



UNIVERSITÀ DI PADOVA

Dipartimento
di Tecnica e Gestione
dei Sistemi industriali

PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI UNA PIATTAFORMA DIDATTICA MIXED-SIGNAL

Analisi di sorgenti di corrente a diversi livelli di intensità

Nicola Callegari, Nicola Berto, Giovanni Martin

Relatore: Dr. Davide Biadene

Co-relatore: Prof. Tommaso Caldognetto

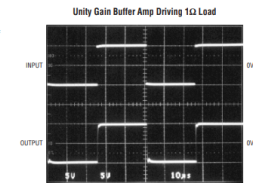
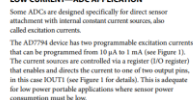
Department of Management and Engineering (DTG) – Vicenza



Sommario

- Introduzione del progetto;
- Sorgente a bassa corrente con amplificatore operazionale;
- Sorgente a media corrente con amplificatore operazionale;
- Sorgente di corrente ad alta intensità con LT1166;

Utilizzo della **simulazione software** (Multisim/LTspice) unita alla validazione sperimentale su **prototipi fisici**;



Panoramica delle Architetture Analizzate

Bassa corrente: utilizzo di amplificatori operazionali di precisione per realizzare un generatore di corrente. Enfasi particolare sulle tecniche di stabilità e compensazione zero-polo;

Media corrente: integrazione di uno stadio push-pull a transistor BJT abbinato ad un amplificatore operazionale. Permette di incrementare significativamente la capacità di erogazione mantenendo elevata precisione;

Alta intensità: impiego del controller specializzato LT1166 combinato con un robusto stadio di potenza a MOSFET. Progettato per erogare correnti elevate resolvendo le criticità legate al runaway termico;



UNIVERSITÀ DI PADOVA

Dipartimento
di Tecnica e Gestione
dei Sistemi industriali

SORGENTE A BASSA CORRENTE CON AMPLIFICATORE OPERAZIONALE



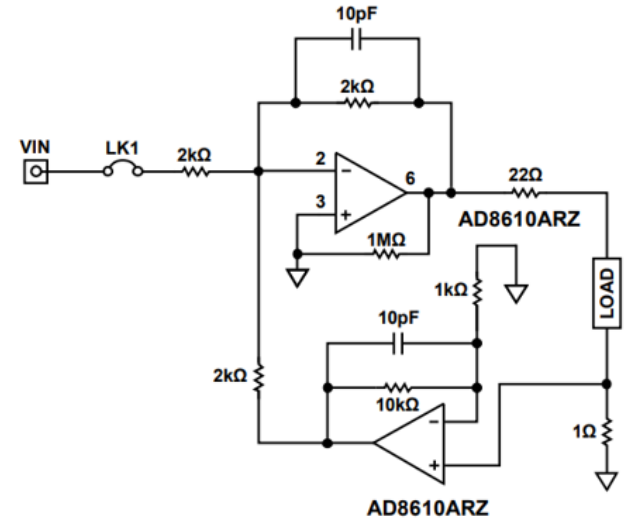
Architettura del Circuito

Il circuito analizzato è un generatore di corrente (source/sink) comandato in tensione. Il cuore del circuito è la retroazione negativa realizzata grazie a 2 operazionali:

- U1 in configurazione **sommatore invertente** con amplificazione unitaria;
- U2 in configurazione **non invertente**, op-amp di feedback con amplificazione pari a 11;
- Retroazione negativa: utilizzata per mantenere una corrente I_L precisa;

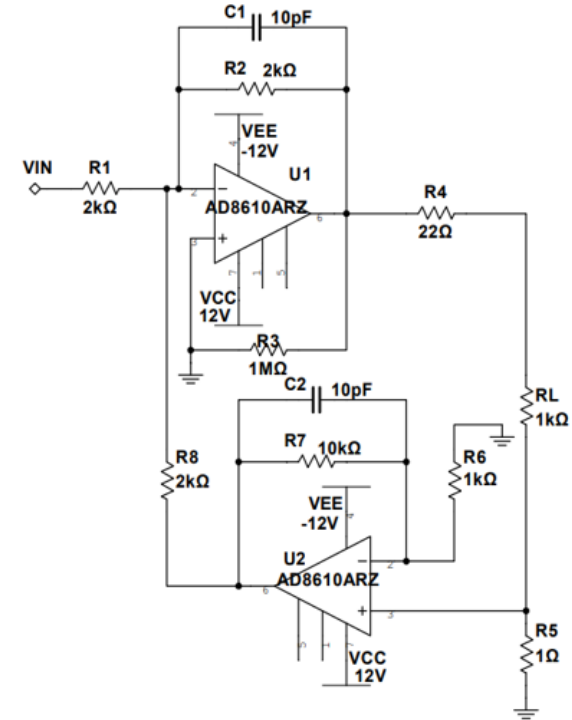
Gli operazionali utilizzati sono gli **AD8610ARZ** scelti per le seguenti caratteristiche:

- Basse tensioni di offset e deriva;
- Rumore di tensione e corrente ridotto;
- Corrente di Bias molto contenute;
- Ampia banda passante;
- Uscita che si avvicina molto al valore di alimentazione



Principio di Funzionamento

- 1) **Controllo di input:** L'applicazione di una tensione negativa V_{IN} fa salire l'uscita di U1, avviando la circolazione di una corrente di carico positiva I_L ;
 - 2) **Rilevamento di shunt:** I_L passando attraverso la resistenza di shunt (1Ω) si traduce in potenziale che viene letto dall'ingresso non invertente di U2;
 - 3) **Feedback attivo:** U2 impone una tensione positiva alla sua uscita, il quale rappresenta il secondo ingresso di U1, si chiude così l'anello di **retroazione negativa**;
- Se $V_{IN} > 0$ il circuito funziona in **sinking**;
 - Se $V_{IN} < 0$ il circuito funziona in **sourcing**;



