

RUMORE ED INTERFERENZE ELETTRICHE

2.1 Introduzione

Per *rumore* si intende qualunque tipo di disturbo che tende ad oscurare il segnale utile.

Rumore può essere generato all'interno di un circuito o provenire da una sorgente naturale o artificiale esterna. Quando il rumore è generato dall'interno di un circuito si dice *intrinseco*, quando proviene da una sorgente esterna si dice *estrinseco*.

Il rumore è generalmente causato da sorgenti elettriche ma possono nascere interferenze anche a causa di vibrazioni meccaniche, retroazioni acustiche, sorgenti elettrochimiche. In aggiunta, per caratterizzare il rumore dalla sua sorgente, è opportuno classificarlo in base al suo spettro in frequenza ed alla distribuzione in ampiezza.

Quando il rumore è caratterizzato da uno spettro di potenza piatto viene detto rumore bianco (in analogia con la luce bianca che contiene tutte le frequenze). Se si raddoppia la banda di un sistema si raddoppia la potenza del rumore bianco eventualmente associato.

Se il rumore è inversamente proporzionale alla frequenza viene detto rumore 1/f o rosa. Il rumore rosa è presente in molti sistemi fisici ma è particolarmente importante in sistemi a bassa frequenza. In sistemi elettrici, rumore rosa viene generato quando una corrente fluisce attraverso un materiale non omogeneo. Rumore rosa è anche generato in interruttori o in altre superfici di contatto che sono composti di materiali diversi; in tal caso prende il nome di rumore di contatto.

Le sorgenti di tipo naturale sono aleatorie ed includono il rumore termico, quello atmosferico, ed il rumore nei semiconduttori, mentre il rumore artificiale include sorgenti quali i motori, le lampade a fluorescenza, le linee di potenza ed i trasmettitori.

Si parla di *interferenza* quando il rumore causa un malfunzionamento in un circuito.

Esistono due approcci per ridurre gli effetti del rumore nei sistemi di misura elettronici. Il primo consiste nel ridurre il rumore o alla sorgente o al ricevitore tramite schermature, filtraggi o appropriate messe a terra. Il secondo metodo si basa su tecniche di ricostruzione del segnale per estrarre quest'ultimo dal segnale rumoroso.

2.2 Modalità di accoppiamento delle interferenze

I segnali di disturbo prodotti dalle sorgenti sostanzialmente sotto forma di onde elettromagnetiche possono essere captati da apparecchiature per loro natura destinate a ricevere segnali di tal guisa, come ricevitori radiofonici e televisivi, stazioni radar, ecc. Oppure possono essere captati da apparecchi non operanti con segnali irradiati ma che hanno parti che si comportano da antenne parassite: potrebbe essere il caso di tratti conduttori su piastre di circuiti stampati oppure linee di alimentazione e comunicazione via cavo che si comportano da antenne e poi conducono il disturbo in esse indotto fino al circuito vittima.

Il canale di accoppiamento mostrato nello schema di propagazione del rumore di fig. 2.13, dunque, può essere di differenti tipi.



Fig. 2.13 Schema di accoppiamento elettromagnetico tra sorgente e vittima

Per studiare esattamente uno schema di accoppiamento elettromagnetico bisognerebbe risolvere le equazioni di Maxwell particolarizzate al fenomeno in questione. Le grandezze fisiche che intervengono in queste equazioni sono funzioni di tre variabili spaziali (x, y, z) e di una variabile temporale (t). In molte circostanze pratiche questo studio può essere molto semplificato eliminando la dipendenza spaziale; in tal caso l'analisi dei fenomeni è leggermente approssimata ma le relazioni che li governano sono quelle semplici della teoria delle reti; tale approccio risulta valido nelle seguenti ipotesi:

- che tutti i campi elettrici siano racchiusi dentro i condensatori;
- che tutti i campi magnetici siano racchiusi dentro gli induttori;
- che le dimensioni dei circuiti siano piccole rispetto alla lunghezza d'onda dei segnali coinvolti.

Quest'ultima ipotesi rende anche possibile la rappresentazione, tramite semplici elementi concentrati, degli accoppiamento tra circuiti vicini per effetto del campo di induzione.

2.2.1 Accoppiamento per conduzione e per impedenza comune

L'accoppiamento conduttivo consiste essenzialmente nel passaggio di rumore attraverso un conduttore: un filo (ad esempio i conduttori di alimentazione di una apparecchiatura) che passa in un ambiente rumoroso, raccoglie il rumore e lo porta in un circuito, dando così luogo all'interferenza.

Per porvi rimedio, occorre o impedire al filo di raccogliere il rumore, o rimuovere il rumore da esso, disaccoppiandolo col circuito.

Per quanto riguarda il secondo tipo di accoppiamento, esso si ha quando ci sono correnti provenienti da due circuiti diversi che scorrono attraverso un'impedenza comune.

Ad esempio, in Fig. 2.14a, la caduta di tensione (tensione di terra) vista da ciascun circuito è influenzata dalla corrente dell'altro.

