

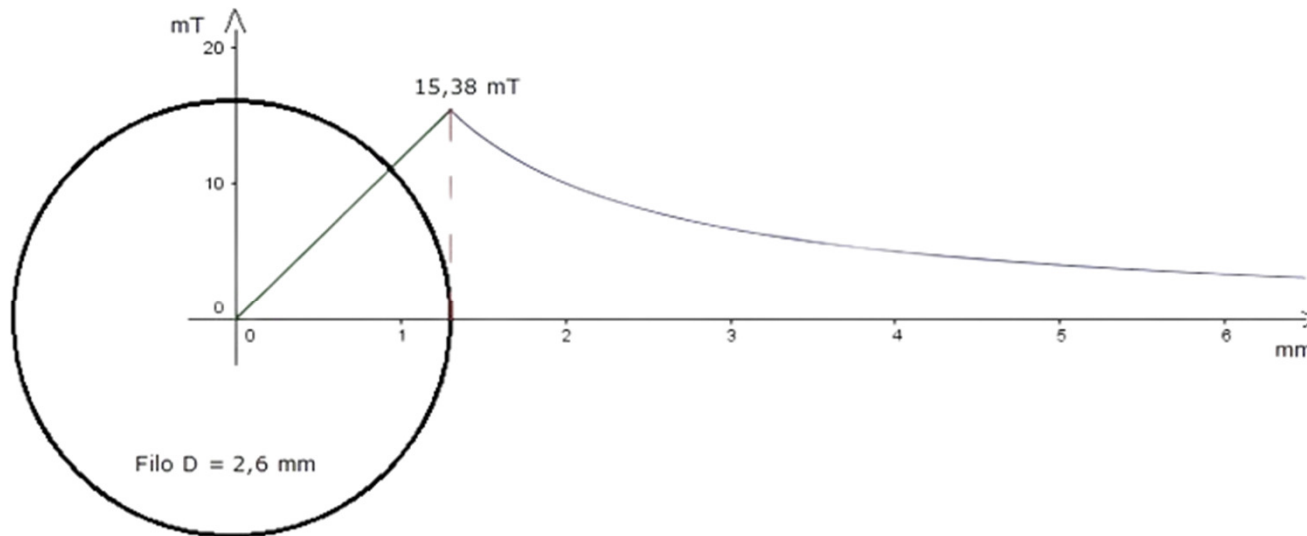
EFFETTO PELLE ed EFFETTO DI PROSSIMITÀ

By iw2fnd Lucio

Induzione magnetica nei conduttori

Per comprendere l'effetto pelle e l'effetto di prossimità nei conduttori filari è necessario conoscere la distribuzione dell'induzione magnetica B che si crea all'interno ed all'esterno del conduttore, quando è percorso da una corrente.

Se applichiamo la legge di Ampère ad un filo, di raggio $r = 1,3$ mm, percorso da una corrente di $I = 1$ A otteniamo il grafico sotto.



All'interno del conduttore l'induzione magnetica B aumenta col crescere della distanza dal centro fino al bordo del filo ($B = 15,38$ mT). Al di fuori del filo, invece, decresce con l'inverso della distanza dal centro.