Caratteristiche DC e limiti

- Il legame tra ingresso e uscita risulta essere: $I_{RL} = \frac{-V_{IN}}{34 + R_L}$
- **Transconduttanza:** $g_m = -9,67 \cdot 10^{-4} \text{ S}$

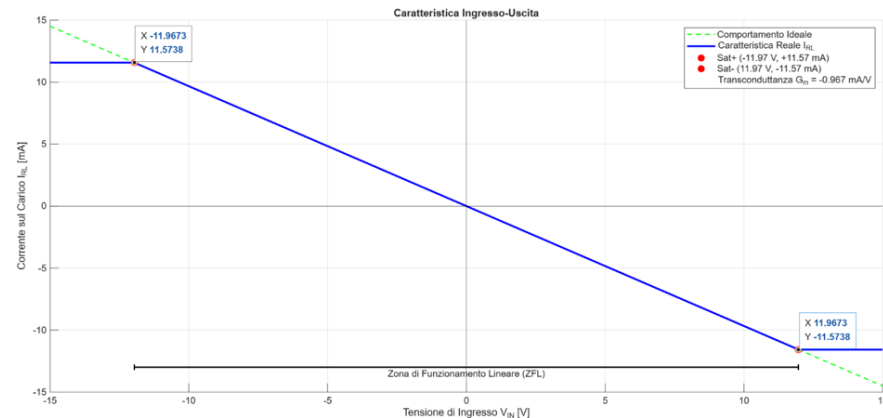
1) A differenza di un generatore ideale, a parità di tensione di ingresso V_{IN} la corrente I_{RL} è inversamente proporzionale alla resistenza di carico $R_L \Rightarrow$ **forte criticità**;

1) Caratteristiche di output AD8610ARZ da datasheet:

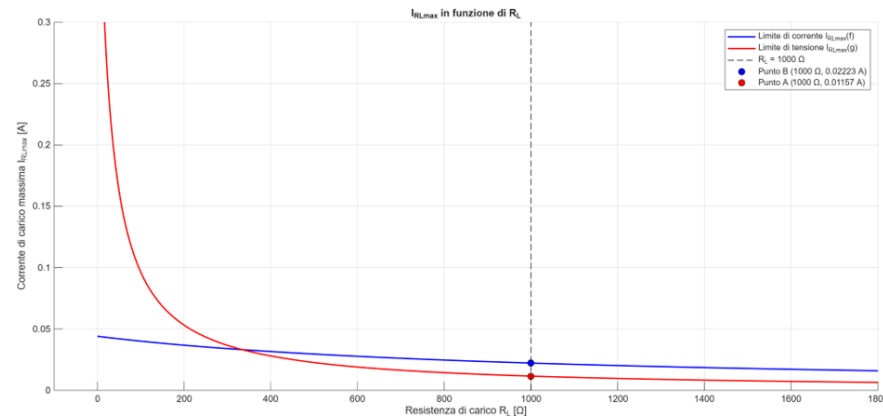
- Output Voltage High: $V_{OH} = +11.84 \text{ V}$
- Output Voltage Low $V_{OL} = -11.84 \text{ V}$
- Output Current $I_{OUT} = \pm 45 \text{ mA}$

3) $I_{RL \text{ MAX}}$:

- $R_L < 335 \Omega \Rightarrow$ limite di corrente
- $R_L > 335 \Omega \Rightarrow$ limite di tensione



Caratteristica IN-OUT per $R_L = 1 \text{ K}\Omega$



$I_{RL \text{ MAX}}$ in funzione di R_L

Analisi AC e stabilità

- **Banda passante:** il circuito è stato progettato con la tecnica di **compensazione zero-polo** per estendere la banda del circuito a 8,131 MHz;
- **Stabilità del circuito:** l'aggiunta di un carico capacitivo in parallelo C_L (parassita o di sensori) riduce la banda ma mantiene margini di fase positivi, risultando sempre stabile.

