

# Elettronica In

www.elettronica.in.it

€ 6,00 - Anno XXVI - n. 243 - MARZO 2020

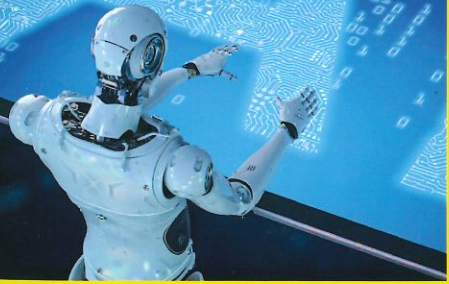


## Micro telecamera wireless con ESP32



- I bus per automotive
- I<sup>2</sup>C Extender
- Circuito giratore
- Domotica per tutti
- Sirena bitonale

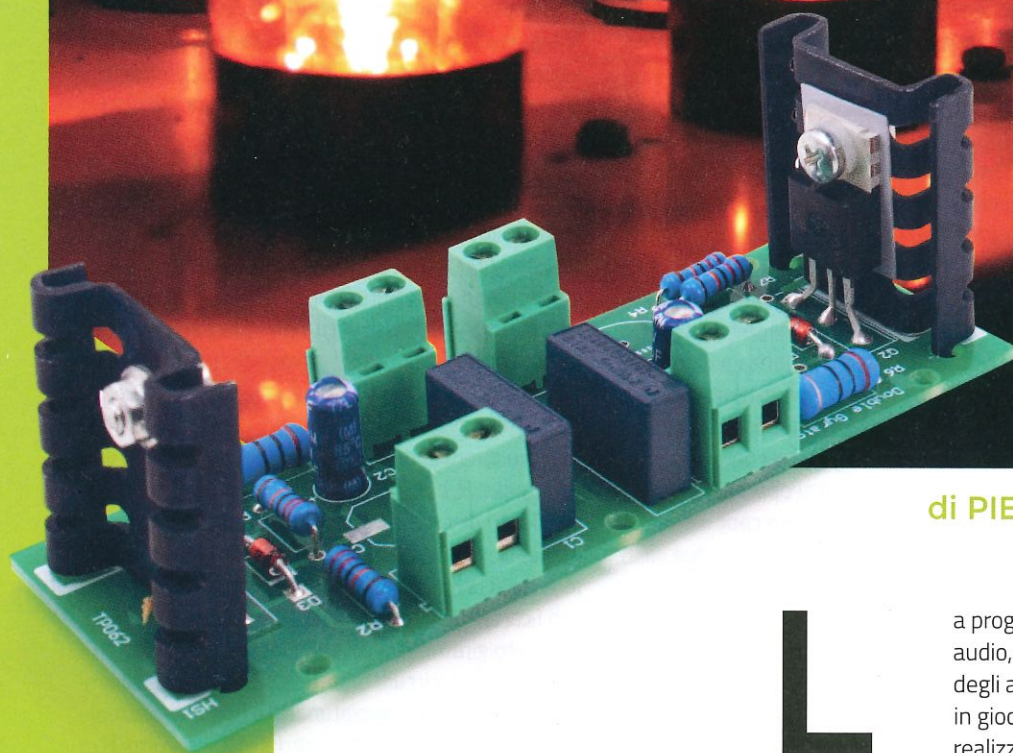
### Intelligenza artificiale su Raspberry Pi



### Bike tracking con SigFox



# CIRCUITO GIRATORE

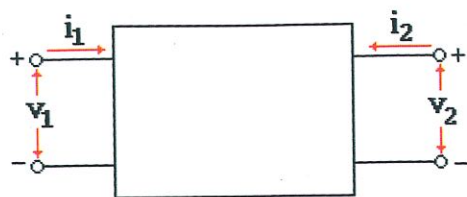


Simula elettronicamente le induttanze pur senza farne uso, grazie a un componente attivo.

di PIER-ALESSANDRO AISA

**L**a progettazione di alimentatori in ambito audio, per il filtraggio dell'alimentazione degli amplificatori di potenza, vede spesso in gioco l'utilizzo di celle di filtro di tipo LC realizzate con induttanze e condensatori. Il filtraggio dell'alimentazione è necessario per abbattere l'ondulazione residua dal raddrizzamento della tensione alternata in ingresso (ripple) allo scopo di attenuare le armoniche generate durante il funzionamento dell'amplificatore e gli eventuali picchi di extra-tensione provenienti dalla rete elettrica. L'amplificatore audio, per poter riprodurre fedelmente le ampie variazioni d'ampiezza presenti in un brano e dovute alla dinamica, richiede all'alimentatore una grande potenza istantanea; in tale condizione si verifica la richiesta di elevate correnti impulsive, che se non opportunamente filtrate si traducono

**Fig. 1**  
Schematizzazione del quadripolo e relative equazioni, corrispondenti al circuito giratore.



$$\begin{cases} i_1(t) = \gamma \cdot v_2(t) \\ i_2(t) = -\gamma \cdot v_1(t) \end{cases}$$

in un calo di prestazione e resa dell'amplificatore audio. In alcuni casi la tensione di ripple si ritrova direttamente accoppiata sul trasformatore d'uscita, come ad esempio nel caso di un amplificatore valvolare Single Ended realizzato con un triodo funzionante senza controreazione (circuitazione non-NFB, ossia senza Negative Feed Back). Per limitare questi effetti si ricorre spesso alla progettazione di filtri con configurazione a pi-greco, ossia realizzati con celle di tipo C-L-C, dove bisogna porre particolare attenzione al dimensionamento dei componenti, nei confronti del picco che si verifica in risonanza e del valore di impedenza che ne deriva.