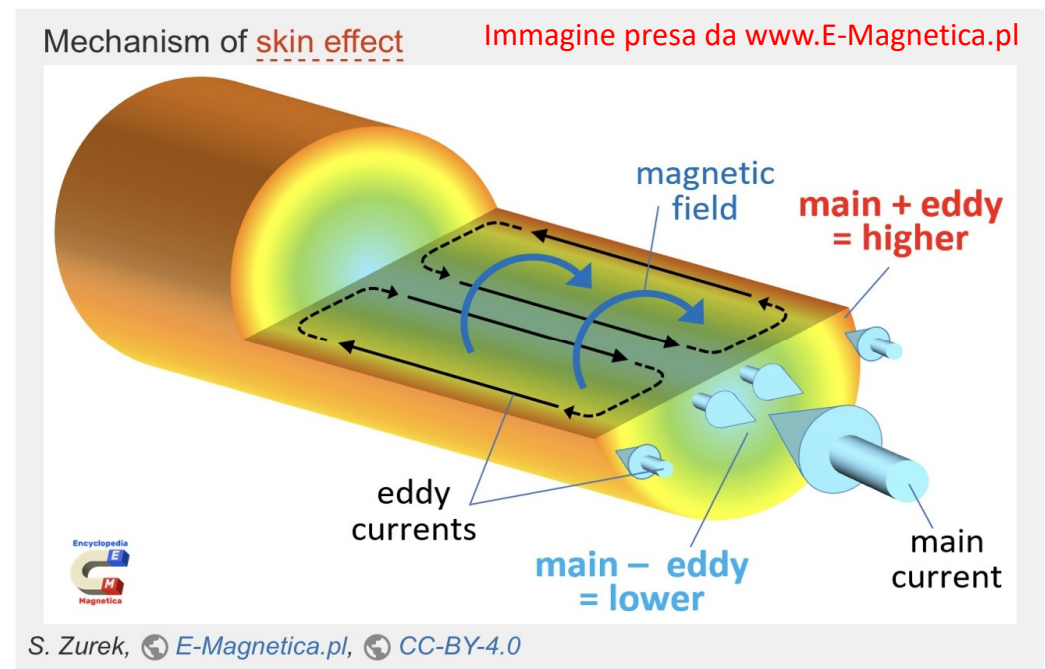
L'effetto pelle

All'interno del conduttore (il filo) è quindi presente un campo magnetico crescente con la distanza dal centro, causato dalla corrente principale che lo percorre (main current). Se la corrente è variabile nel tempo, p. es.: è di tipo sinusoidale, lo sarà anche l'induzione B nel conduttore. Ma se un conduttore è immerso in un campo magnetico variabile nel tempo in esso s'induce una forza elettromotrice (f.e.m.) che produce un vortice (eddy) di

corrente (detta corrente di Foucault) che, a sua volta, genera un campo magnetico che si oppone alla causa che l'ha generato (legge di Faraday, Neumann, Lenz). In figura la corrente indotta è raffigurata con le linee nere.

La corrente principale, quindi, si troverà nel centro del conduttore la corrente indotta contraria al suo flusso e verso la pelle (skin) del conduttore favorevole.

Quindi, la corrente si allontanerà sempre più dal centro del conduttore per concentrarsi nella pelle. Da ciò deriva il nome effetto pelle (skin effect).



L'effetto pelle

Quindi, la densità di corrente aumenta nelle vicinanze dello strato superficiale del conduttore e diminuisce esponenzialmente mano a mano che ci si avvicina al centro del conduttore. La profondità di penetrazione (skin depth) è la distanza dal bordo δ (delta) dove la corrente è diminuita del 37% ($1/e$).

La profondità di penetrazione δ dipende dalla radice quadrata: della frequenza f , dalla permeabilità magnetica μ e dalla conducibilità σ del conduttore.

Immagine presa da <https://en.wikipedia.org/>

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

Fatte le dovute semplificazioni, la resistenza R di un conduttore diventa:

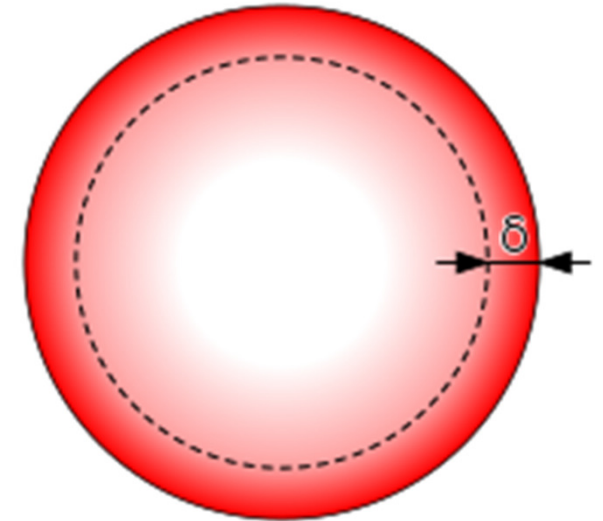
$$R = 6,325 \cdot 10^{-4} \frac{l}{d} \sqrt{f \mu_r \rho} [\Omega] \quad \text{Con } f \text{ in [Hz], } \rho \text{ in [n}\Omega\text{m]}, l \text{ e } d \text{ in [m].}$$