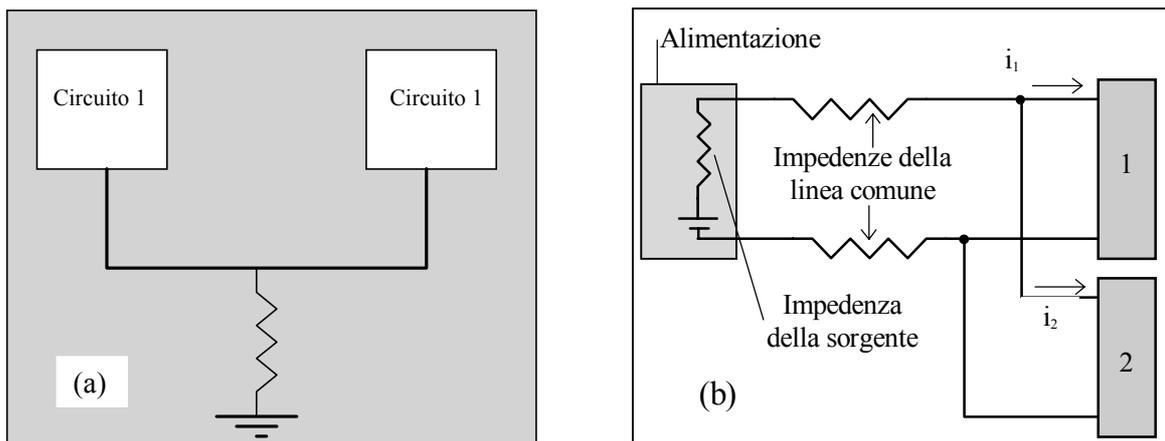


Fig. 2.14 Esempio di accoppiamento per impedenza comune.

Oppure, due circuiti con l'alimentazione in comune (Fig. 2.14b): qualsiasi variazione della corrente di alimentazione richiesta da un circuito influirà sulla tensione ai terminali dell'altro circuito, a causa delle impedenze comuni delle linee di alimentazione e dell'impedenza interna dell'alimentatore.

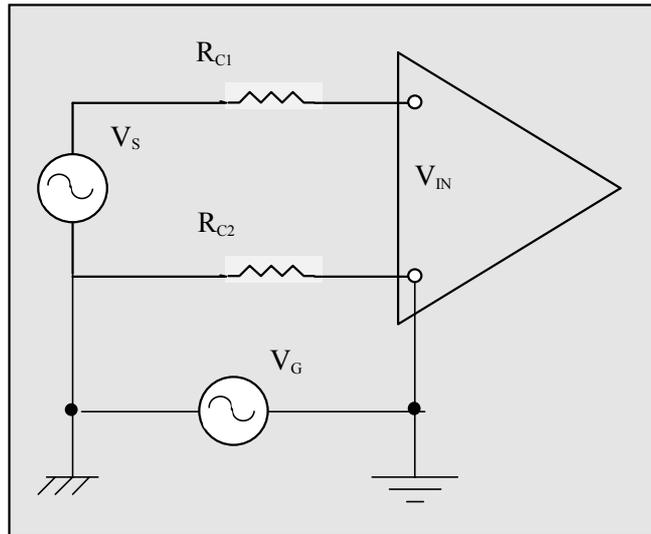


Fig. 2.15 Esempio di accoppiamento conduttivo.

Un altro meccanismo di accoppiamento del rumore si ha quando un circuito presenta più prese di massa tra le quali esistono delle differenze di potenziale. In Fig. 2.15 è mostrato un esempio di questo tipo di accoppiamento; sono utilizzati due simboli di terra differenti proprio per mettere in rilievo il fatto che due terre fisicamente separate possono essere a potenziale diverso. Nell'esempio illustrato, tale differenza di potenziale si presenta all'ingresso dell'amplificatore come rumore.

2.2.2 Accoppiamento capacitivo

Come è stato precedentemente affermato, se le dimensioni dei circuiti interessati dall'accoppiamento sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda delle grandezze in gioco, l'interazione tra i circuiti può essere analizzata mediante la teoria delle reti elettriche. In base a ciò, l'accoppiamento dovuto ai campi elettrici può essere rappresentato mediante capacità concentrate, mentre l'accoppiamento dovuto ai campi magnetici può essere rappresentato mediante mutue induttanze tra circuiti.

L'accoppiamento capacitivo tra due conduttori può essere schematizzato come illustrato in Fig. 2.16.

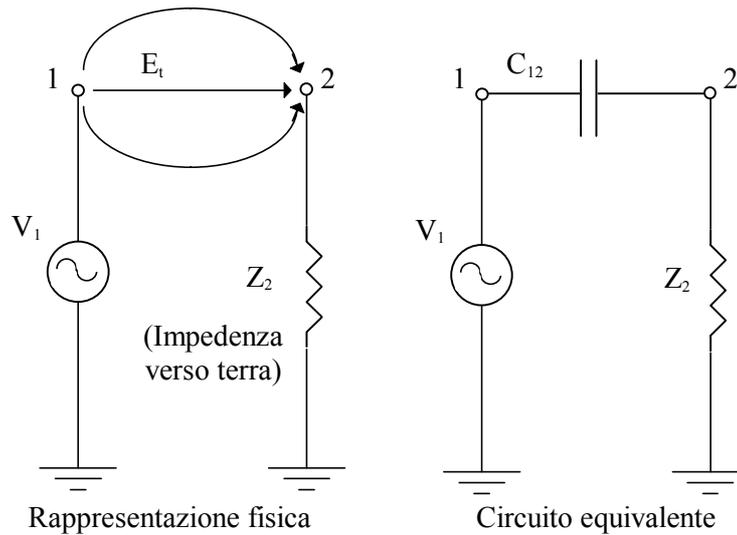


Fig. 2.16 Modello di accoppiamento di campo elettrico.

Per effettuare l'analisi dell'accoppiamento di campo elettrico tra due circuiti distinti, i circuiti vengono modellati come due conduttori, (Fig. 2.17), aventi capacità parassite C_{1G} e C_{2G} verso la terra e capacità di accoppiamento C_{12} . Il circuito 2 ha resistenza complessiva verso terra pari ad R , derivante dalla circuiteria ad esso collegata, il cui effetto incide anche su C_{2G} .

