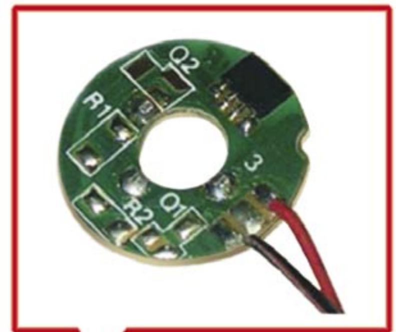
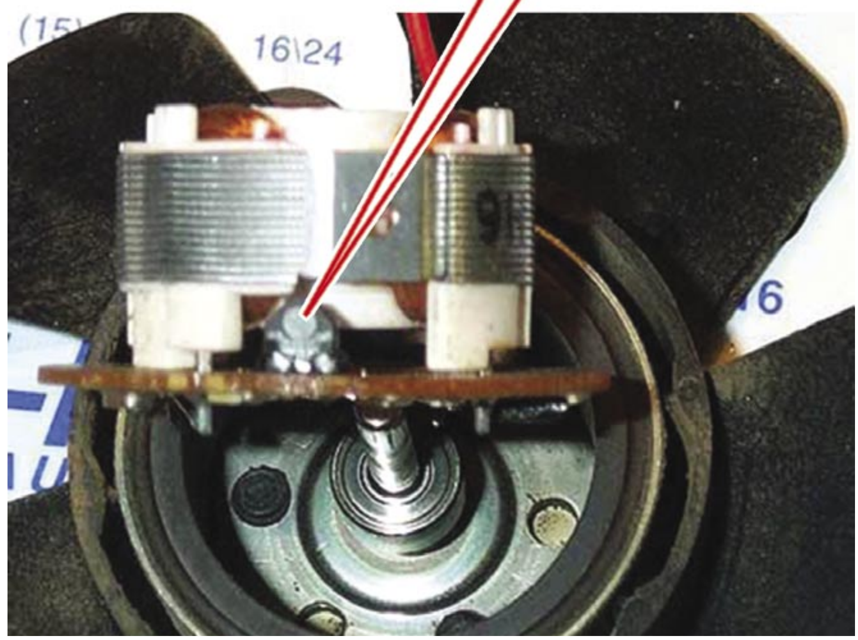
L'elettrotecnica in aiuto dell'elettronica





L'elettronica di oggi, in tutti gli strumenti di uso comune, sfrutta grandemente le proprietà e le leggi dell'elettrotecnica. Molti strumenti e circuiti elettronici si basano ad esempio sulle proprietà del sensore di Hall. Vediamo in quali circuiti si trovano le principali applicazioni di questo dispositivo

a cura di Flavio Criseo

Gli apparecchi elettronici possono essere divisi in invasivi e non invasisi.

I primi devono essere inseriti in alcuni punti del circuito e, quindi, il circuito stesso sente la loro presenza durante la fase di funzionamento. Si pensi ad esempio a un amperometro. Per conoscere quanta corrente passa in un filo elettrico o in un certo punto del circuito è indispensabile inserirlo in serie all'interno dello stesso.

I secondi non interagiscono invece direttamente con il circuito posto sotto esame e, per questo, sono chiamati non invasivi.

Un misuratore di portata per i fluidi, ad esempio, può essere del tipo non invasivo. Ammettiamo di avere una tubazione idraulica di un certo diametro e di voler sapere quanta acqua sta passando in un certo istante. Certamente non è possibile tagliare il tubo per "vedere" l'acqua passare. Si rende indispensabile, quindi, l'utilizzo di uno strumento capace di rilevare la portata senza interrompere il tubo stesso. A questo proposito è importante usare uno strumento non invasivo.

La trattazione di questi strumenti e/o sensori non invasisi impiegati in campo industriale esula dal contenuto di queste pagine, ma per quanto riguarda la misura di grandezze elettriche in circuiti e dispositivi elettronici, vedremo come alcuni sensori siano molto spesso utilizzati.

Per comprendere il funzionamento di un eventuale dispositivo è indispensabile conoscere bene le proprietà del sensore utilizzato. In queste pagine vediamo di comprendere come si comporta il sensore a effetto Hall.

Le grandezze in gioco

Il sensore di Hall basa il suo principio di funzionamento sul legame esistente fra il campo magnetico e la corrente elettrica.