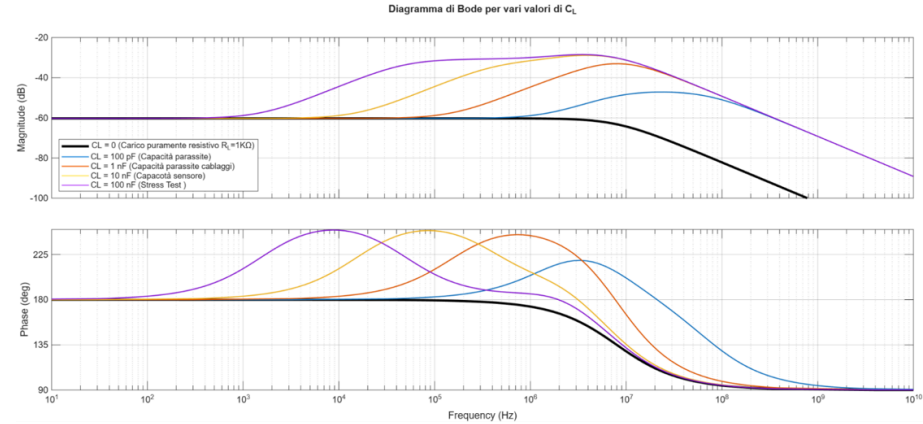


Diagramma di Bode di I_L

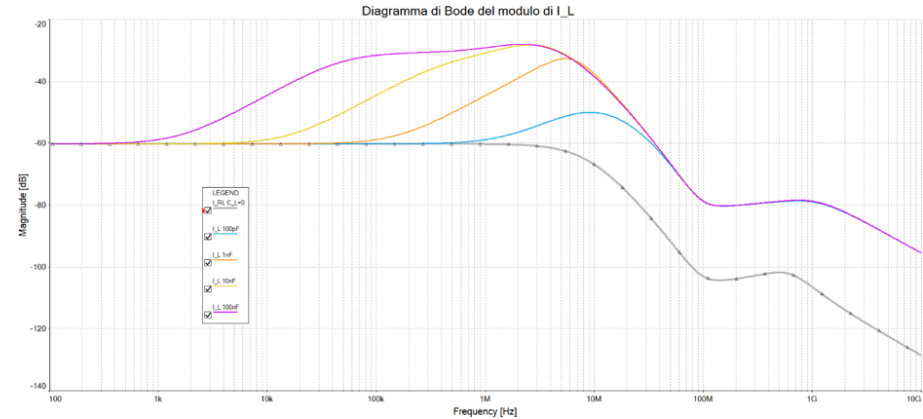


Diagramma di Bode del modulo di I_L generato da Multisim

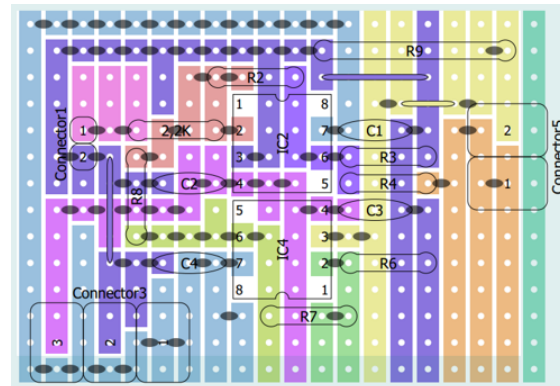
Prototipazione Fisica del circuito

Fattori da tenere sotto controllo nella realizzazione del circuito con **stripboard**:

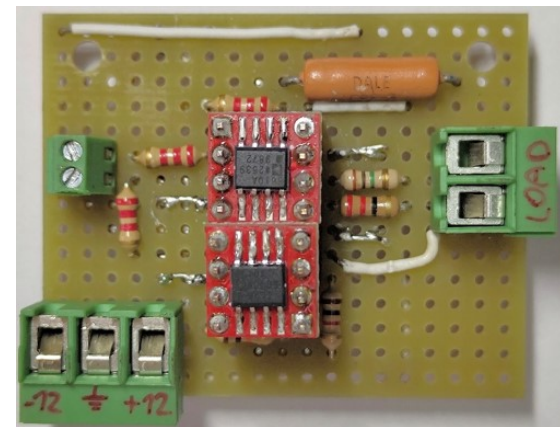
- **Capacità e induttanze parassite:** gestione delle capacità tra piste parallele e induttanze serie di piste molto lunghe;
- **Gestione del piano di massa:** la lunghezza delle piste di massa deve essere minore possibile;
- **Disaccoppiamento delle alimentazioni:** condensatori di bypass posizionati a ridosso dei pin per minimizzare il rumore;

Software open-source **Vero-Route**:

- Facilita la prototipazione rapida su schede preforate;
- Funzione di sbroglio automatico (autorouting) per creare i collegamenti;
- Genera un output visivo indicando le zone di taglio e le zone da ponticellare;



Software Vero-Route



Circuito realizzato su stripboard

Validazione Sperimentale e Risultati

Il confronto tra teoria, simulazione (Multisim) e misure reali ha evidenziato:

- **ottimo accordo in DC:** le caratteristiche IN-OUT teoriche, simulate e misurate sono pressoché analoghe;
- **Banda misurata=4,963 MHz** < banda circuito simulato=5,856 MHz < banda calcolata per via analitica=8,131 MHz ;
- Confermata l'ipotesi che nel caso di carico RC parallelo all'aumentare di C_L la banda del circuito diminuisce;