La tensione di rumore che si accoppia col circuito 2 per effetto della tensione verso terra V_1 del circuito 1 è:

$$V_N = \frac{j\omega [C_{12} / (C_{12} + C_{2G})]}{j\omega + 1/R(C_{12} + C_{2G})} V_1$$

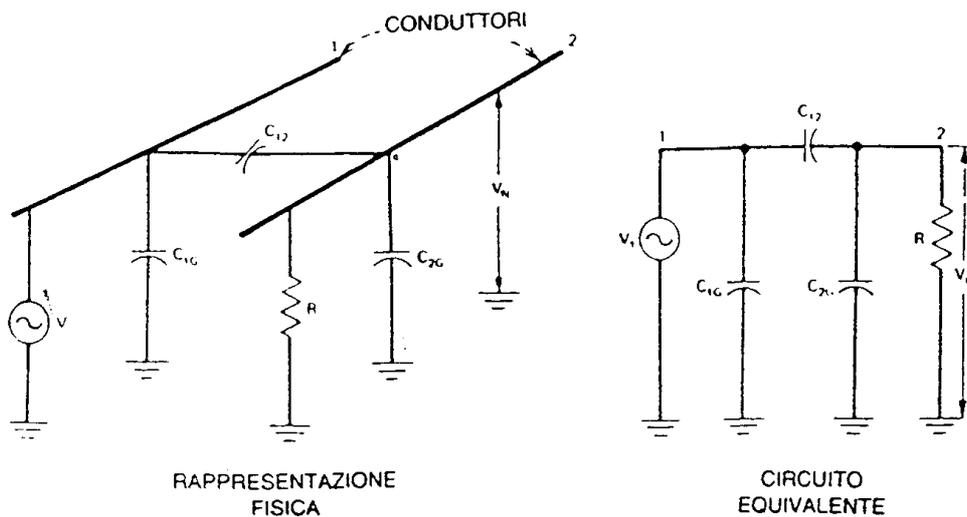


Fig. 2.17 Esempio di accoppiamento capacitivo tra due circuiti.

Se la resistenza complessiva del circuito vittima verso terra R è più bassa dell'impedenza parassita dovuta a C_{12} e a C_{2G} , cioè:

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$

si ha:

$$V_N = j\omega R C_{12} V_1$$

Se, invece, la resistenza del circuito 2 verso terra è grande:

$$R \gg \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$$

si ha:

$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right) V_1$$

Quindi, l'andamento della tensione di rumore è quello illustrato nella Fig. 2.18: per basse frequenze la tensione di rumore cresce linearmente con la frequenza; per frequenze alte, è costante.

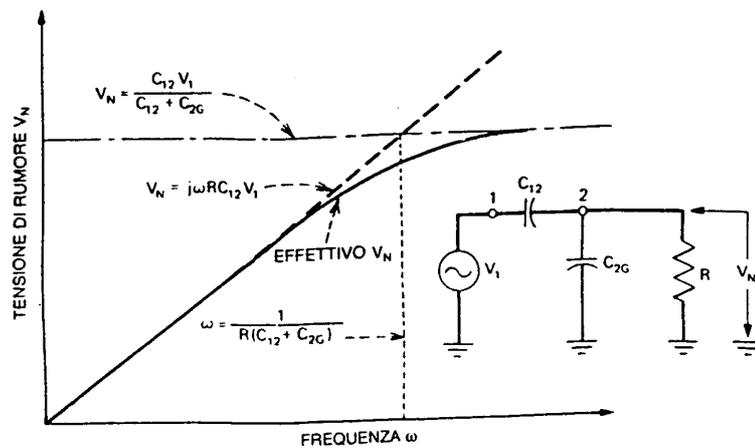


Fig. 2.18 Risposta in frequenza della tensione di rumore in caso di accoppiamento capacitivo tra due circuiti.

Per limitare questo accoppiamento, si può immaginare di mettere uno schermo intorno al conduttore vittima (Fig. 2.19); restano dunque definite le capacità C_{1S} tra il conduttore aggressore e lo schermo del circuito vittima, e C_{SG} tra quest'ultimo e la terra.

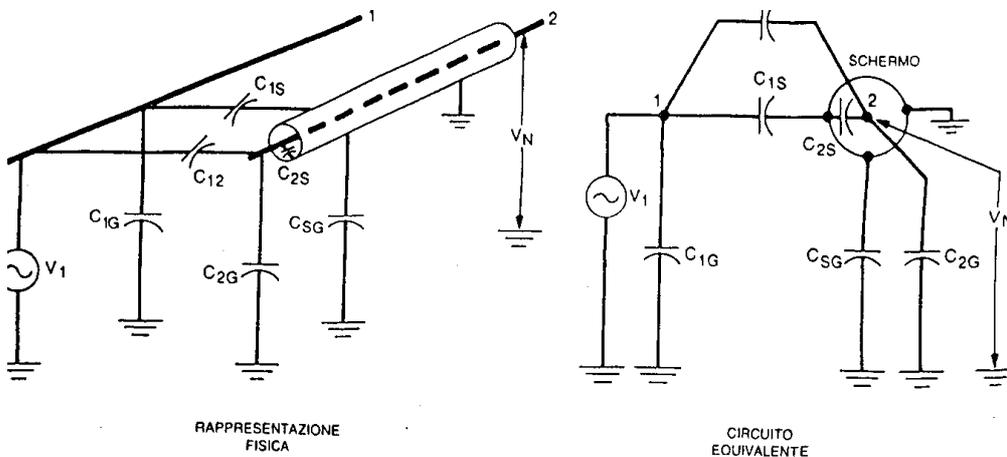


Fig. 2.19 Accoppiamento capacitivo tra due circuiti: effetto dello schermo nel caso di resistenza infinita verso terra.