Quando una corrente $\overline{I}$ attraversa un conduttore, viene prodotto un campo magnetico (che d'ora in avanti indicheremo con $\overline{B}$); oltre a ciò è presente una forza detta Forza di Lorentz (che d'ora in avanti indicheremo con $\overline{f}$).

È facilmente intuibile pensare

che se abbiamo corrente elettrica avremo anche un campo elettrico (d'ora in avanti lo indicheremo con E_x, oppure con E_y a seconda dell'asse cartesiano x o y lungo cui è diretto).

La relazione generale che lega il campo elettrico $\overline{E}$, la forza di Lorentz $\overline{f}$ e il campo magnetico $\overline{B}$ è la seguente:

$$\overline{f} = -q\,(\overline{E} + \overline{v} \wedge \overline{B})$$

dove il termine $\overline{v}$ indica la velocità della carica elettrica q.

Vediamo insieme la **Fig. 1**. Gli assi x, y e z sono orientati come nel disegno. Come si può notare, lungo l'asse x abbiamo il campo elettrico E_x e la corrente $\overline{I}$, lungo l'asse y abbiamo il campo elettrico E_y, mentre sull'asse z abbiamo il campo magnetico $\overline{B}$.

Regola della mano destra

Per conoscere l'esatto orientamento della forza di Lorentz, conoscendo il verso del campo magnetico e della corrente, si punti il dito indice in un qualsiasi punto del luogo dove ci si trova.

Si alzi verso l'alto il pollice e si ponga il dito medio a 90° rispetto all'indice.

Si associ ora il campo magnetico al dito indice, la corrente al dito medio e la forza di Lorentz al pollice (esempio: ammettiamo di avere un campo magnetico diretto dal basso verso l'alto e una corrente diretta da destra a sinistra; la forza di Lorentz sarà quindi diretta verso di voi).

La **Fig. 2** mostra la posizione corretta della mano destra.

Ammettiamo di avere un piccolo pezzo di materiale resistivo in cui in tutti e quattro i lati siano state operate delle metallizzazioni (colorate in giallo), così come mostrato in **Fig. 3**.

Lo spessore del materiale è indicato genericamente con la lettera "d", mentre la sua lunghezza è "W".

Il campo elettrico E_y determinato dal campo magnetico $\overline{B}$ è il seguente:

$$E_y = v_x B_z$$

l'area che gli elettroni attraversano nel pezzo di materiale è:

$$A = W \cdot d$$

quest'area è attraversata da una corrente I e, com'è facile intuire, la carica elettrica distribuita sarà:

$$Q = n \cdot q \cdot A \cdot v_x \cdot t$$

Siccome la carica Q è data dal prodotto della corrente I per il tempo trascorso "t", sostituendo nell'equazione precedente tale prodotto al posto di Q avremo che:

$$v_x = \frac{I}{n \cdot q \cdot A}$$

il termine

$$\frac{I}{n \cdot q}$$

è l'inverso della conduttività del pezzettino di materiale. Con questo termine si indica la resistenza R_H del materiale in esame.

Abbiamo quindi che la velocità con cui viaggiano le cariche elettriche dentro il materiale sarà:

$$v_x = R_H \frac{I}{A}$$

Appare evidente che il campo elettrico lungo l'asse y sarà quindi pari a:

$$E_y = R_H \frac{I}{A} B_z$$

La tensione elettrica, lungo l'asse y, sarà data dal campo E_y e dalla distanza W indicata nella Fig. 3.

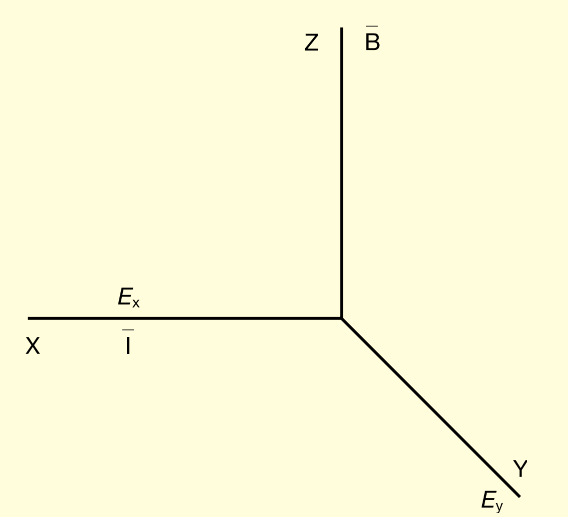


Fig. 1 - Gli assi X, Y e Z sono relativi al campo B, alla corrente e tensione E_x e alla tensione E_y