Per i conduttori cilindrici di rame (fili di rame) diventa:

$$R = 8,304 \cdot 10^{-8} \frac{l}{d} \sqrt{f} [\Omega] \quad \text{Con } l \text{ e } d \text{ nella stessa unità di misura.}$$

L'espressione della resistenza indica chiaramente che la resistenza R aumenta con la lunghezza del conduttore l e la radice quadrata della frequenza f mentre diminuisce col diametro d del conduttore.

Su https://e-magnetica.pl/doku.php/calculator/skin_depth c'è un ottimo calcolatore per il δ .



L'effetto pelle

Tanta teoria per prendere spunti per la pratica.

Uno dei modi per ridurre l'aumento della resistenza dei conduttori a causa dell'effetto pelle è di usare conduttori multi trefolo (isolati tra loro) e **ritorti** in modo da formare una corda (p.es.: 7 trefoli). Questa tecnica è efficace fino a qualche centinaio di kHz, oltre si comporta come il conduttore pieno; senza dare vantaggi. Tant'è che il conduttore centrale talvolta viene sostituito con un cavetto d'acciaio per aumentare la tenuta alla trazione.

Un altro modo per ridurre l'aumento della resistenza dei conduttori è di usare conduttori con tantissimi trefoli isolati tra loro, detti fili **Litz**. Ma questi fili sono utili in MF fino a circa 3 MHz, oltre l'effetto pelle si fa sentire ugualmente.

Un'altra tecnica è quella di placcare con l'argento i conduttori di rame in modo da far scorrere la maggior parte della corrente in uno strato di pelle più conduttivo. La **placcatura** funziona finché l'argento non si ossida col solfuro d'argento (patina nera), che è un cattivo conduttore. I conduttori di rame, invece, hanno l'ossido conduttivo per cui, da ossidati, sono meglio di quelli placcati d'argento ma ossidati.

In conclusione, il metodo migliore per ridurre l'effetto pelle sia aumentare la sezione del conduttore di rame.