Difatti, in presenza di notevoli variazioni della corrente assorbita dallo stadio finale o di variazioni rapide della tensione di rete, la variazione della tensione d'uscita è accompagnata da una tensione oscillante (sovraelongazione) smorzata nel tempo, la cui durata e ampiezza dipende fortemente dal fattore di merito Q del circuito risonante.

Le induttanze presentano un'alta impedenza nei confronti delle componenti a frequenza più elevata, ovvero la loro reattanza cresce linearmente con l'aumentare della frequenza; i condensatori costituiscono dei serbatoi di energia, che contribuiscono all'azione di filtraggio in quanto si oppongono alle brusche variazioni di tensione ai loro capi.

Combinando in una cella di filtro LC questi due componenti, in modo che l'induttanza sia in serie al segnale e il condensatore in parallelo, avremo un'attenuazione crescente all'aumentare della frequenza, in quanto l'induttore attenua la corrente e il condensatore la tensione d'uscita.

Solitamente le induttanze vengono costruite su ingombranti e pesanti nuclei magnetici ed inoltre in

fase di test possono servire induttanze di diverso valore. Usando il circuito "giratore" presentato in questo articolo potrete sostituire le induttanze, con un semplice circuito elettronico configurabile e dotato di pochi componenti, in grado di presentare ai suoi morsetti il comportamento reattivo tipico di un'induttanza, con la possibilità di regolare a piacimento la precisione del valore di induttanza ed il suo fattore di merito.

### PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il "giratore" fu inventato negli anni '50, da Bernard Tellegen un ricercatore dei laboratori della Philips e prende il suo nome dalla proprietà del circuito di effettuare un'inversione di impedenza, trasformando una reattanza capacitiva in una reattanza induttiva.

Con riferimento alla **Fig. 1**, da un punto di vista elettrico lo si può vedere come un doppio bipolo, caratterizzato dalla funzione di trasferimento, che lega tensione e corrente relative alla porta di ingresso ed alla porta di uscita, tramite il coefficiente  $\gamma$  che è detto "rapporto di girazione".

La **Fig. 2** illustra una possibile implementazione del circuito giratore, tramite l'impiego di un amplificatore operazionale di un condensatore  $C$  e di due resistenze  $R_1$  e  $R_2$ .

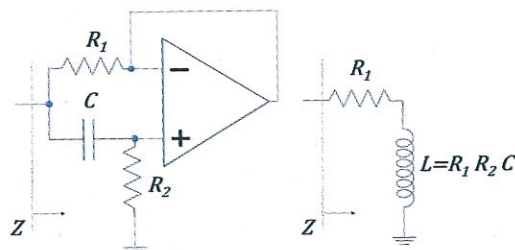
Dal punto di vista elettrico questo circuito assume lo stesso comportamento di una induttanza di valore  $L = R_1 \cdot R_2 \cdot C$ , come dimostreremo di seguito con i calcoli dell'impedenza equivalente.

Il circuito giratore è molto utile specialmente nella tecnologia dei circuiti integrati, dove è necessario avere un induttore miniaturizzato ma di elevato e preciso valore di induttanza. Infatti, il circuito può essere tarato finemente sulla precisione del valore, tramite la selezione di componenti ad alta precisione per i condensatori ed i resistori, a differenza di un induttore reale, che presenta una più ampia dispersione dei parametri e quindi una minor precisione.

Il massimo valore di induttanza che si può ottenere ed il relativo fattore di merito Q sono comunque limitati e non si può superare un limite operativo come di seguito descritto.

Con riferimento allo schema di **Fig. 2**, l'impedenza

**Fig. 2**  
Schema del circuito giratore con amplificatore operazionale ed induttanza equivalente



che si vede dall'ingresso del circuito è data dal parallelo di due termini:

$$Z = (R_1 + j\omega R_1 R_2 C) // \left( R_2 + \frac{1}{j\omega C} \right)$$

Se la resistenza  $R_2$  è molto più grande di  $R_1$ , l'espressione precedente si può approssimare con:

$$Z = (R_1 + j\omega R_1 R_2 C)$$

In questa espressione riconosciamo una parte resistiva ed una parte reattiva, equivalenti alla serie di una resistenza di valore  $R_1$ , e di un'induttanza di valore  $L = R_1 \times R_2 \times C$ .

