

Laboratorio di Elettronica

Esercizi della Lezione 6:

Diodi; Altri esempi di circuiti risonanti

Valentino Liberali, Alberto Stabile



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
Dipartimento di Fisica "Aldo Pontremoli"

E-mail: valentino.liberali@unimi.it, alberto.stabile@unimi.it

Milano, 12-13 maggio 2022

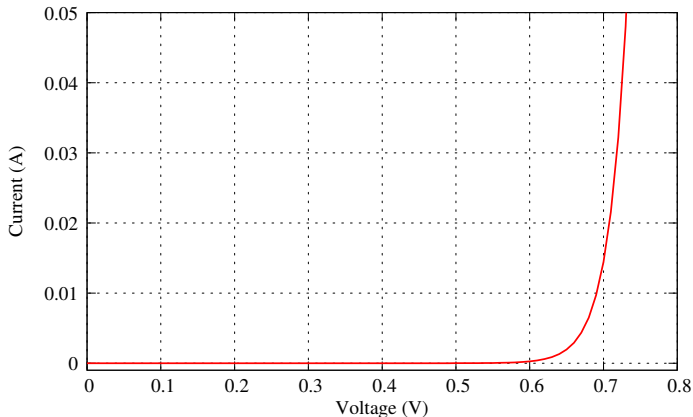
- 1 Caratteristica del diodo
- 2 Modelli per la simulazione con SPICE
- 3 Circuiti raddrizzatori
- 4 Elevatore di tensione di Cockcroft-Walton
- 5 Impedenze e ammettenze di circuiti risonanti
- 6 Filtro di notch

Caratteristica del diodo: teoria

La corrente nel diodo dipende dalla tensione in modo esponenziale (è una corrente di diffusione).

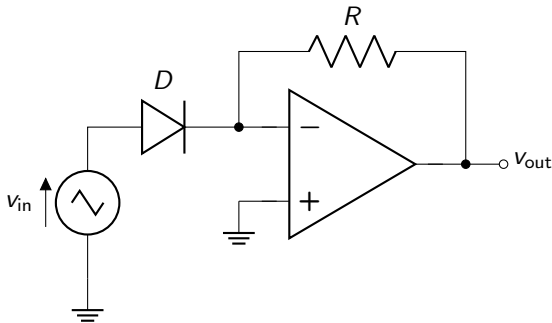
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{q_0 V_D}{kT}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

$q_0 = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C (carica dell'elettrone); $V_T = \frac{kT}{q_0} \approx 26$ mV alla temperatura ambiente $T = 300$ K



Caratteristica del diodo: misura

Per misurare la caratteristica del diodo, si può sfruttare la terra virtuale di un amplificatore operazionale.



Il catodo del diodo è a 0 V, mentre l'anodo è alla tensione v_{in} . La corrente dipende dalla tensione in modo esponenziale.

L'uscita è:

$$v_{out} = -R \cdot i_D = -R \cdot I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$

Per osservare la caratteristica sull'oscilloscopio, si consiglia di impostare lo schermo in modalità XY.

Modello del diodo per la simulazione con SPICE (1)

In SPICE, un diodo si indica con:

Dxxxxxxx n+ n- modelname

dove n+ e n- sono rispettivamente i nodi a cui sono collegati l'anodo e il catodo (attenzione: il diodo NON è simmetrico!)

e modelname è il nome di un "modello" che contiene i parametri del diodo, in una riga separata (.MODEL).

Modelli di due diodi:

Diodo 1N4001:

```
.model 1N4001 D(Is=14.11n N=1.984 Rs=33.89m Ikf=94.81 Xti=3  
+ Eg=1.11 Cjo=25.89p M=.44 Vj=.3245 Fc=.5 Bv=75 Ibv=10u Tt=5.7u)
```

Diodo 1N4148:

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n)
```

Modello del diodo per la simulazione con SPICE (2)

Diodo 1N4148:

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n)
```

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{q_0 V_D}{\eta k T}} - 1 \right)$$

Parametri principali:

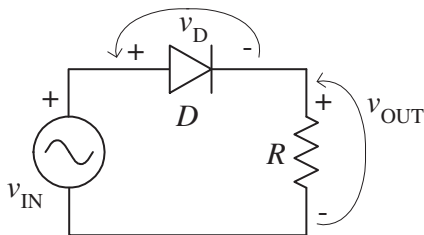
- IS è la corrente I_S nell'equazione
- RS è la resistenza parassita in serie
- N è un parametro di non idealità (η nell'equazione), che tiene conto del fatto che per bassi valori di corrente il diodo conduce di meno rispetto al diodo ideale che avrebbe $\eta = 1$
- CJO è la capacità di giunzione a circuito aperto (0 = “open”)
- M è un fattore che tiene conto del “profilo di drogaggio”: ad esempio, $M = 0.5$ per una giunzione “a gradino” nel passaggio da p a n; $M = 0.33$ in cui la concentrazione di drogante varia in modo lineare
- TT è il “tempo di transito”, cioè il tempo medio che i portatori impiegano ad attraversare la giunzione

Circuito raddrizzatore a semionda

Un raddrizzatore (in inglese *rectifier*) è un dispositivo che serve a raddrizzare un segnale sinusoidale in un segnale unidirezionale (sempre positivo o sempre negativo). Normalmente, i raddrizzatori sono usati per **trasformare la tensione alternata in tensione continua**.

Se il catodo è rivolto verso la resistenza (segnale in uscita), il diodo consente il passaggio delle sole semionde positive.

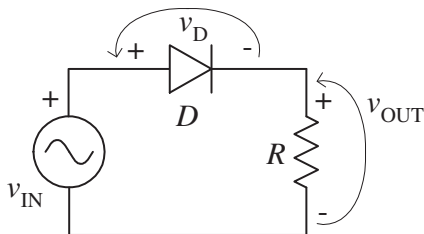
Il picco massimo del segnale in uscita sarà minore del picco massimo del segnale in ingresso, perché viene sottratta la tensione di accensione del diodo utilizzato.



Circuito raddrizzatore a semionda

Esempio: simulazione con ngspice del raddrizzatore

Raddrizzatore a semionda



* RADDRIZZATORE A SEMIONDA

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n)
```

```
V1 1 0 SIN(0 10 50 0 0)
```

```
D1 1 2 1N4148
```

```
R1 2 0 10K
```

```
.OP
```

```
.TRAN 10U 60M
```

```
.PLOT TRAN V(1) V(2)
```

```
.END
```


Effetti del tempo di transito del diodo

Diodo 1N4001:

```
.model 1N4001 D(Is=14.11n N=1.984 Rs=33.89m Ikf=94.81 Xti=3  
+ Eg=1.11 Cjo=25.89p M=.44 Vj=.3245 Fc=.5 Bv=75 Ibv=10u Tt=5.7u)
```

Diodo 1N4148:

```
.model 1N4148 D(Is=2.52n Rs=.568 N=1.752 Cjo=4p M=.4 tt=20n)
```

I due diodi differiscono molto per il tempo di transito (t_t), che è il tempo impiegato dai portatori per attraversare la giunzione.

Quando la tensione ai capi del diodo cambia polarità, passando da positiva a negativa, i portatori in transito nella giunzione invertono la direzione (per effetto del campo elettrico) e il diodo conduce una corrente inversa per un breve tempo, fino a che non viene ripristinata la regione di svuotamento.

Questo effetto si nota particolarmente alle alte frequenze.

Un diodo con un tempo di transito elevato è adatto solo per raddrizzatori che lavorano a basse frequenze (50 Hz).

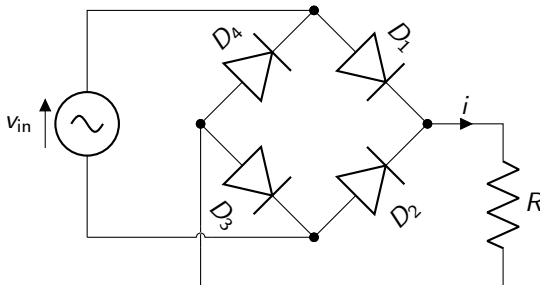
Circuito raddrizzatore a doppia semionda (Ponte di Graetz)

Il Ponte di Graetz permette di raddrizzare il segnale sinusoidale in ingresso sia nel semiperiodo in cui la tensione in ingresso è maggiore di zero sia nel semiperiodo in cui la tensione in ingresso è minore di zero.

Lo si costruisce con quattro diodi.

Il picco massimo del segnale di uscita corrisponde al picco massimo del segnale di ingresso meno le tensioni di soglia dei due diodi accesi.

Normalmente, l'ingresso del raddrizzatore a doppia semionda viene collegato all'uscita di un trasformatore.

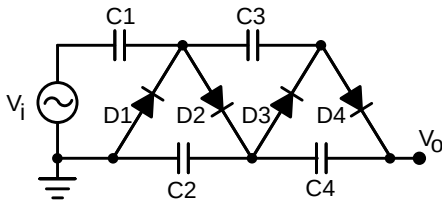


Ponte di Graetz

ATTENZIONE! Il generatore di segnale NON deve essere collegato a terra.

Elevatore di tensione di Cockcroft-Walton (1/2)

Usando diodi e condensatori, è possibile ottenere tensioni con valore più elevato della tensione di ingresso. Questi circuiti sono chiamati **elevatori di tensione** o **moltiplicatori di tensione**.

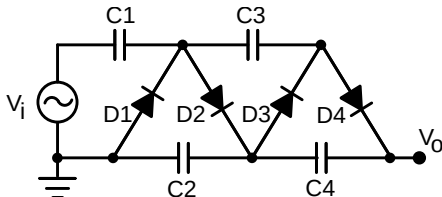


Elevatore di tensione di Cockcroft-Walton a due stadi

L'elevatore di tensione di Cockcroft e Walton fu usato nel 1932 per ottenere l'alta tensione necessaria per accelerare ioni positivi.

Viene tutt'ora utilizzato per questo scopo, e in moltissime altre applicazioni in cui occorrono tensioni superiori alla tensione di alimentazione (esempi: macchine a raggi X, cavità risonanti dei forni a microonde, scrittura e cancellazione di memorie flash).

Elevatore di tensione di Cockcroft-Walton (2/2)



Elevatore di tensione di Cockcroft-Walton a due stadi

Quando la tensione di ingresso è positiva, entrano in conduzione i diodi D_2 e D_4 e si caricano le capacità C_2 e C_4 .

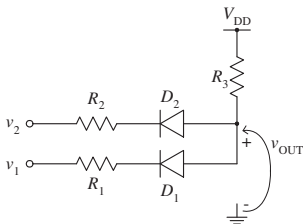
Quando la tensione di ingresso è negativa, entrano in conduzione i diodi D_1 e D_3 e si caricano le capacità C_1 e C_3 .

La tensione di uscita è la somma delle tensioni ai capi delle capacità C_2 e C_4 .

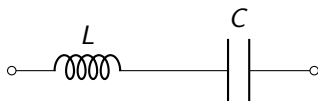
Aumentando il numero degli stadi, aumenta la tensione che si ottiene in uscita (ma per ogni stadio si perde la V_γ necessaria per mettere in conduzione il diodo).

Esercizi