In caso di conduttore 2 con impedenza infinita verso terra e di schermo ideale ($C_{12}=0$), la tensione di rumore indotta è pari alla tensione a cui si porta lo schermo:

$$V_S = \left(\frac{C_{1S}}{C_{1S} + C_{2S}} \right) V_1$$

Quindi, se lo schermo è messo a terra in un punto, la tensione di rumore è zero. In realtà, lo schermo non è mai ideale, e resta sempre un minimo di accoppiamento tra i due circuiti ($C_{12} \neq 0$); in tal caso, c'è una tensione di rumore, pari a:

$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G} + C_{2S}} \right) V_1$$

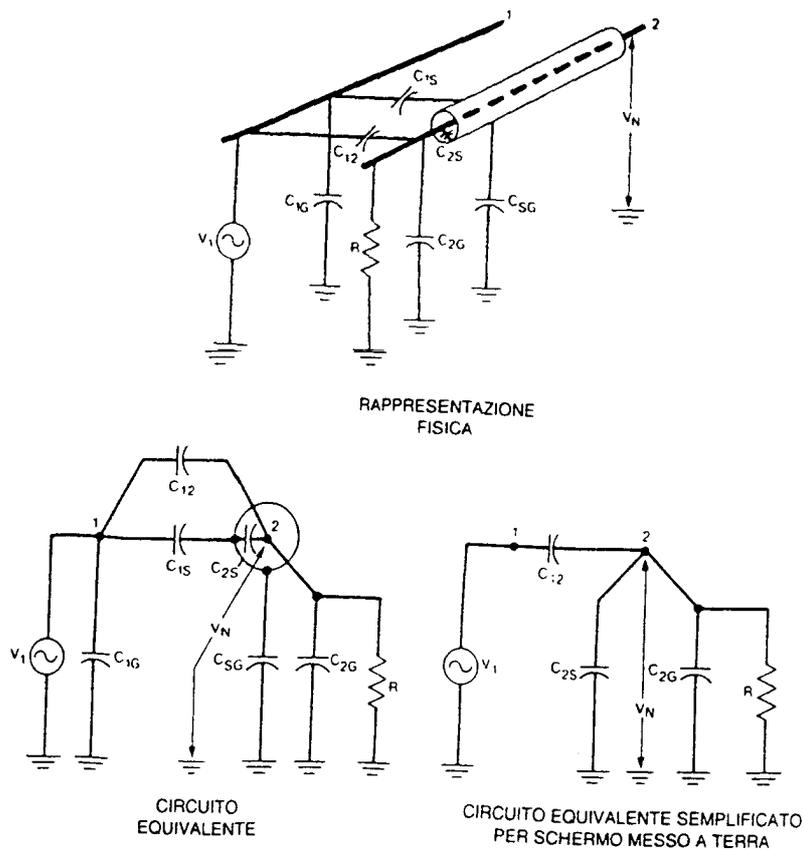


Fig. 2.20 Accoppiamento capacitivo tra due circuiti: effetto dello schermo nel caso di resistenza finita verso terra.

Se il conduttore vittima ha resistenza finita verso terra, la tensione di rumore diventa:

$$V_N = \frac{j\omega [C_{12} / (C_{12} + C_{2G} + C_{2S})]}{j\omega + 1/R(C_{12} + C_{2G} + C_{2S})} V_1$$

Se, come normalmente accade, questa resistenza verso terra è sufficientemente piccola:

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G} + C_{2S})}$$

si ha:

$$V_N = j\omega R C_{12} V_1$$

E' la stessa equazione ottenuta per il cavo non schermato, ma qui C_{12} è molto più piccola, per la presenza dello schermo.

È quindi evidente che, per una buona schermatura dal campo elettrico occorre ridurre C_{12} (che è, in pratica, la capacità tra il conduttore aggressore e le parti non schermate del conduttore ricettore) migliorando la schermatura, e prevedere una buona messa a terra dello schermo. Normalmente è sufficiente un singolo collegamento di terra; se il cavo è più lungo di $\lambda/20$, possono essere necessarie messe a terra multiple.

2.2.3 Accoppiamento induttivo

Un campo magnetico di induzione B incidente su un circuito di area A (Fig. 2.21) con una inclinazione θ una tensione di rumore V_N pari a:

$$V_N = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot \vec{dA}$$

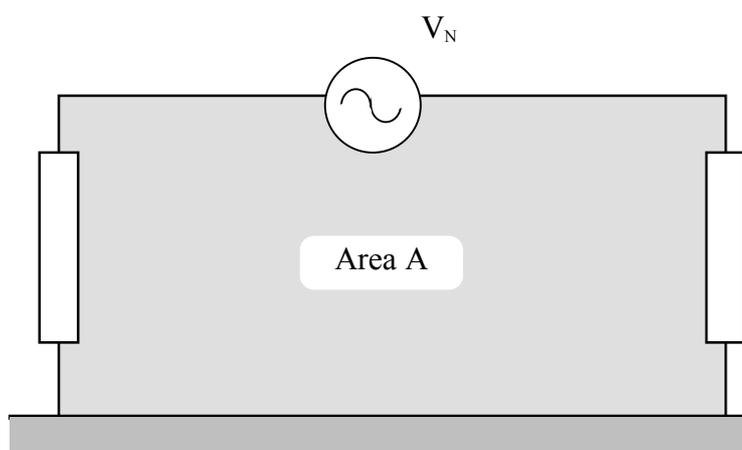


Fig. 2.21 Calcolo della tensione di rumore indotta da un campo magnetico incidente su di un circuito di area A .