Rispetto a una vera induttanza compaiono due termini: un termine  $R_2 C$  in parallelo ed un termine  $R_1$  in serie, che limitano il massimo valore di induttanza ottenibile e anche il fattore di merito  $Q$  e di conseguenza limitano la selettività dei filtri che si possono realizzare.

Inoltre, bisogna tenere presente che a differenza di un'induttanza reale questo circuito non immagazzina energia sotto forma di campo magnetico e quindi non può essere usato in applicazioni come convertitori di potenza quali DC\DC, ad esempio in topologia *Flyback*, *Buck* o *Boost* o anche alimentatori per elevate tensioni/correnti o applicazioni che lavorano a radiofrequenza.

Il circuito giratore viene realizzato solitamente in forma di circuito a componenti discreti o integrati, con valori tipici di induttanza che possono arrivare anche fino a 50 henry e con correnti tipiche nel range 50÷200mA.

In questo articolo mostriamo una realizzazione su circuito stampato, con due circuiti giratori a bordo. La forma circuitale che abbiamo selezionato fa l'impiego di un MOSFET per la trasformazione di impedenza, in modo che si possa sopportare una elevata differenza di potenziale fra ingresso e uscita del circuito. Questo è molto utile se si volesse, ad esempio, realizzare un filtro passa-basso di tipo LC per un alimentatore che opera ad alta tensione, come ad esempio in ambito valvolare, dove non è difficile doversi trovare di fronte a tensioni dell'ordine dei 400V.

#### SCHEMA ELETTRICO

In queste pagine riportiamo lo schema elettrico del circuito, che simula un'induttanza equivalente del valore di 22 henry e corrente di lavoro massima di 400 mA. Lo schema elettrico (che trovate nella

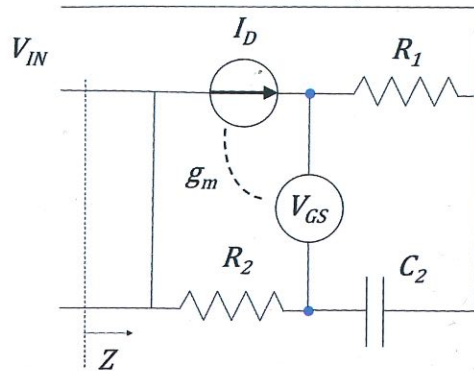


Fig. 3  
Circuito  
equivalente  
del giratore.

pagina seguente) comprende due istanze del circuito giratore, con geometrie pensate per utilizzare condensatori di tipo differente, così da permettere una maggiore flessibilità di utilizzo.

In pratica, nella porzione in alto dello schema elettrico il MOSFET Q1 è retroazionato in alternata dal parallelo dei condensatori C1 e C3, che prendono il segnale dal filtro RC passa-basso formato da R1 e C1; in quello in basso, il solito MOSFET, Q2 è retroazionato dal solito parallelo di condensatori (stavolta sono C6 e C7) ma in più il gate è accoppiato all'ingresso (che poi coincide con il drain) mediante un filtro a pi-greco composto da R4-R5-C4.

Per verificare che anche il circuito con MOSFET effettivamente si comporti come un'induttanza, è necessario risolvere le equazioni del circuito equivalente mostrato in Fig. 3, estraendo il valore dell'impedenza  $Z$  vista dalla porta di ingresso dove si applica la tensione  $V_{IN}$ .

Nel circuito, il MOSFET è rappresentato come un generatore di corrente, il cui valore è controllato dalla tensione presente fra gate e source  $V_{GS}$ , tramite il parametro di transconduttanza  $g_m$  caratteristico del MOSFET. Siccome la tensione  $V_{GS}$  è condizionata in frequenza, a sua volta dal condensatore  $C_2$ , si ottiene la trasformazione di impedenza, che cambia la reattanza di tipo capacitivo in tipo induttivo, come visto nel precedente esempio dove si faceva utilizzo di un amplificatore operazionale. Per ricavare il valore dell'impedenza  $Z$  si consideri che:

