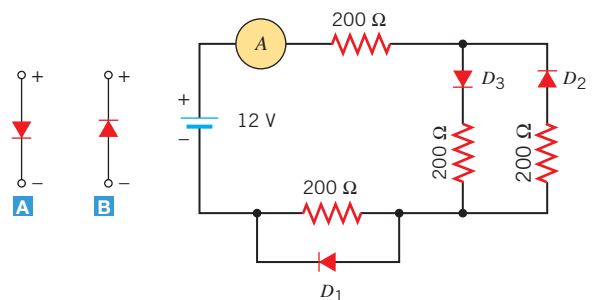


Se il polo nord del magnete 1 è lasciato cadere verso il solenoide A , simultaneamente il polo sud del magnete 2 sarà:

- A attratto verso il solenoide B da una forza magnetica.
- B respinto via dal solenoide B da una forza magnetica.
- C attratto verso il solenoide B da una forza elettrica.
- D respinto via dal solenoide B da una forza elettrica.
- E non influenzato dalla presenza del solenoide B .

(Gara di 1° livello edizione 2004)

- 4 Un diodo è un dispositivo che, in prima approssimazione, si comporta come un conduttore di resistenza trascurabile quando è collegato in modo diretto come nella figura **A**, ma assume resistenza infinita quando è collegato in modo diverso (figura **B**). Se la resistenza interna del generatore e dell'amperometro A sono trascurabili, quanto vale la corrente indicata dallo strumento, nel circuito seguente?



(Gara di 2° livello edizione 2003)

TEST DI AMMISSIONE ALL'UNIVERSITÀ

- 1** La corrente alternata a 50 hertz che fluisce dalla rete italiana nelle nostre case ha la proprietà:
- A di riacquistare lo stesso valore 50 volte al secondo.
 - B di riacquistare lo stesso valore 50 volte al minuto.
 - C di valere al massimo 50 ampere.
 - D di essere continua e valere al massimo 50 coulomb al secondo.
 - E di alternare valori negativi e positivi arbitrari.
- (Prova di ammissione al corso di laurea in Medicina e Chirurgia, 2005-2006)

- 2** Se avvicino rapidamente una potente calamita a una spira formata da un filo di rame chiuso a cerchio, si può notare che:
- A nella spira viene indotta una circolazione di corrente elettrica.
 - B la spira si illumina.
 - C la spira si deforma trasformandosi in un'ellisse molto stretta e lunga.
 - D il rame dapprima neutro acquista una forte carica elettrica indotta.
 - E la spira inizia a ruotare con velocità costante intorno a un suo diametro.
- (Prova di ammissione al corso di laurea in Medicina Veterinaria, 2006-2007)

PROVE D'ESAME ALL'UNIVERSITÀ

- 1** Un solenoide è costituito da $N = 60$ spire di raggio $r = 2$ cm, possiede una resistenza totale $R = 3 \Omega$ ed è posto in un campo magnetico $B = 1$ T uniforme, orientato nella stessa direzione del solenoide. Calcolare il flusso di \vec{B} attraverso il solenoide e la corrente indotta quando la direzione del campo viene invertita in un tempo $t = 0,2$ s.
- (Esame di Fisica, corso di laurea in Scienze biologiche, Università di Genova, 2004-2005)

- 2** Un filo di rame ($\rho_{\text{rame}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) lungo $l = 157$ m di sezione $S = 0,5 \text{ mm}^2$ viene utilizzato per costruire un solenoide di lunghezza $L = 30$ cm, formato da $N = 1000$ spire. Ai capi del solenoide viene applicata una d.d.p. $V = 12$ volt. Calcola:

► la resistenza del filo e la corrente che percorre il solenoide;

► il campo magnetico B all'interno del solenoide.

All'interno del solenoide si trova una piccola spira rettangolare di lati $a = 2$ cm e $b = 3$ cm, posta in modo tale che la normale alla spira forma un angolo $\phi = 30^\circ$ con la direzione dell'asse del solenoide. Calcola:

► il flusso di \vec{B} attraverso la spira rettangolare;

► la f.e.m. indotta nella spira se la corrente che percorre il solenoide viene portata a zero in un tempo $\Delta t = 3$ ms.

(Esame di Fisica, corso di laurea in Scienze biologiche, Università di Genova, 2000-2001)