Se il campo magnetico è sinusoidale:

$$V_N = j\omega BA \cos\theta$$

È possibile ridurre la tensione di rumore agendo sul campo aggressore B con la separazione fisica dei due conduttori o con l'intreccio dei fili di terra (purché la corrente scorra nella coppia intrecciata e non attraverso il piano di terra); oppure agendo sull'area A ponendo il conduttore vittima più vicino al piano di terra (se la corrente di terra scorre su di esso) o usando due conduttori intrecciati (se la corrente di ritorno scorre su uno dei due); oppure agendo sull'inclinazione θ , orientando opportunamente i due circuiti.

L'accoppiamento magnetico può essere rappresentato in termini di impedenza mutua tra due circuiti di cui uno, la sorgente di disturbo, è percorso da una corrente I_1 , come illustrato in Fig. 2.22, che induce una tensione di rumore sul circuito 2, legato al primo da una mutua induttanza M .

La tensione di rumore sul circuito vittima (2) è:

$$V_N = j\omega M I_1 = M \frac{dI_1}{dt}$$

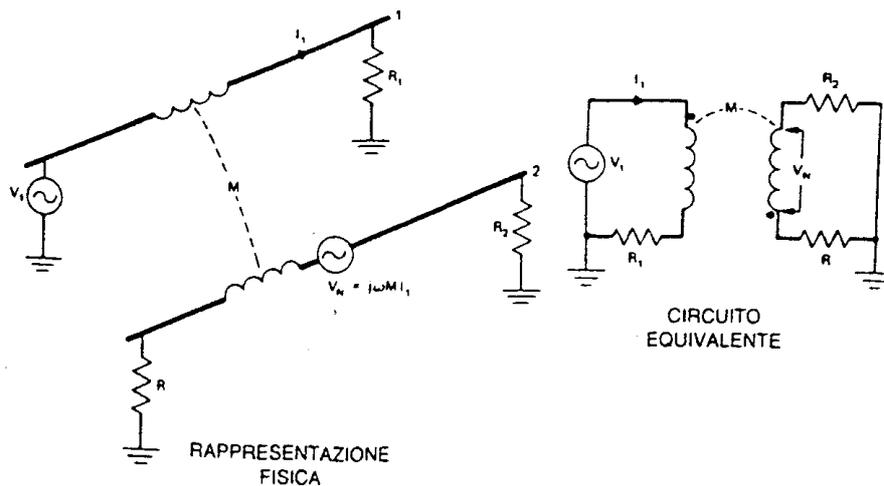


Fig. 2.22 Esempio di accoppiamento magnetico tra due circuiti.

Se si scherma un conduttore con uno schermo non magnetico (Fig. 2.23), occorre tenere in conto anche l'accoppiamento tra il conduttore sorgente e lo schermo (M_{1S}), oltre a quello tra i due conduttori.

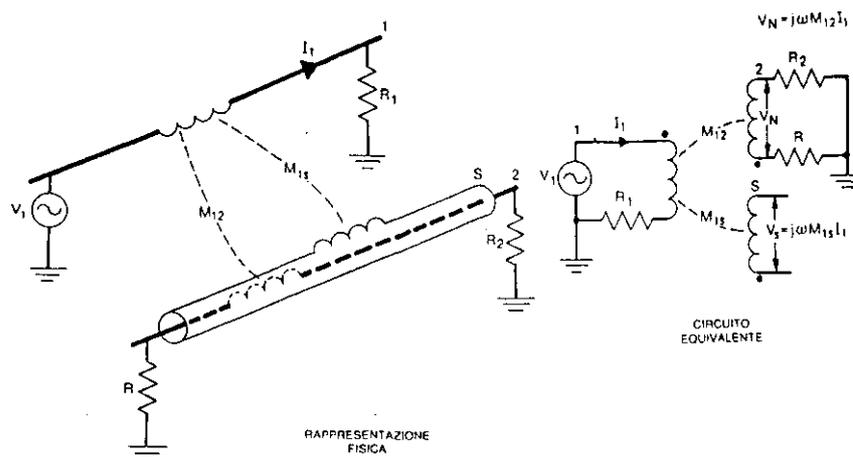


Fig. 2.23 Effetto di uno schermo non magnetico.

Dunque, uno schermo non magnetico non ha alcun effetto sulla tensione magneticamente indotta sul conduttore. Se lo schermo è messo a terra ad una estremità, la tensione indotta sul conduttore 2 non cambia; tuttavia lo schermo raccoglie una tensione:

$$V_S = j\omega M_{1S} I_1$$

Se lo schermo è messo a terra ad entrambe le estremità, in esso scorrerà una corrente, che indurrà una seconda tensione di rumore sul conduttore 2. Per calcolarla, occorre determinare l'accoppiamento di induttanza mutua fra schermo e conduttore centrale; si ha che l'induttanza mutua è uguale alla autoinduttanza dello schermo: $M = L_S$.