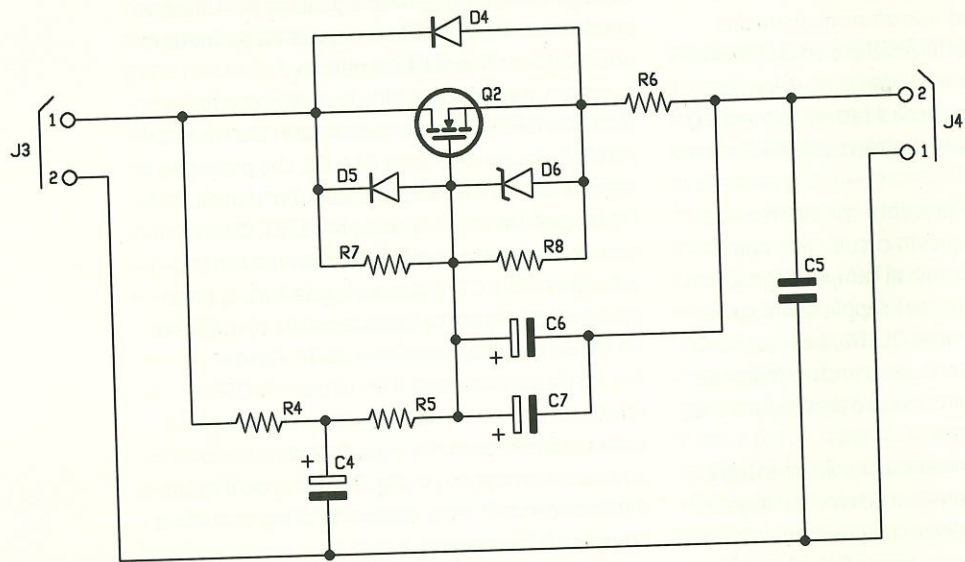
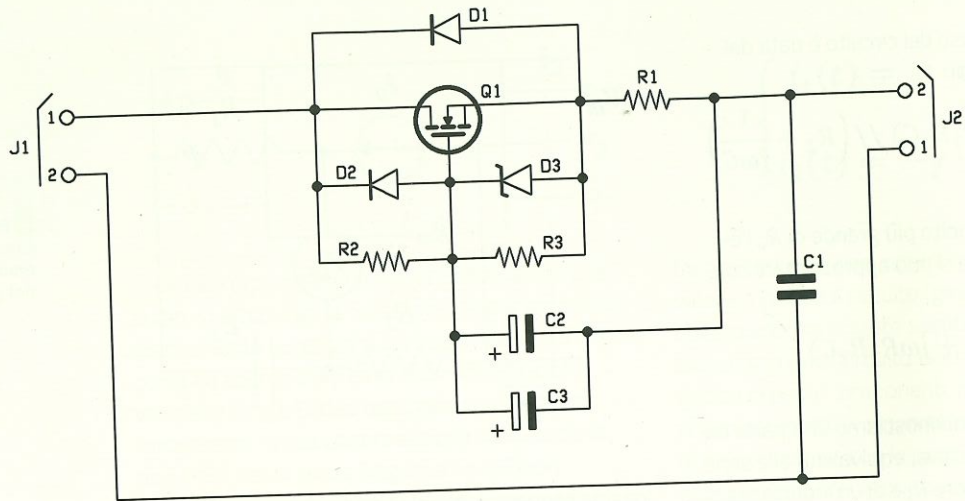
$$Z = \frac{V_{IN}}{I_{IN}}$$

con: 
$$I_{IN} = I_D + I_{R1}$$

Il circuito equivalente si può esprimere tramite le



# schema ELETTRICO



seguenti equazioni che mettono in relazione la corrente di Drain  $I_D$  e la tensione  $V_{GS}$ , tenendo in considerazione il partitore resistivo formato dal condensatore  $C_2$  e dalla resistenza  $R_2$  e la corrente che scorre nella resistenza  $R_1$ ,

$$\begin{cases} I_D = g_m V_{GS} \\ V_{GS} = V_{IN} \cdot \frac{X_{C2}}{R_2 + X_{C2}} - I_D R_1 \end{cases}$$

Sostituendo l'espressione di  $I_D$  si ottiene l'espressione dell'impedenza  $Z$ , dove si possono riconoscere i due contributi di tipo resistivo  $R$  e reattivo  $X_L$ :

$$Z = \underbrace{\left( \frac{1}{g_m} + R_1 \right)}_R + j\omega C R_2 \underbrace{\left( \frac{1}{g_m} + R_1 \right)}_{X_L}$$

In particolare, l'induttanza è il termine che viene moltiplicato per  $j\omega$  e che ha un valore determinato dalla formula:

$$L = C R_2 \left( \frac{1}{g_m} + R_1 \right)$$

Bene, stabilito ciò possiamo andare a vedere come si effettua la simulazione del circuito.

## L'INVENTORE DEL ... GIRATORE

Bernard D.H. Tellegen (Winschoten, 24 giugno 1900 – Eindhoven, 30 agosto 1990) è stato un ingegnere olandese specializzato in elettrotecnica.

Viene ricordato soprattutto per essere stato l'inventore del pentodo e del giratore, oltre ad aver introdotto il teorema di conservazione delle potenze virtuali, noto anche come teorema di Tellegen. Dopo essersi laureato in ingegneria elettrica all'Università di Delft nel 1923, iniziò a lavorare presso i laboratori di ricerca della Philips a Eindhoven. Nel 1926 inventò il pentodo, mentre il giratore lo sviluppò nel 1948.