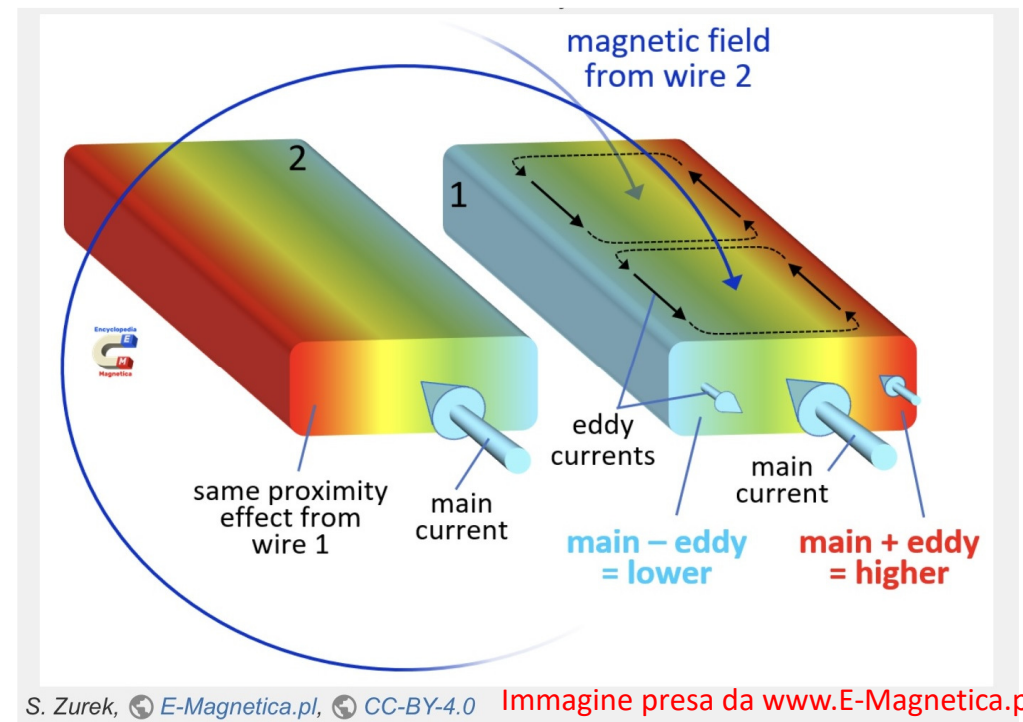
L'effetto di prossimità

All'esterno del conduttore percorso da corrente le linee del campo magnetico si estendono circolarmente coinvolgendo anche i conduttori vicini ma decrescendo con la distanza dal centro del conduttore. In regime di corrente sinusoidale, nei conduttori vicini, verrà indotta una forza elettro motrice (f.e.m.) che produce un

vortice di corrente come nel caso precedente ma nel conduttore vicino. In figura, la corrente indotta nel filo 1 è raffigurata con le linee nere.

Se le correnti nei due fili sono concordi, la corrente principale che scorre nel conduttore 1, nelle vicinanze del conduttore 2, si troverà la corrente indotta contraria al suo flusso e favorevole dall'altro lato. Di conseguenza calerà da una parte ed aumenterà dall'altra.

Quindi, la corrente nei conduttori risente delle correnti che scorrono nei conduttori vicini; per questo motivo si chiama effetto di prossimità (proximity effect).



L'effetto di prossimità

L'effetto di prossimità riduce ulteriormente la sezione attraversata dalla corrente. La ricaduta sulla resistenza del conduttore è significativa e parecchio superiore a quella dovuta all'effetto pelle.

Non ci sono molti rimedi per questo fenomeno ma vediamo cosa si può fare:

- di distanziare tra loro i conduttori. Ma non sempre è possibile.
- non stratificare gli avvolgimenti. Ma anche questo non è sempre possibile.
- utilizzare conduttori di sezione rettangolare (piatti) in modo che il perimetro del conduttore sia più grande di quello circolare. Ma noi radioamatori non ne disponiamo.
- alternare, per quanto possibile, conduttori percorsi da corrente concorde con conduttori percorsi da corrente discorde in modo da mitigare l'effetto di prossimità. È il caso dei trasformatori in cui si alternano spire di primario a spire di secondario. Ma nelle induttanze e nelle trappole non sempre si può fare.