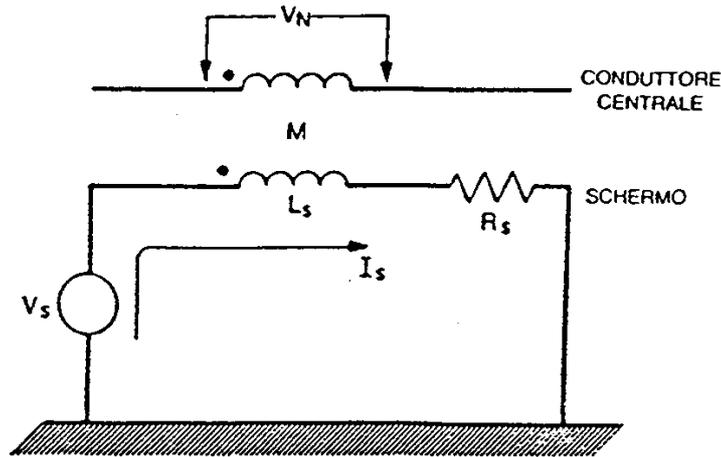


Fig. 2.24 Circuito equivalente per il calcolo della tensione di rumore indotta nel conduttore centrale dalla corrente fluente sullo schermo.

La tensione di rumore indotta nel conduttore centrale dalla corrente di schermo I_S é:

$$V_N = j\omega M I_S$$

cioè:

$$V_N = \frac{j\omega M V_S}{L_S} \left(\frac{1}{j\omega + R_S/L_S} \right)$$

e, essendo $M = L_S$ si ha:

$$V_N = \left(\frac{j\omega}{j\omega + R_S/L_S} \right) V_S$$

Dunque, l'accoppiamento magnetico tra due circuiti, di cui il ricevitore è schermato con uno schermo non magnetico messo a terra, é schematizzabile come in Fig. 2.25, in cui sono evidenti le due componenti di polarità opposta nella tensione indotta sul conduttore 2: la V_c , indotta direttamente dal conduttore 1, e la V_2 , dovuta alla corrente di schermo indotta.

La tensione di rumore raccolta complessivamente dal circuito 2 é:

$$V_N = V_2 - V_c$$

Essendo poi $M_{1S} = M_{12}$, si ha:

$$V_N = j\omega M_{12} I_1 \left(\frac{R_S/L_S}{j\omega + R_S/L_S} \right)$$

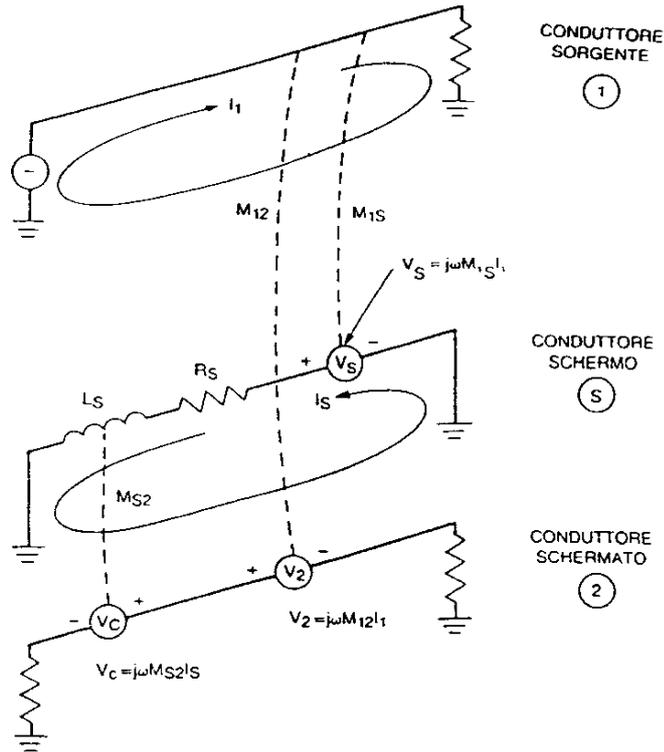


Fig. 2.25 Circuito equivalente all'accoppiamento di campo magnetico tra due conduttori, di cui la vittima é schermato.

Nella Fig. 2.26, é illustrato l'andamento della tensione di rumore in funzione della frequenza nei due casi di conduttore ricettore non schermato e schermato con schermo messo a terra.

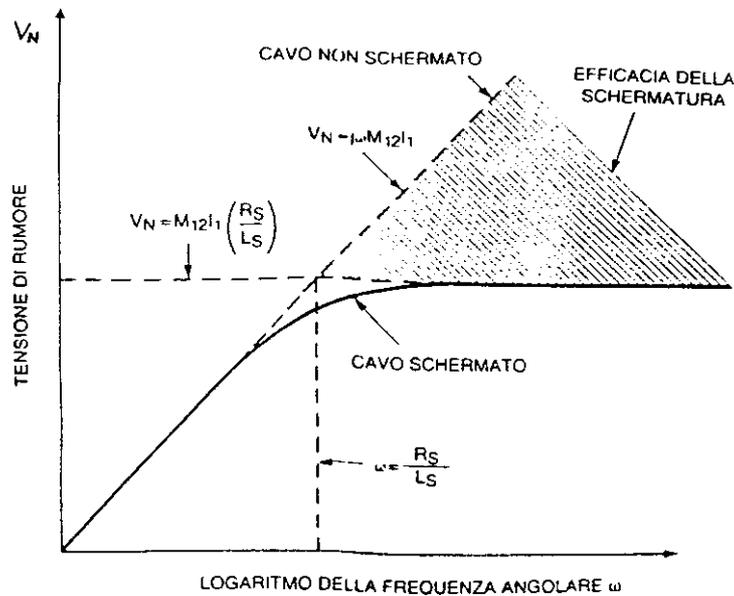


Fig. 2.26 Efficacia di schermatura: andamento della tensione di rumore nel caso di accoppiamento magnetico su conduttore schermato e non.