Ha registrato in tutto 41 brevetti negli Stati Uniti d'America. Dal 1946 al 1966 Tellegen fu professore aggiunto di teoria dei circuiti all'Università di Delft. Dal 1942 al 1952 è stato presidente e membro onorario della Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap (Società Elettronica e Radio dei Paesi Bassi). Nel 1953 l'Australian Institute of Radio Engineers conferì all'ingegnere olandese la carica di membro onorario a vita. Tellegen fu eletto membro dell'Accademia Reale delle Arti e delle Scienze dei Paesi Bassi nel 1960. Nel 1970 l'Università di Delft gli diede una laurea honoris causa. Inoltre, Tellegen è stato socio della IEEE e vinse la Medaglia Edison nel 1973 con la seguente motivazione: per una creativa carriera di risultati significativi nella teoria.

### SIMULAZIONE DEL CIRCUITO

Per valutare quanto il circuito giratore riesca ad approssimare bene un'induttanza ideale è stata eseguita una simulazione nell'ambiente gratuito LTSpice, su un filtro passa-basso LC, con un valore di induttanza di 22 henry ed una corrente di lavoro di 100 mA. Nelle **Fig. 4** e **Fig. 5** sono rappresentati gli schemi simulati.

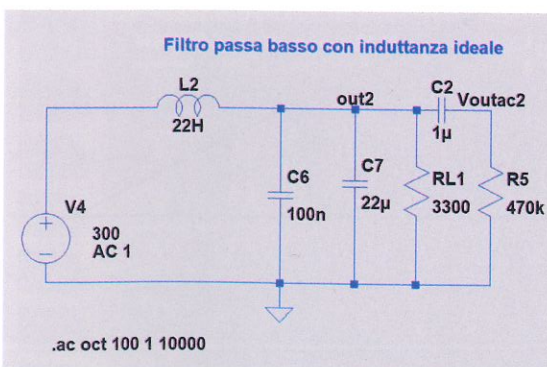
Dal diagramma di **Fig. 6** si vede come le due curve del filtro passa basso con induttanza simulata dal circuito giratore (curva in verde) e con induttanza ideale (curva in blu) siano praticamente identiche fino alla frequenza di circa 1 kHz con il picco di risonanza a 7 Hz. Con i valori utilizzati nella simulazione, la componente di frequenza a 100 Hz derivante dal raddrizzamento è attenuata di almeno 40 dB.

Utilizzando una simulazione parametrica sul valore della capacità  $C_s$  si può valutare come cambia il comportamento della risposta in frequenza del filtro passa basso. Un'ottima strategia è quella di evitare l'uso di condensatori con capacità troppo elevate e distribuire diversi condensatori di valore più piccolo nei punti dove l'utilizzatore assorbe maggiore potenza. Ad esempio, nel caso di un amplificatore valvolare si potranno piazzare nelle vicinanze delle valvole finali.

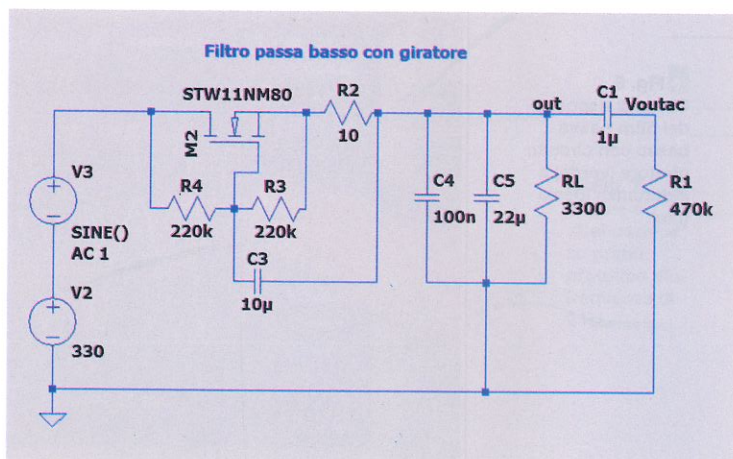
### REALIZZAZIONE PRATICA

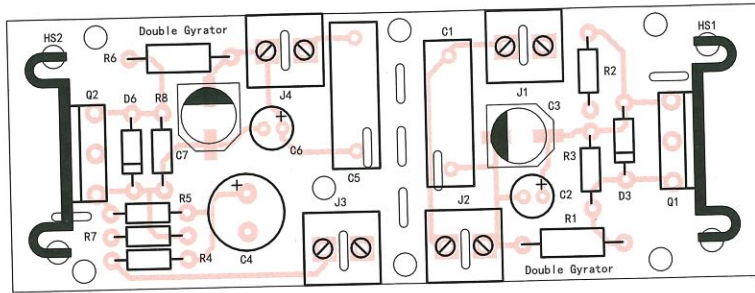
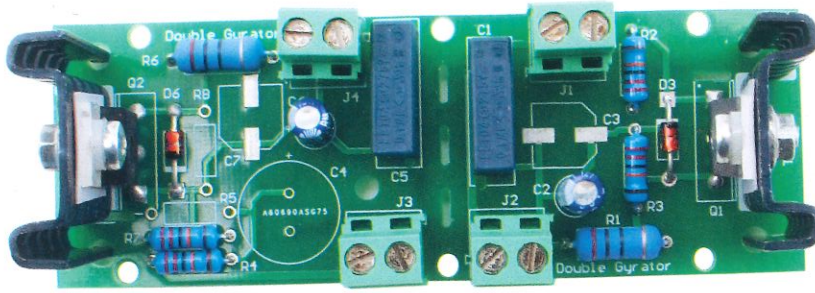
Bene, a questo punto possiamo passare alla costruzione del circuito giratore, per il quale abbiamo disegnato un apposito circuito stampato, da noi utilizzato anche per le verifiche in laboratorio.