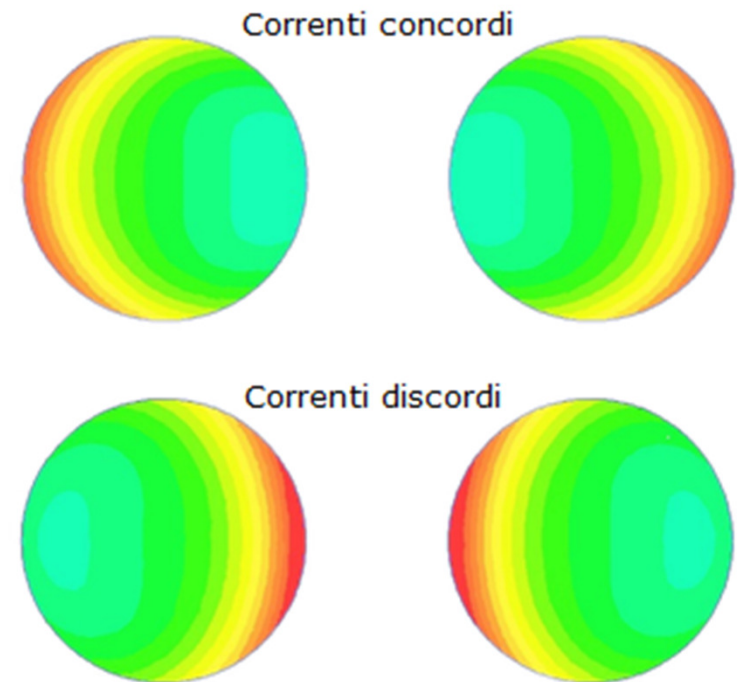


Immagine presa da www.E-Magnetica.pl

L'effetto di prossimità

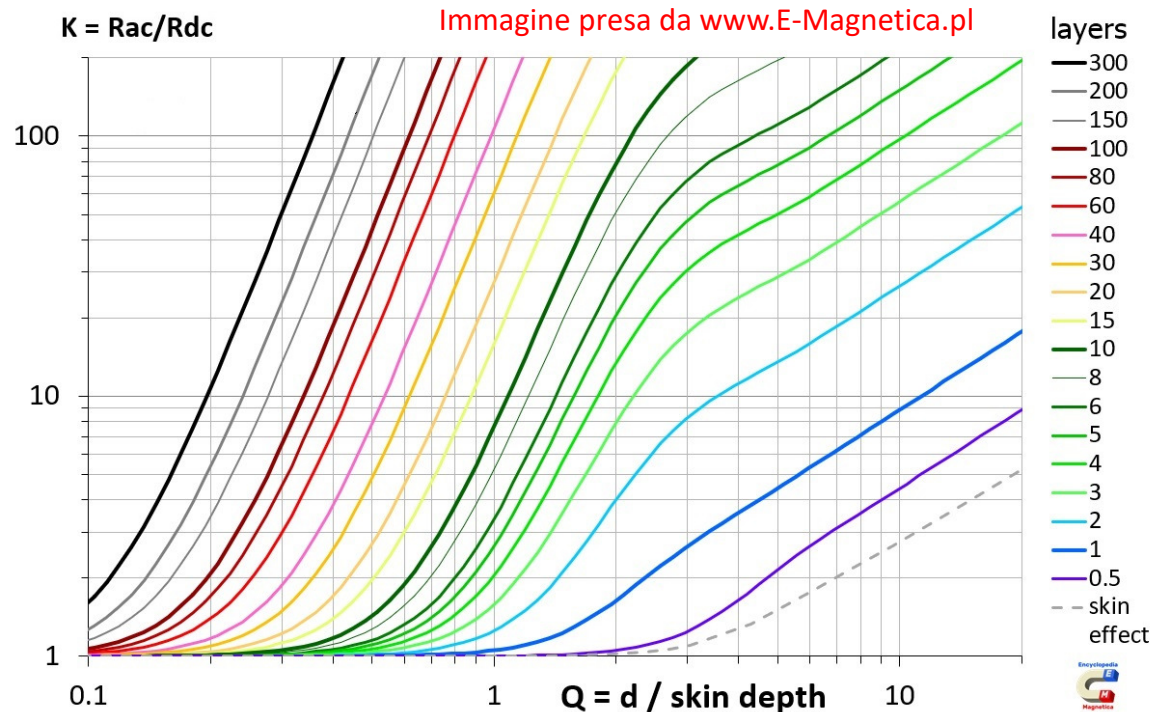
L'effetto di prossimità si misura col parametro K che esprime il rapporto tra la resistenza in alternata R_{ac} e la resistenza in continua R_{dc} .

L'immagine rappresenta le curve di Dowell dove in ascissa c'è il rapporto tra diametro del filo d e lo skin depth δ , che, come abbiamo detto, dipende dalla frequenza.

La traccia grigia tratteggiata rappresenta il solo effetto pelle.

La traccia viola si ottiene quando alterniamo le spire del primario col secondario.

La traccia blu scuro è quella dell'avvolgimento su un solo strato.



Su https://e-magnetica.pl/doku.php/calculator/proximity_effect_from_dowell_curves c'è un ottimo calcolatore per conoscere il parametro K dei fili di rame.

RESISTENZA DELLA MOLLA