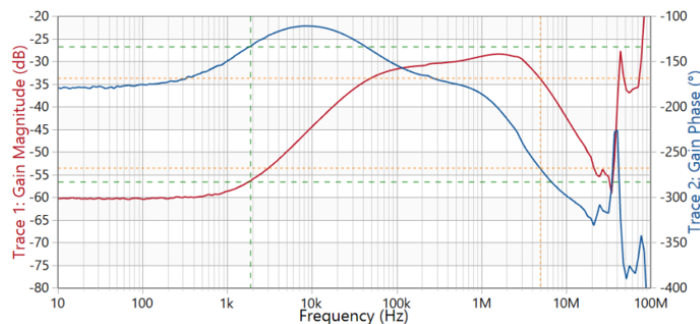


Diagramma di Bode misurato con $C=1\text{nF}$

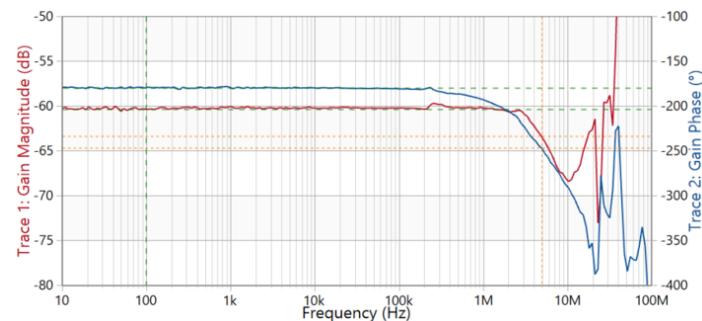


Diagramma di Bode misurato con carico puramente resistivo

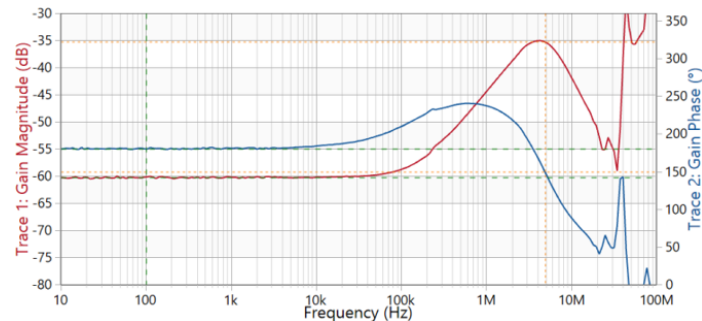


Diagramma di Bode misurato con $C=100\text{nF}$

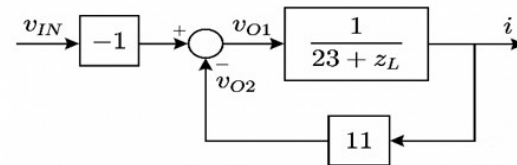
Conclusioni e Considerazioni finali

L'analisi ha rivelato che l'**applicabilità** del circuito è **limitata** dalla dipendenza della corrente dal carico. Per un vero generatore di corrente, servirebbe un guadagno d'anello $AH \gg 1$;

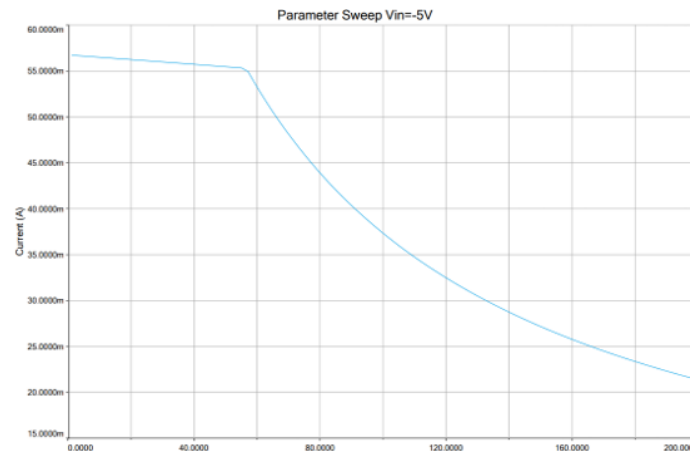
Miglioramenti proposti:

- **aumento del guadagno:** incrementare R_2 fino a $200k\Omega$ per aumentare il guadagno ad anello aperto;
- **rimozione di R_4 :** eliminare la resistenza di protezione per migliorare la retroazione con valori di impedenze basse;
- **saturazione controllata:** portare U1 in saturazione per ottenere una corrente costante di circa 50mA per valori di impedenze basse;

Il circuito è eccellente se applicato a **carichi con impedenza nota**, previa taratura della tensione V_{IN} di pilotaggio.



Schema a blocchi del circuito



I_L in funzione di R_L con $V_{IN}=5V$



UNIVERSITÀ DI PADOVA

Dipartimento
di Tecnica e Gestione
dei Sistemi industriali

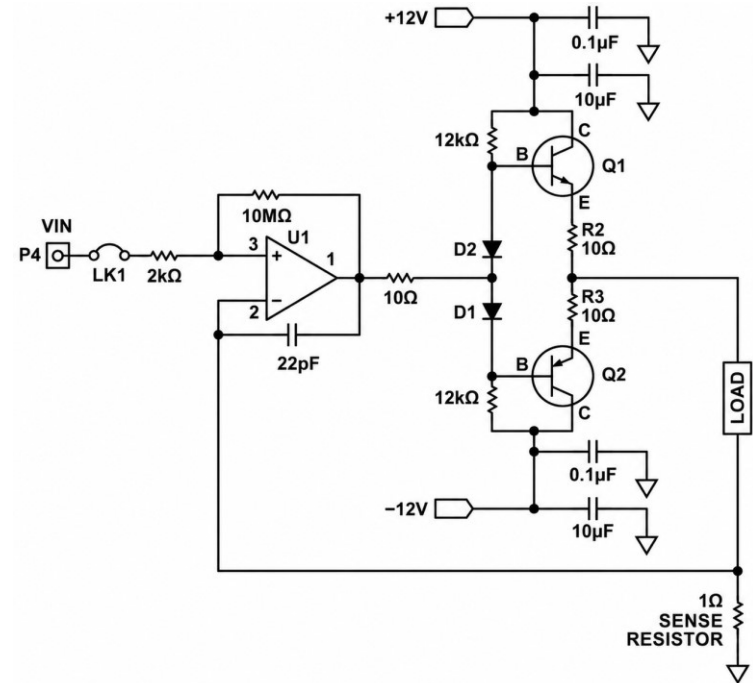
SORGENTE A MEDIA CORRENTE CON AMPLIFICATORE OPERAZIONALE



Architettura del sistema VCCS

Il circuito analizzato è un generatore di corrente controllato in tensione (VCCS) progettato per applicazioni bipolari (sourcing/sinking):

- Sourcing ($V_{IN} > 0$): Il transistor Q1 (NPN) inietta corrente verso il carico.
- Sinking ($V_{IN} < 0$): transistor Q2 (PNP) assorbe corrente dal carico.



Circuito di Push-Pull

Uno stadio push-pull è una configurazione di circuito elettronico di potenza ampiamente utilizzata negli amplificatori e nei regolatori per trasferire energia a un carico in modo efficiente.