- 1 Trovare la caratteristica tensione-corrente per diversi diodi: diodo convenzionale, led rosso, led giallo, led verde.
- 2 Costruire i raddrizzatori a semi-onda ed a doppia semionda e verificarne il funzionamento.
- 3 Al fine di costruire un alimentatore che converte la tensione alternata in tensione continua, collegare all'uscita del raddrizzatore un condensatore elettrolitico (facendo molta attenzione alla **polarità del condensatore elettrolitico**). Verificarne il funzionamento.
- 4 $R_1 = R_2 = 50\ \Omega$; $R_3 = 1\ \text{k}\Omega$; $V_{DD} = 5\ \text{V}$; D_1, D_2 : diodi in silicio con $V_\gamma = 0.7\ \text{V}$. Gli ingressi v_1 e v_2 possono assumere indipendentemente i due valori di tensione: $0\ \text{V}$ (corrispondente al bit "0") e $5\ \text{V}$ (corrispondente al bit "1"). Ricavare v_{OUT} in funzione di v_1 e v_2 . Che funzione logica svolge?



Impedenza LC serie



Impedenza:

$$Z = Z_L + Z_C = j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC} = j \cdot \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} \right) = j \frac{(2\pi f)^2 LC - 1}{2\pi fC}$$

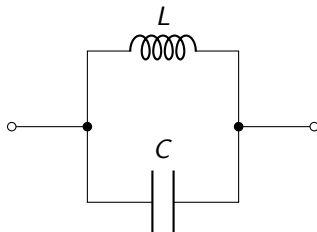
Alla frequenza $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ l'impedenza serie è nulla:

$$Z(f_0) = 0$$

e l'ammettenza è infinita:

$$Y(f_0) \rightarrow j\infty$$

Impedenza LC parallelo



Ammettenza:

$$Y = Y_L + Y_C = \frac{1}{j2\pi fL} + j2\pi fC = j \cdot \left(-\frac{1}{2\pi fL} + 2\pi fC \right) = j \frac{(2\pi f)^2 LC - 1}{2\pi fL}$$

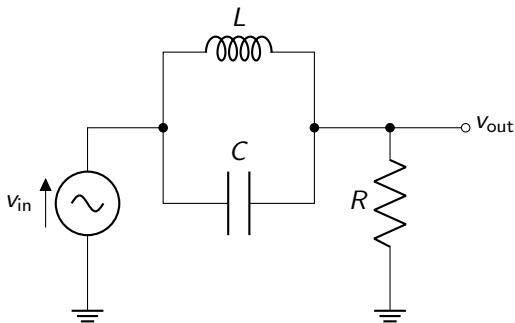
Alla frequenza $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ l'ammittenza parallelo è nulla:

$$Y(f_0) = 0$$

e l'impedenza è infinita:

$$Z(f_0) \rightarrow j\infty$$

Esempio: filtro di notch

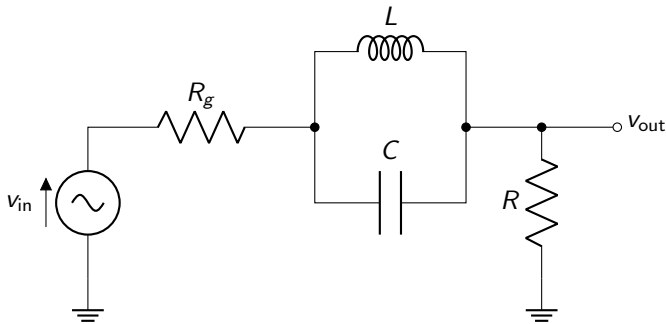


Alla frequenza $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ l'impedenza è infinita:

$$Z(f_0) \rightarrow j\infty$$

e quindi la componente di segnale a questa frequenza viene cancellata.
La risposta in frequenza presenta una “tacca” (*notch*) a questa frequenza.

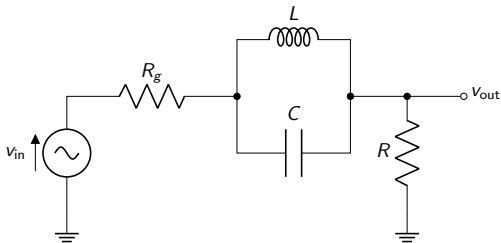
Esempio: filtro di notch (con resistenza del generatore)



R_g è la resistenza interna del generatore di segnale.

Valore tipico: $R_g = 50 \, \Omega$

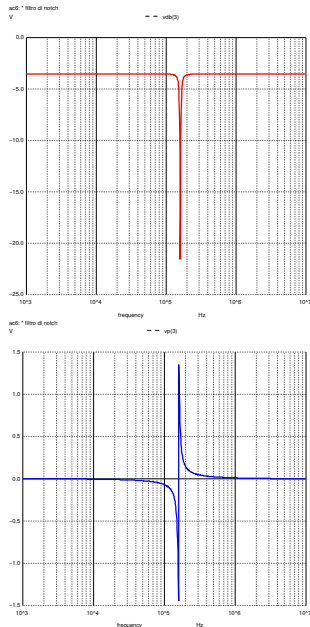
Filtro di notch: simulazione con ngspice



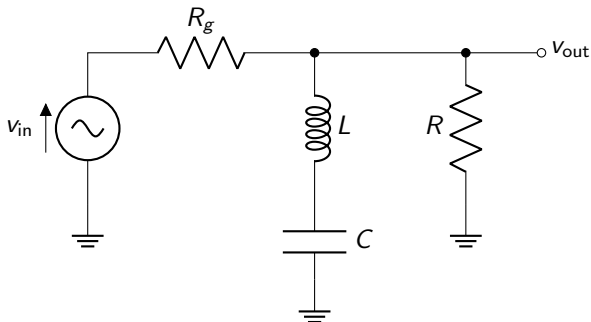
Con $L = 10 \mu\text{H}$ e $C = 100 \text{ nF}$, la frequenza caratteristica è:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 157 \text{ kHz}$$

A questa frequenza, i diagrammi di Bode mostrano una marcata attenuazione del modulo (in **rosso**) e una variazione della fase (in **blu**).



Esempio: filtro di notch (secondo esempio)



Alla frequenza $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ l'impedenza è nulla:

$$Z(f_0) = 0$$

e quindi la componente di segnale a questa frequenza non viene trasmessa in uscita.