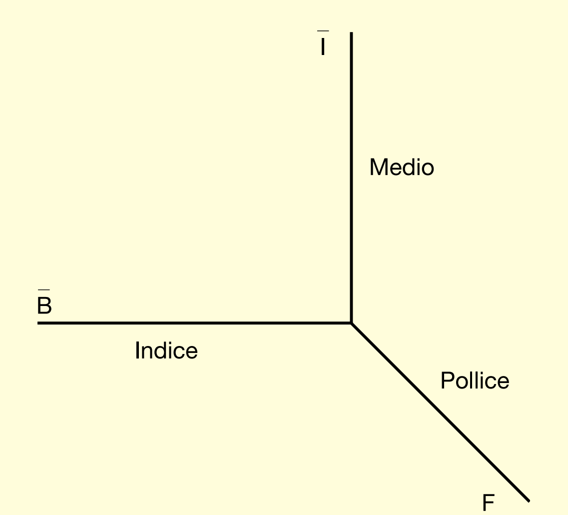


Fig. 2 - Ecco come orientare la mano destra: ogni asse rappresenta un dito

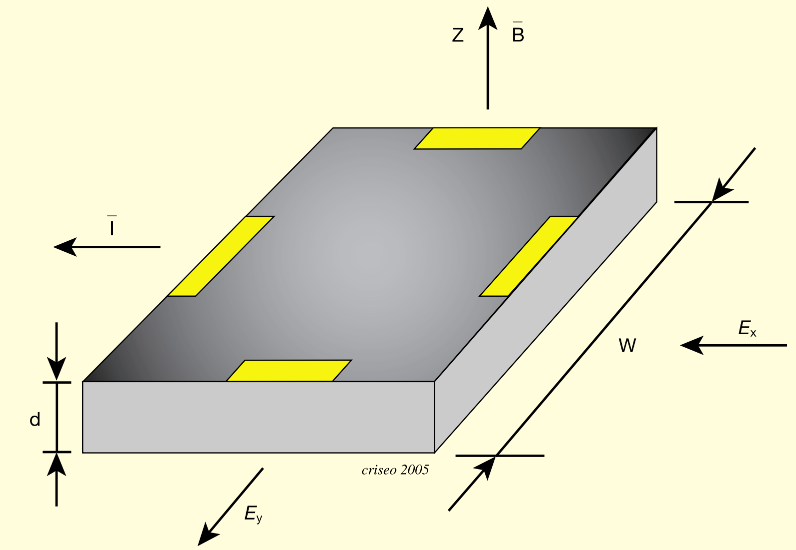


Fig. 3 - Le placchette in giallo rappresentano le metallizzazioni con le quali il sensore è connesso al circuito esterno

Concludendo abbiamo che:

$$V_y = R_H \frac{I}{d} B_z$$

Da questa relazione possiamo trarre un primo risultato importante; la tensione V_y che si localizza ai due estremi del pezzettino di materiale è dipendente dalla resistenza R_H (che è tipica del materiale stesso), ma soprattutto dipende direttamente dalla corrente I e dal campo B_z che lo attraversano.

Il sensore di Hall

Fatta questa indispensabile premessa entriamo nel vivo della questione.

Ipotizziamo di far percorrere il materiale (che d'ora in avanti chiameremo *Sensore di Hall*) da una corrente I nel verso indicato in Fig. 3. La resistenza R_H è detta *Coefficiente di Hall*; note le proprietà del materiale, tale grandezza risulta nota.

È possibile misurare un eventuale campo B, sfruttando il legame esistente fra la V_y e la corrente I.

In prima analisi, possiamo dire che un sensore di Hall può essere utilizzato per misurare un campo magnetico B presente in un dato luogo.

Nulla toglie però di utilizzare il legame esistente fra la V_y e il campo B per misurare una corrente I.

Un possibile modo di utilizzo

Ammettiamo di dover misurare un campo magnetico B:

- facciamo percorrere una corrente (da noi stabilita) I lungo l'asse x
- il campo B da misurare investe il sensore e sposta le cariche lungo l'asse y
- il sistema raggiunge una posizione di equilibrio generando il campo elettrico E_y.

Essendo note le dimensioni del sensore, sono anche note la R_H e la I. Misurando con un circuito idoneo la tensione V_y (che è in relazione con la larghezza W del sensore e il campo E_y), conosciamo quanto occorre per poter ricavare l'intensità del campo B.