Nella sua forma più classica, vengono accoppiati due transistor complementari.

Durante la semionda positiva ($V_{IN} > 0,7 \text{ V}$) entra in funzione il transistor Q1 e Q2 rimane interdetto, al contrario durante la semionda negativa ($V_{IN} < -0,7 \text{ V}$) la polarizzazione è tale che Q1 è interdetto e si attiva Q2.

Circuito di Push-Pull

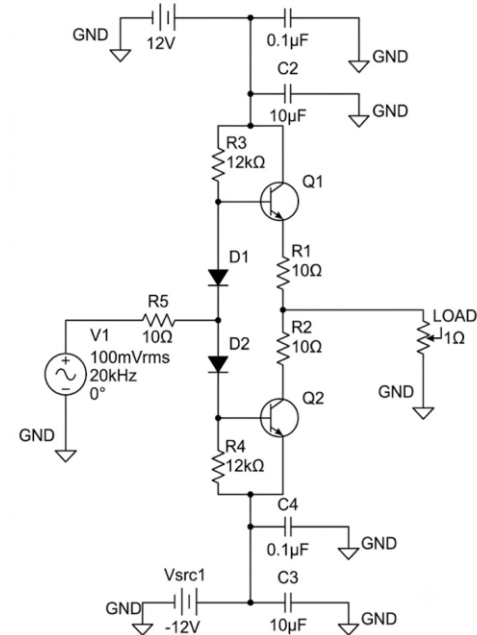
Per far fronte a questo problema è possibile utilizzare due diodi polarizzati per mezzo di una resistenza che fornisce la corrente di riposo I_Q che garantisce la conduzione dei transistor anche in assenza di V_{IN} o con V_{IN} troppo basse.

$$I_{eN} = I_L + I_{eP} \text{ con}$$

- I_L : corrente sul carico
- I_{eN} : corrente di emettitore NPN
- I_{eP} : corrente di emettitore PNP

$$2V_Y = V_{beN} + V_{ebP} \text{ con}$$

- V_Y : caduta di tensione sul diodo
- V_{beN} : tensione base-emettitore NPN
- V_{ebP} : tensione emettitore-base PNP



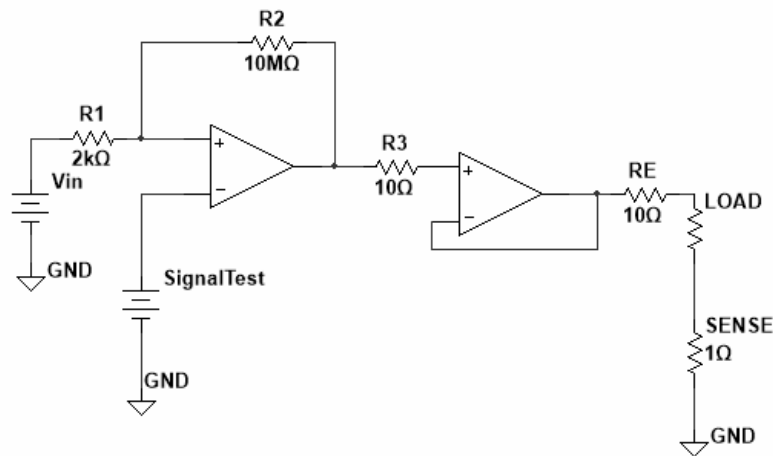
Funzionamento e analisi

Per lo studio del circuito in DC si farà riferimento all'equivalente schema a blocchi per una più semplice comprensione.

Verranno analizzati:

- **Transconduttanza ad anello aperto**

Viene definito guadagno ad anello aperto il rapporto tra, segnale d'ingresso e in uscita (nel nostro caso corrente su LOAD) misurato idealmente con l'anello di retroazione aperto.



$$A = I_{OUT} / V_D = A_0 / (R_E + LOAD + SENSE)$$

Funzionamento e analisi

- **Fattore di retroazione**

per il cortocircuito virtuale si avrà $V^+ = V^- = V_{IN}$.

Grazie alla retroazione, essa viene riportata ai capi della SENSE RESISTOR facendo circolare una

$$I_{SENSE} = I_{LOAD} = V_{in} / R_{SENSE} = V_{IN}.$$

da cui otteniamo che il Fattore di retroazione vale proprio $R_{SENSE} = 1$.

- **Transconduttanza ad anello chiuso**

La relazione tra la transconduttanza ad anello chiuso G e i parametri sopra citati vale

$$G = A / 1 + AB$$

se si verifica la condizione $AB \gg 1$, posso trascurare l'unità al denominatore e l'espressione del guadagno assume la forma

$$G = 1 / \beta \quad \text{nel nostro caso pari a } 1.$$

Idealmente tra tensione in ingresso e corrente sul carico è presente un rapporto $1 : 1$.