**Fig. 5**  
Schema di simulazione di un filtro passa basso con giratore e valore di induttanza  $L=22H$ .



**Fig. 4**  
Schema di simulazione di un filtro passa basso ideale con valore  $L=22H$ .





## Elenco Componenti:

- R1, R6: 10 ohm 1W
- R2, R3, R7, R8: 220 kohm 1/2W
- R5, R8 -
- C2, C6: 10 microFarad 50 Volt elettrolitici
- C1, C5: 100 nF 630 Vdc poliestere
- C3, C4 -
- Q1, Q2: IRF840
- D1, D2, D4, D5: SM4007
- D3, D6: Zener 15V 1W

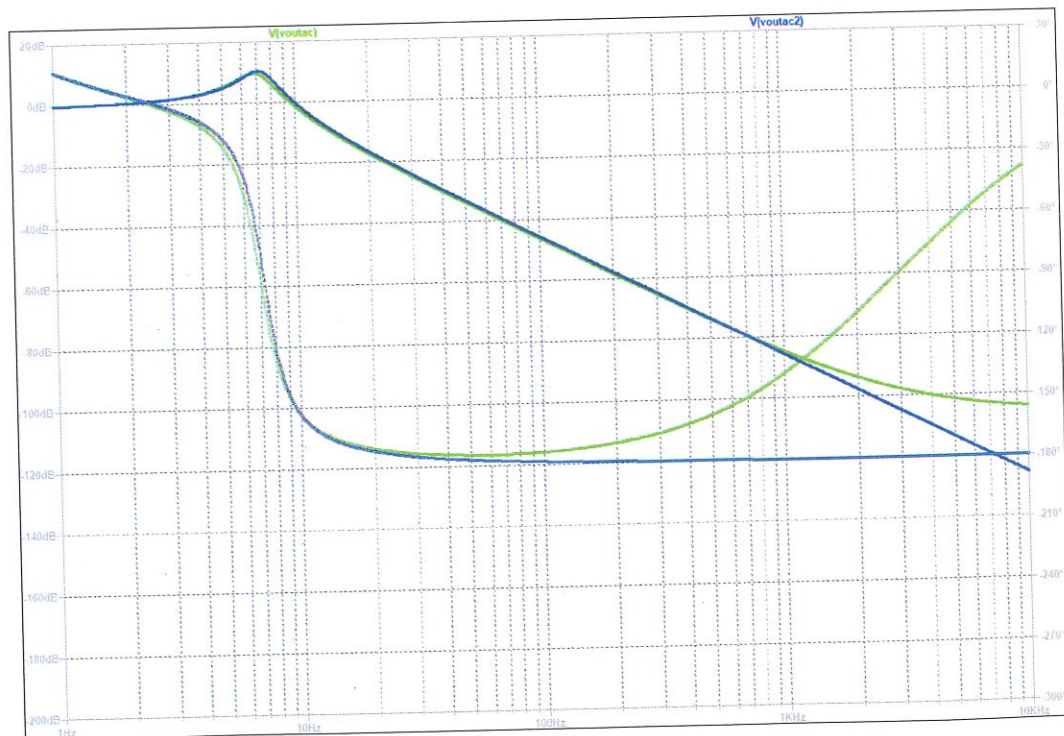
### Varie

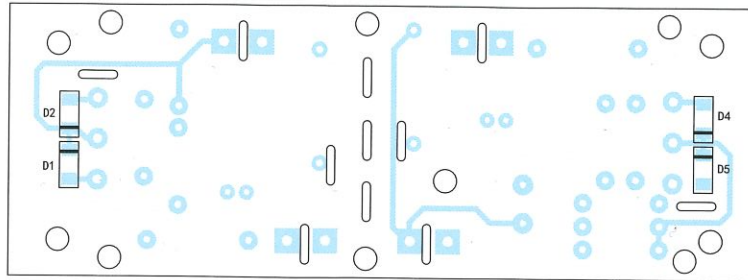
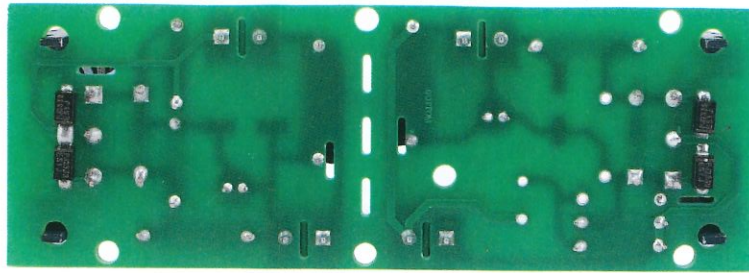
- Morsetto 2 vie passo 5.08mm (4 pz.)
- Dissipatore TO 200 19°C/W (2 pz.)
- Vite 12 mm 3 MA (2 pz.)
- Dado 3 MA (2 pz.)
- Mica TO200 (2 pz.)
- Rondella isolante Nylon 3 mm (2 pz.)
- Circuito stampato S1505 (100x36 mm)