Strumentazione di misura a semiconduttore

Rispetto ai normali materiali resistivi (ad esempio i materiali con i quali si realizzano i resistori), i materiali a semiconduttore presentano una resistenza R_H con una relazione diversa da quella vista in precedenza. Per i semiconduttori abbiamo infatti: $R_H = \mu \cdot \rho$ dove con μ si indica la mobilità dei portatori di carica, mentre con ρ la resistività del materiale.

Con i materiali a semiconduttore sorge subito un problema in quanto si ha un legame fra la R_H e la temperatura. Questo inconveniente lo si risolve con un circuito simile a quello visibile in **Fig. 4**.

Il principio di funzionamento

Innanzitutto è necessario che la I sia sempre costante.

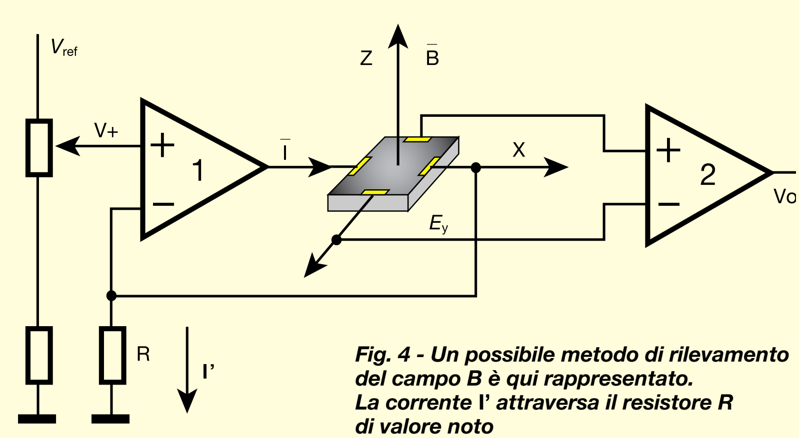


Fig. 4 - Un possibile metodo di rilevamento del campo B è qui rappresentato. La corrente I' attraversa il resistore R di valore noto

Dallo schema di Fig. 4, si nota la presenza di un primo Op-Amp, siglato 1, e un secondo stadio operazionale indicato con 2.

Il primo Op-Amp funziona in zona attiva (alto guadagno) quindi, così come spiegato più volte nei precedenti articoli, la tensione differenziale Vd è sempre nulla (si consideri il modello ideale).

È presente una tensione di riferimento (la "solita" V_{ref} spesso riscontrata in tutti gli strumenti elettronici visti in passato) e alcuni resistori di precisione.

Appare evidente come sia possibile impostare l'intensità della corrente I che fuoriesce dall'Op-Amp 1 agendo sul trimmer posto sul pin *Non invertente*.

Dato che la tensione differenziale Vd è nulla, possiamo sapere a quanto ammonterà la corrente I' che attraversa la resistenza R posta fra il pin invertente e la massa.

Da quanto detto si conclude che: se in V^+ si ha una tensione costante, allora in V^- vi sarà la stessa tensione (questo perché la Vd = 0).

Il secondo Op-Amp è del tipo per strumentazione elettronica (possiamo avere quindi un G pari a 10, 100, 1000 a seconda del modello scelto).

Si noti che il sensore di Hall visto in Fig. 3 (a semiconduttore) è posto fra i due operazionali e la corrente costante I lo attraversa, così come spiegato per la Fig. 3.

Se facciamo investire il sensore da un campo magnetico B orientato come in Fig. 3, il secondo operazionale rileverà ai suoi pin invertente e non invertente una tensione differenziale Vd pari alla V_y commentata nei calcoli precedenti.

All'uscita del secondo Op-Amp avremo una certa tensione Vo che sarà frutto della tensione Vd.

Inviando la Vo a un controllore (è possibile inviarla in forma digitale utilizzando, ad esempio, un convertitore V/F) questi applicherà la formula, vista in precedenza per la V_y, ricavandone quindi il valore di B.

Un possibile display visualizzerà quindi il campo magnetico così come prestabilito.

Questo è il principio di funzionamento di alcuni misuratori di campo magnetico.