Alle basse frequenze i due conduttori vittima si comportano allo stesso modo. Ma, a frequenze superiori a quella di taglio, la tensione indotta tende a rimanere costante. Si vede dunque che uno schermo conduttore ha efficacia solo per valori sufficientemente elevati della frequenza, in dipendenza delle caratteristiche dello schermo.

2.2.4 Accoppiamento delle interferenze per irradiazione.

Una sorgente può emettere energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche, che si propagano come è noto dalla Teoria dei Campi. In Compatibilità Elettromagnetica, però, a differenza di quello che si fa studiando i classici problemi di elettromagnetismo, ci si riferisce raramente al campo lontano, in quanto le sorgenti maggiormente disturbanti sono quelle sufficientemente vicine all'oggetto "vittima". Dunque nella stragrande maggioranza dei casi, in Compatibilità Elettromagnetica ci si trova a trattare con problemi cosiddetti di "near field", ben complessi da affrontare analiticamente, considerando il fatto che una qualsiasi apparecchiatura che si comporta da antenna emettente ha sempre una geometria piuttosto complessa, che può essere vista come una particolare combinazione di un certo numero di dipoli elettrici e magnetici assemblati insieme. È questo un problema di difficile soluzione; ma, spesso, per ottenere una comprensione di base del fenomeno, è sufficiente immaginare di avere a che fare con un dipolo elementare elettrico o magnetico, dei quali è possibile calcolare i campi irradiati, vicini e lontani.

2.3 Tecniche di riduzione degli effetti del rumore e delle interferenze

2.3.1 Separazione fisica

Poichè le mutue induttanze e gli accoppiamenti capacitivi tra circuiti di misura e circuiti di potenza sono inversamente proporzionali alla distanza tra i circuiti, quest'ultima va resa quanto più elevata possibile.

2.3.2 Schermatura elettromagnetica

La maniera più semplice di ridurre gli effetti di accoppiamenti di tipo induttivo con una sorgente esterna di interferenza è mostrato in figura.

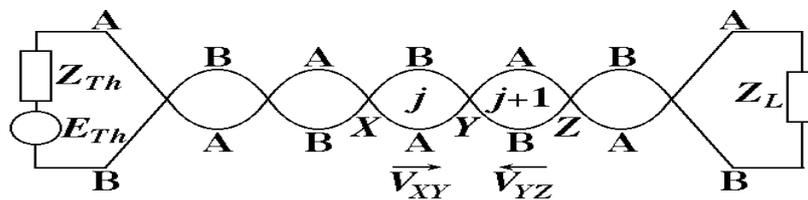


Fig. 2.27

I due conduttori A e B del circuito di misura sono attorcigliati ("twisted") in circuiti di area pressoché uguale. L'ampiezza della tensione indotta per interferenza in un determinato circuito è proporzionale all'area del circuito ed alla velocità di variazione del campo magnetico esterno. Il segno della tensione indotta dipende dall'orientamento dei conduttori A e B. Detta cioè V_{XX} la tensione indotta nel circuito j-esimo tra X e Y, la tensione indotta nel circuito (j+1)-esimo tra Y e X sarà uguale ed opposta nel caso ideale in cui i circuiti hanno la stessa area e sono interessati da medesimo campo. Iterando il ragionamento si ottiene per l'intera coppia di conduttori una tensione indotta notevolmente ridotta.

2.3.3 Schermatura elettrostatica

Il miglior metodo per evitare problemi di accoppiamento capacitivo in un circuito di potenza è di inglobare l'intero circuito di misura in uno schermo metallico messo a terra. La figura mostra la configurazione ideale; lo schermo è connesso direttamente a terra in un unico punto, o presso la sorgente o presso il ricevitore. Non c'è collegamento diretto tra lo schermo ed il circuito di misura; esistono solo dei percorsi ad alta impedenza tramite la capacità parassita C_{SM} .

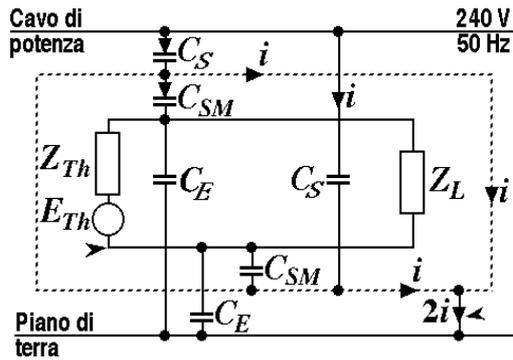


Fig. 2.28

Lo schermo offre un percorso a bassa impedenza verso terra alle correnti di interferenza i ; le correnti che attraversano C_{SM} e C_E sono piccole riducendo così le interferenze di modo comune e di modo differenziale.

Tale circuito ideale con il sistema di misura completamente isolato dallo schermo e lo schermo messo a terra in un solo punto può essere difficile da realizzare nella pratica per le seguenti ragioni:

- la sorgente del segnale può essere direttamente connessa alla terra locale tramite la struttura su cui è montata;
- il ricevitore può essere direttamente collegato alla terra locale; un esempio è rappresentato dai sistemi di misura basati su calcolatore dove il ricevitore deve essere direttamente collegato alla terra del computer;
- ci possono essere collegamenti indiretti tramite impedenze parassite.

La figura illustra il problema generale: il circuito di misura PQRS è connesso allo schermo tramite l'impedenza sorgente-schermo Z_{SS} e l'impedenza ricevitore-schermo Z_{RS} . Lo schermo è connesso a terra nel punto U lato sorgente tramite Z_{SU} e nel punto T lato ricevitore tramite l'impedenza Z_{ST} . Il circuito di misura può essere affetto da una tensione d'interferenza dovuta sia alla tensione di modo comune V_E (differenza di potenziale tra U e T) sia alla vicinanza con i circuiti di potenza.