La basetta è facilmente ottenibile per fotoincisione dopo aver ottenuto le pellicole da stampe delle tracce lato rame dai file scaricabili dal nostro sito web [www.elettronica.in.it](http://www.elettronica.in.it), una volta incisa e forata, si devono realizzare le poche "vie" mediante corti spezzoni di filo in rame saldati nelle piazzole di interconnessione, quindi montare i componenti

iniziando dalle resistenze e dai diodi (per i quali è necessario rispettare l'orientamento indicato nel disegno di montaggio visibile in queste pagine) e proseguendo con i condensatori (rispettate la polarità degli elettrolitici) per finire con i MOSFET. Per quanto riguarda il dimensionamento dei componenti, dopo aver stabilito la risposta in frequen-

**Fig. 6**  
Curva di risposta del filtro passa basso con circuito giratore (verde) e induttanza ideale (blu).





za del filtro passa basso realizzato con il giratore, tramite la selezione dei valori del condensatore e delle resistenze, utilizzando le formule viste in precedenza è necessario decidere la massima corrente di lavoro del circuito.

Bisogna quindi effettuare la scelta della potenza che i componenti devono gestire e per il MOSFET deve essere fatto il dimensionamento termico per il dissipatore.

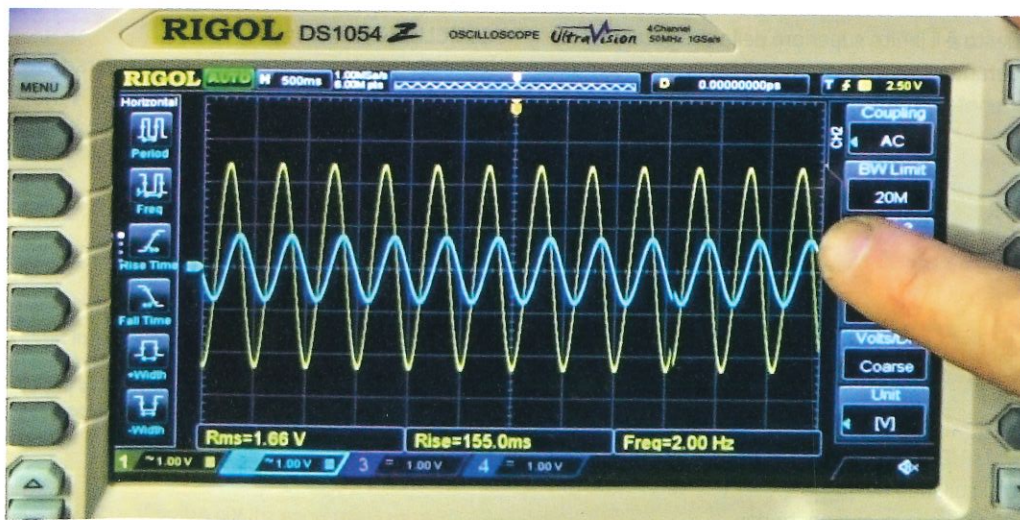
Per stabilire la massima corrente di lavoro del circuito è necessario calcolare la potenza dissipata  $P_D$  dal MOSFET, considerando le differenze di temperatura e le resistenze termiche in gioco, tramite

la formula:

$$P_D = \frac{T_j - T_{AMB}}{R_{T(j-c)} + R_{T(c-d)} + R_{T(d-a)}}$$

con:

- $T_j$  temperatura di giunzione massima del MOSFET. Valore da datasheet  $T_j = 150^\circ\text{C}$ .
- $T_{AMB}$  = temperatura ambiente. Valore di progetto impostato a  $60^\circ\text{C}$
- $R_{T(j-c)}$  = resistenza termica fra giunzione e case del MOSFET impostata a  $1^\circ\text{C/W}$  dai dati del MOSFET selezionato
- $R_{T(c-d)}$  = resistenza termica fra case e dissipatore



◀ Fig. 7  
Misure di attenuazione su primo prototipo alla frequenza di 2 Hz.