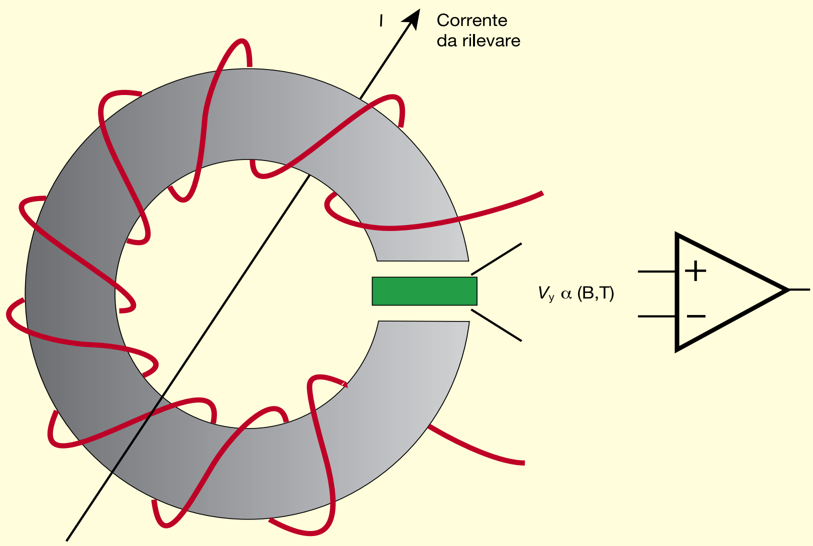


Fig. 5 - Il sensore di Hall "sente" il flusso magnetico generando una tensione V_y come spiegato nelle formule appena viste

Un'altra applicazione

Passiamo adesso alla **Fig. 5**. In questa viene rappresentato un piccolo nucleo toroidale con un piccolo traferro.

Immaginiamo di inserire il sensore di Hall, connesso al circuito di Fig. 4, nel traferro. Prendiamo un filo elettrico e inseriamolo dentro il nucleo toroidale, come in Fig. 5.

Ammettiamo che il filo elettrico sia connesso a un certo circuito e, quindi, sia percorso da corrente I nel verso indicato in figura.

Come sappiamo, la corrente I genera delle linee di flusso magnetico che, avvolgendo il nucleo, scorreranno in esso lungo tutta la sua superficie, così come visibile in **Fig. 6**. Dato che il traferro è molto piccolo, le linee di flusso lo attraverseranno in modo da chiudersi su loro stesse.

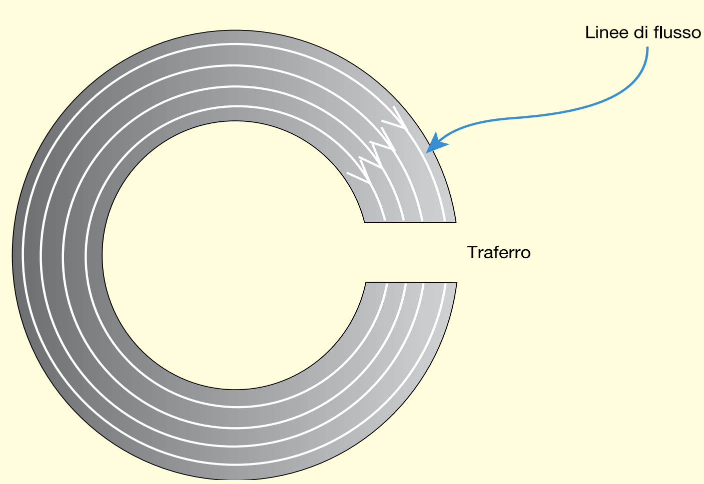


Fig. 6 - Ecco come scorrono le linee di flusso magnetico nel traferro. Se la corrente I avesse verso opposto, il verso delle linee di flusso sarebbe contrario

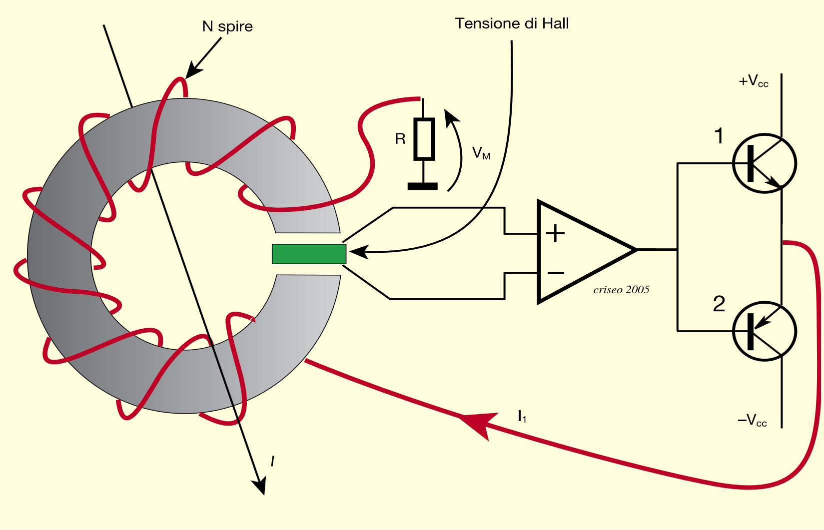


Fig. 7 - Schema completo per la rivelazione di correnti continue e alternate. Gli effetti negativi della temperatura sono compensati dalla coppia a simmetria complementare