Lo schermo è messo a terra da ambo i lati creando un loop di terra UXYT; le correnti circolanti su di esse possono dare origine a tensioni di interferenza nel circuito di misura.

4) Due ulteriori combinazioni con $Z_{SS} = Z_{RS} = L$

Le 6 rimanenti sono meno vulnerabili alle interferenze

1) $Z_{SS} = Z_{ST} = Z_{RS} = H, \quad Z_{SU} = L$

2) $Z_{SS} = Z_{SU} = Z_{RS} = H, \quad Z_{ST} = L$

corrispondono alla situazione ideale (circuito di misura isolato).

3) $Z_{SS} = Z_{SU} = L, \quad Z_{RS} = Z_{ST} = H$

4) $Z_{SS} = Z_{SU} = H, \quad Z_{RS} = Z_{ST} = L$

la sorgente è a terra ed il ricevitore è isolato o viceversa

5) $Z_{SS} = Z_{ST} = L, \quad Z_{RS} = Z_{SU} = H$

6) $Z_{SS} = Z_{ST} = H, \quad Z_{RS} = Z_{SU} = L$

corrispondono allo schermo connesso da un lato al circuito di misura e dall'altro a terra con conseguente confusione

RIASSUMENDO

Z_{SU} o Z_{ST} ma non entrambi = L

Z_{SS} o Z_{RS} o entrambi = H

2.3.4 Uso di amplificatori differenziali

Possono essere utilmente impiegati per ridurre le interferenze di modo comune.

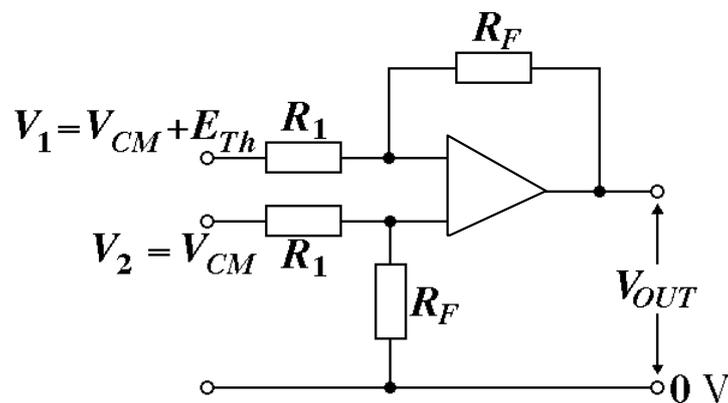


Fig. 2.30

Idealmente:

$$V_{OUT} = \frac{R_F}{R_1} (V_2 - V_1) = -\frac{R_F}{R_1} E_{Th}$$

In realtà

$$V_{OUT} = -\frac{R_F}{R_1} E_{Th} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{V_{CM}}{C.M.R.R.}$$

Per valutare l'effetto del comportamento reale si consideri, ad esempio, di dover misurare un segnale di valore 1 mV avendo $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$; $R_f = 1 \text{ M}\Omega$; $V_{cm} = 1 \text{ V}$; $CMRR = 10^5 = 100 \text{ dB}$.

In queste ipotesi si ottiene una tensione in uscita pari a -1.01 V, con un errore cioè dell'1%.

2.3.5 Filtraggio

L'uso dei filtri è particolarmente diffuso per ridurre gli effetti del rumore (Fig. 2.31). L'uso del filtro è possibile quando la banda del segnale e quella del rumore sono distinte.

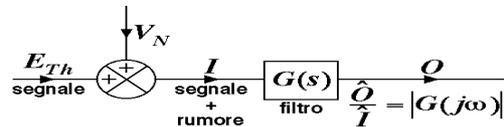


Fig. 2.31

2.3.6 Media

L'impiego della media su più misure è utile per ricostruire segnali di misura ripetitivi affetti da rumore casuale, anche con bassi rapporti segnale rumore.

$$y_i^{AV} = \frac{1}{p} (y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{ip}) \quad i = 1, \dots, N$$

$$y_{AV}(t) = \frac{1}{p} (y_1(t) + y_2(t) + \dots + y_p(t))$$

$$\sigma_{AV} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{p^2} + \frac{\sigma_2^2}{p^2} + \dots + \frac{\sigma_p^2}{p^2}}$$

Se $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_p = \sigma$

$$\sigma_{AV} = \sqrt{\frac{p\sigma^2}{p^2}} = \frac{\sigma}{\sqrt{p}}$$

Si consideri ad esempio il caso di 50 misure ($p=50$), si ottiene una deviazione standard $\sigma = \sigma/\sqrt{50} = \sigma/7$ e quindi un aumento del rapporto segnale rumore di +17 dB.

2.3.8 Autocorrelazione

La funzione di Autocorrelazione di un segnale sinusoidale è definita come:

$$R_{yy}(\beta) = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} y(t)y(t-\beta)dt$$

Può essere utilizzata per rilevare la presenza di un segnale ripetitivo corrotto da rumore casuale. Possono però essere misurate ampiezza e periodo e non ricostruito il segnale; si perde quindi l'informazione sulla fase.

Si ha infatti:

$$R_{yy}^{S+R}(\beta) = R_{yy}^S(\beta) + R_{yy}^R(\beta)$$

Per B molto grande $R_{yy}(B)$ tende a zero e quindi è possibile estrarre le informazioni sul segnale.