Corrente massima ammissibile

Discostandosi dal caso ideale, il rapporto è mantenuto costante fintanto che l'operazionale "rilascia" completamente il controllo del transistor Q1 (il diodo D2 si interdice completamente, diventando un circuito aperto), in questo caso la base del transistor è pilotata esclusivamente dalla tensione di alimentazione 12 V attraverso il resistore di polarizzazione da 12 kΩ. In questo caso ho che, applicando Kirchhoff

$$V_{CC} = (I_{B1} \cdot 12k) + V_{BE1} + I_{E1} \cdot (R_{E1} + R_{LOAD} + 1)$$

Inserendo i valori del circuito in esame si ottiene che il valore di corrente massima ammissibile sul carico LOAD è pari a

$$I_{LOAD(MAX)} = \frac{V_{CC} - 0,7}{\frac{12k}{\beta} + 11 + R_{LOAD}}$$

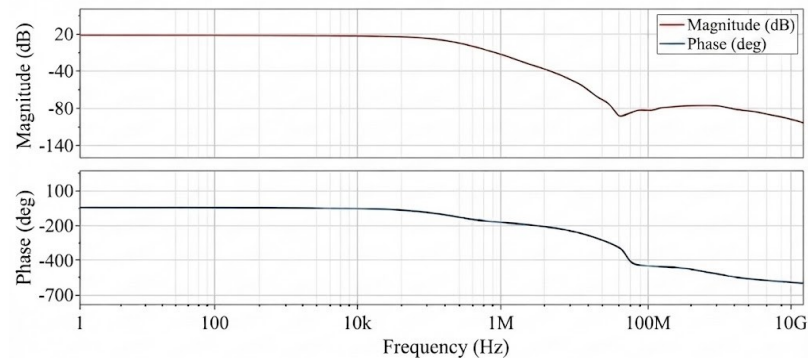
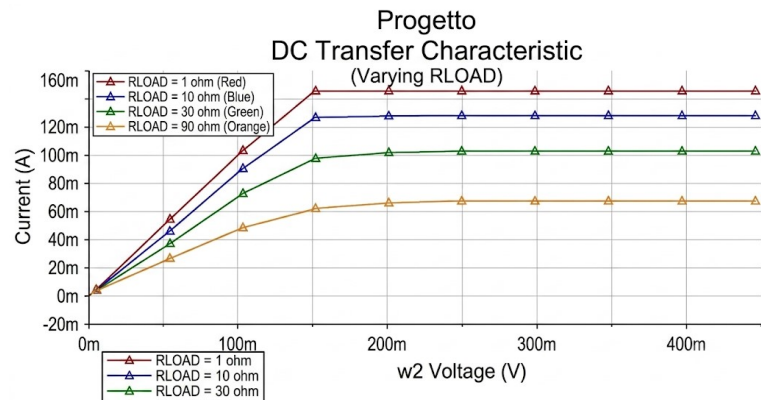
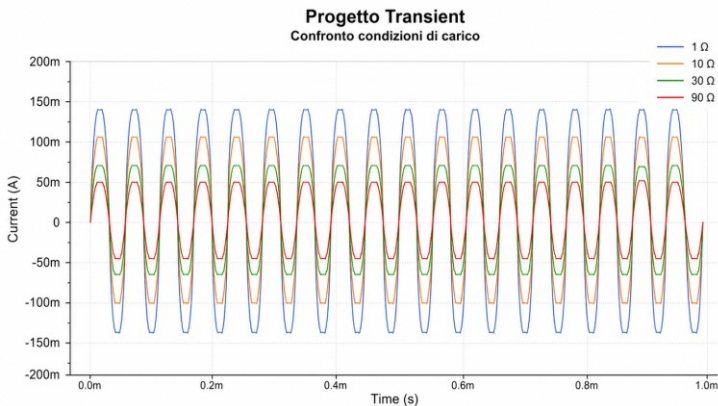
Con valori di β tipicamente di 180 per correnti di 150 mA

Simulazione Multisim

- Analisi DC



- Analisi AC





UNIVERSITÀ DI PADOVA

Dipartimento
di Tecnica e Gestione
dei Sistemi industriali

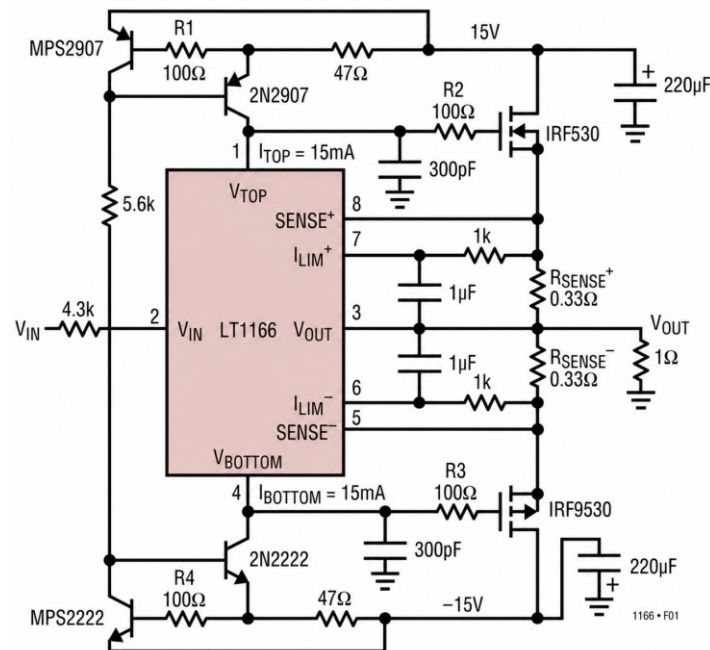
SORGENTE DI CORRENTE AD ALTA INTENSITA' CON LT1166