Le linee di flusso del campo magnetico saranno dirette dall'alto verso il basso; dato che nel traferro è inserito il sensore che, a sua volta è connesso al circuito di Fig. 4, la Vo dipenderà dall'intensità delle linee di flusso e avrà segno opposto al caso precedente.

Il segno opposto è dato dal fatto che il campo B di Fig. 6 è orientato in verso opposto rispetto alla Fig. 4.

Per una certa corrente I che scorre nel filo elettrico avremo un preciso campo B nel toro e quindi nel traferro. Il sensore di Hall rileverà questo campo B e genererà una tensione differenziale direttamente proporzionale a esso. Senza tagliare il filo elettrico, possiamo conoscere quindi la corrente che lo attraversa.

Come si è visto abbiamo realizzato un amperometro non invasivo che spesso è comunemente chiamato *pinza amperometrica*.

Un problema da risolvere

Il sensore è costruito con materiale semiconduttore. Questo porta a una tensione rilevata che è funzione della temperatura. È possibile risolvere il problema con un circuito simile a quello di **Fig. 7**.

Lo schema presenta molti vantaggi rispetto al circuito di Fig. 4 e precisamente:

1) funziona bene sia per correnti in CC che per correnti in AC
2) come nel caso precedente, non è necessario interrompere il cavo elettrico sottoposto alla misurazione.

Dalle formule viste, sappiamo che l'effetto del campo B creato dalla corrente da misurare I è rilevato in modo proporzionale alla corrente stessa.

Funzionamento

Si avvolge sul toro del filo di rame e si inserisce in quest'ultimo il cavo elettrico da sottoporre a misura lo si porta dentro il toro. In questo modo, si crea un trasformatore che presenta una corrente sull'avvolgimento del toro legata alla corrente I da misurare.

Un terminale dell'avvolgimento lo si collega a massa tramite un resistore R di precisione di valore prestabilito in fase di progetto.

Quando la corrente I scorre nel conduttore, l'avvolgimento posto sul toro genera una d.d.p. che, rispetto a massa, assume valore pari a V_M.

L'uscita della tensione Vy rilevata dal sensore è inviata all'ingresso di una coppia a simmetria complementare che, retroazionando la propria tensione d'uscita all'altro capo dell'avvolgimento, vi introduce una corrente I_1.

La V_M rilevata è molto piccola, ma funzione della I_1; dato che quest'ultima è data dall'amplificazione della tensione differenziale dell'Op-Amp che, a sua volta, è polarizzato dalla V_y rilevata dal sensore, si ottiene una V_M dipendente dal campo magnetico B generato dalla corrente I.

In prima approssimazione è corretto porre che: $I \cong N \cdot I_1$ dove N rappresenta il numero di spire che compongono l'avvolgimento sul toro.

La I_1 è possibile ricavarla con l'applicazione della legge di Ohm

$$I_1 = \frac{V_M}{R}$$

quindi, per una data V_M la corrente I rilevata sarà:

$$I = \frac{N \cdot V_M}{R}$$

Si noti come, dato che la I_1 è più piccola di un fattore N rispetto alla I, è possibile rilevare una forte corrente I sottoponendo il resistore R a una piccola corrente I_1.

In altre parole, misuriamo una corrente piccola anziché una molto grande.

Esempio: abbiamo un cavo elettrico percorso da corrente I = 10 A e abbiamo impostato un numero N di spire pari a 1000.

La I_1 presente sul nostro resistore sarà soltanto 10 mA. Per un resistore pari a 1 kW è rilevata una tensione V_M = 10 V.

Convertendo questa tensione analogica in numero digitale, ad esempio con un convertitore ad approssimazioni successive (vedere il suo funzionamento su Il Cinescopio di dicembre 2003) è possibile comandare un display a sette segmenti per una visualizzazione a più digit. □