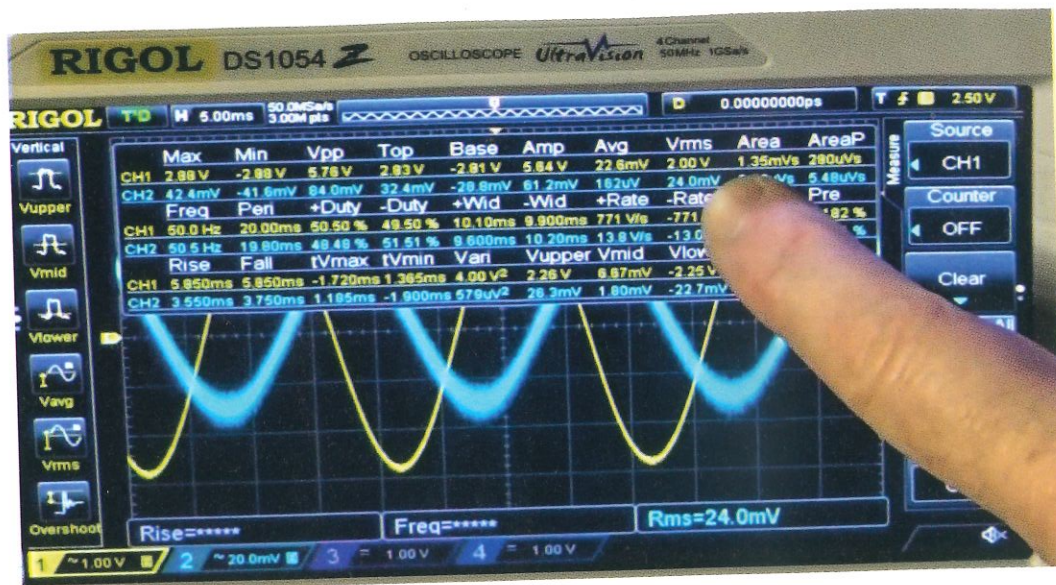


Fig. 8  
Misure di attenuazione su primo prototipo alla frequenza di 50Hz.

- impostata a 0,61 °C/W nel caso di utilizzo di un isolatore di tipo SILPAD.
- $R_{T(d-a)}$  = resistenza termica del dissipatore.

Considerando una resistenza termica del dissipatore di 19 °C/W calcoliamo la massima potenza dissipata  $P_D$ :

$$P_D = \frac{150^\circ - 60^\circ}{1 + 0.61 + 19} = 4.4 \text{ W}$$

Per operare un filtraggio del ripple con un margine accettabile si ipotizza una tensione di lavoro ai capi del MOSFET di 15V e quindi la massima corrente  $I_{MAX}$  vale:

$$I_{MAX} = \frac{4.4 \text{ W}}{15 \text{ V}} = 300 \text{ mA}$$

Questo è il limite superiore della corrente, considerando una temperatura di 60 °C all'interno del contenitore. Se si seleziona un dissipatore avente resistenza termica inferiore, ad esempio di 15 °C/W come per il modello KL105/50/sw, si otterrebbe una massima corrente di lavoro pari a 400mA. L'isolamento del MOSFET non è strettamente necessario viene messo solo per evitare shock elettrici toccando il dissipatore. Sul circuito stampato è previsto l'uso di due dissipatori per i MOSFET, con una resistenza termica di 19 °C/W, come ad esempio il modello Seifert KL105/29/sw.

#### COLLAUDO E MISURE SUI PRIMI PROTOTIPI

Per il collaudo del prototipo è stato impiegato un setup di misura composto da:

- un generatore di funzione Agilent 332210 A
- un carico attivo SIGLENT SDL1030X
- un oscilloscopio RIGOL DS 1054Z.

Sono state effettuate le misure per ricostruire la curva di risposta in frequenza sperimentale del filtro passa basso LC realizzato con il giratore. Sollecitando il filtro alle diverse frequenze si è verificata la perfetta rispondenza del filtro passa basso LC realizzato a giratore rispetto alla curva di risposta teorica. La Fig. 7 mostra la tensione di ingresso in regime sinusoidale alla frequenza di 2Hz, con ampiezza di 1,66V RMS (curva gialla) e la tensione in uscita del filtro passa-basso (curva blu). La Fig. 8 riporta le misure della tensione di ingresso in regime sinusoidale alla frequenza di 50Hz e la tensione in uscita del filtro passa-basso (curva blu), l'attenuazione è di oltre 20dB.

#### CONCLUSIONI

Il circuito giratore si presta ad essere personalizzato per adattarsi ad ogni impiego e in varie condizioni; provatelo in diverse configurazioni e vi sorprenderà.

#### Cosa occorre?

Il materiale utilizzato in questo progetto è di facile reperibilità. Il gerber del circuito può essere scaricato dal sito [www.futurashop.it](http://www.futurashop.it) nella sezione download di questa rivista e può essere stampato con il servizio di stampa PCB [www.futuragroup4makers.com](http://www.futuragroup4makers.com).

Il materiale va richiesto a:

Futura Elettronica srl, Via Adige 11, 21013 Gallarate (VA)  
Tel: 0331-799775 - <http://www.futurashop.it>