+

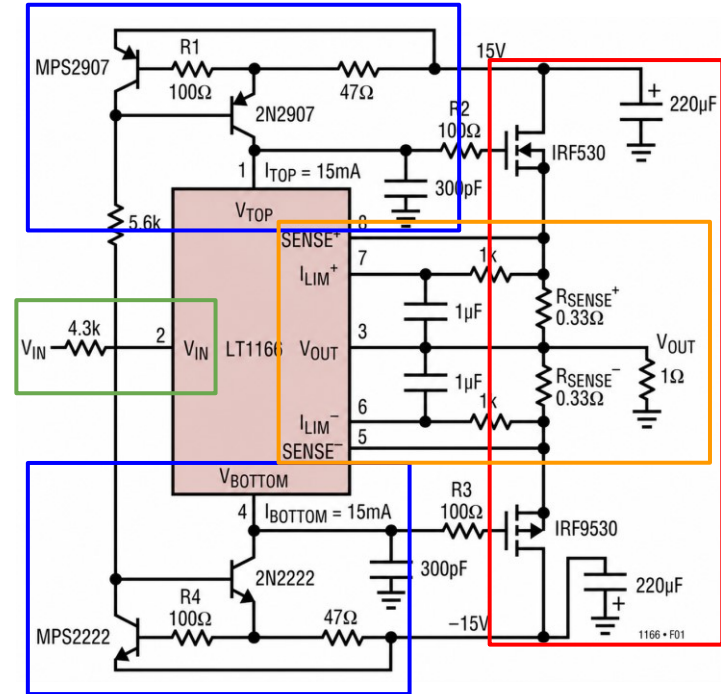
controllo attivo delle correnti di bias tramite LT1166

- Set delle correnti di bias
- Correzione mismatch tra i dispositivi
- Eliminazione del runaway termico
- Limitazione corrente d'uscita
- Possibilità di operare su qualsiasi tensione di alimentazione



Descrizione del circuito

- Stadio d'ingresso
- Stadio di amplificazione in uscita
- Alimentazione LT1166
- Ramo di feedback



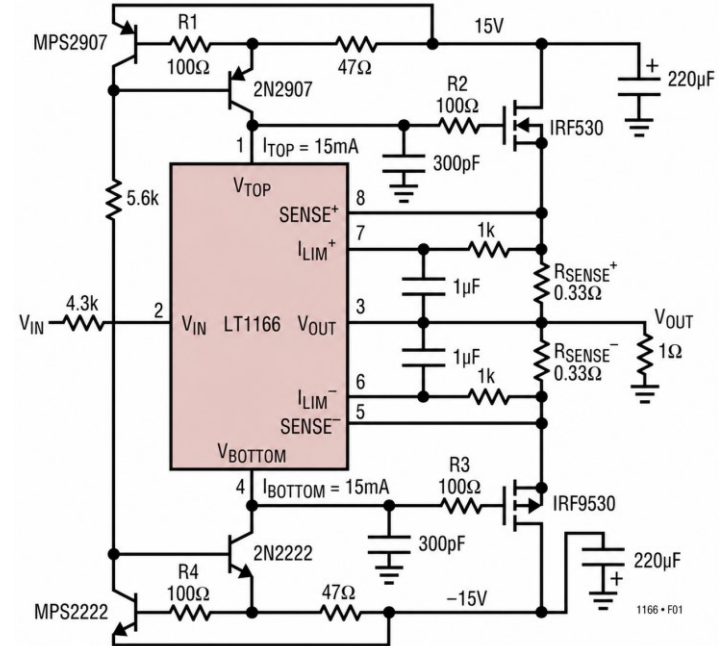
LT1166

Funzioni dell'IC LT1166:

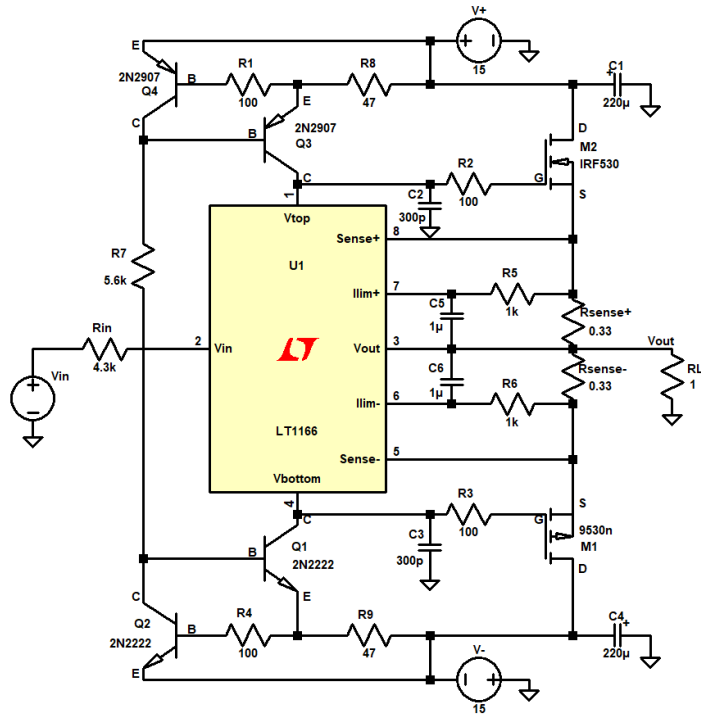
1. Controllo di tensione $\rightarrow V_{OUT} = V_{IN}$
2. Controllo di corrente $\rightarrow I_{BIAS} > 0$

↳ Risolve anche il problema del “Thermal runaway”

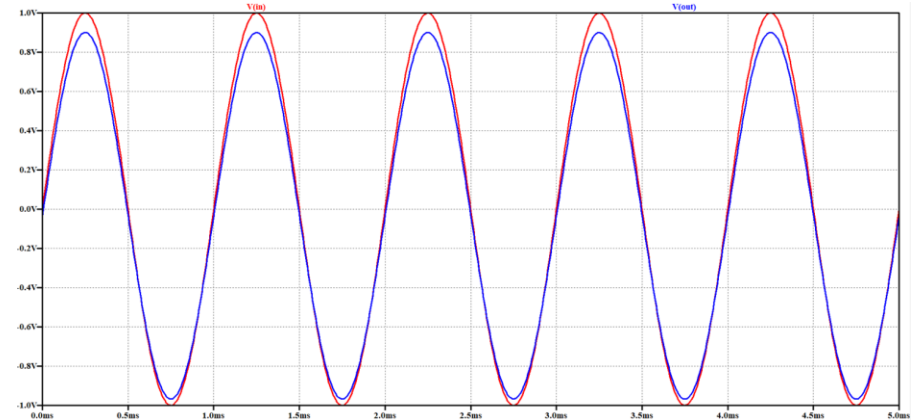
1. Limitatore di corrente



Simulazione LTspice



Relazione tensioni d'ingresso e uscita:

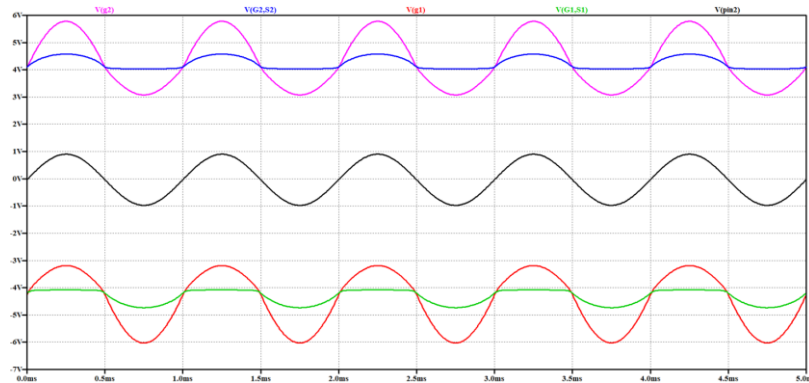


$$V_{INpp} = 2 \text{ V} ; f_{IN} = 1 \text{ kHz}$$

$$V_{OUT} \text{ segue } V_{pin2} \Rightarrow V_{OUT} \simeq V_{IN}$$

Simulazione LTspice

Controllo dei MOSFET

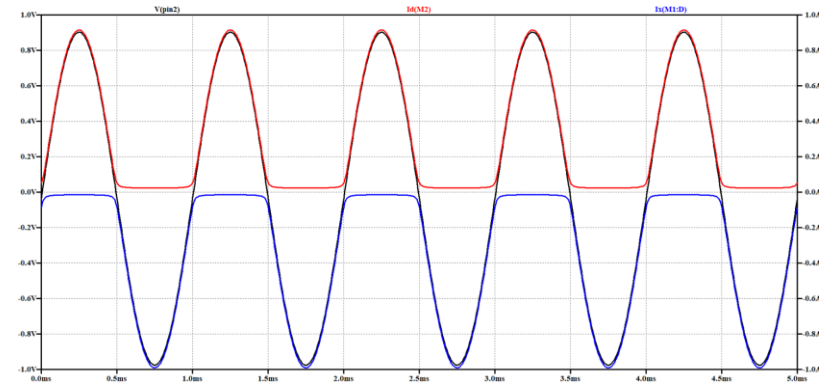


Da datasheet:

nMOS IRF530 $\rightarrow V_{GS(th)} = 4.0 \text{ V}$

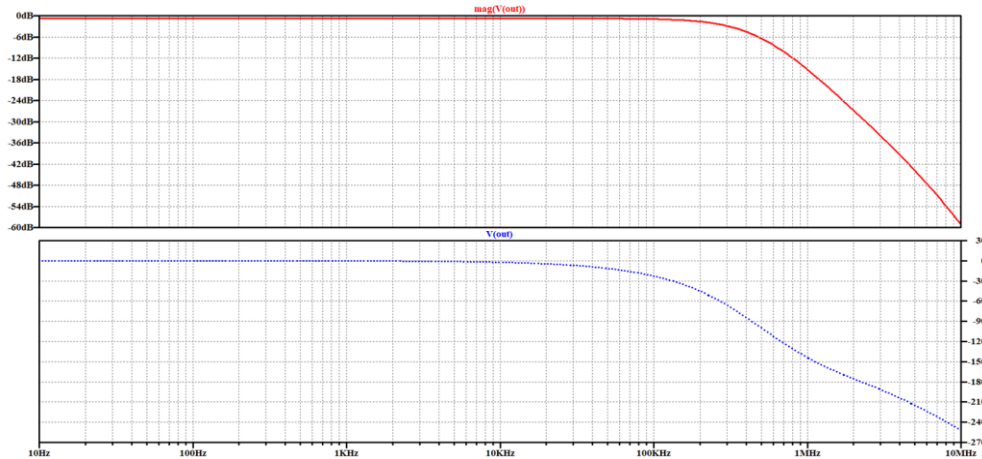
pMOS IRF9530 $\rightarrow V_{GS(th)} = -4.0 \text{ V}$

Generazione delle correnti d'uscita



Simulazione LTspice

Analisi in frequenza

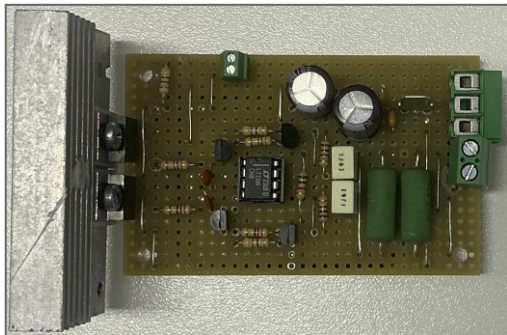


Si può notare che il sistema presenta guadagno unitario e sfasamento nullo alle basse frequenze, fino a circa 100 kHz.

Banda passante (a -3 dB) ≈ 310 kHz

Analisi sperimentale

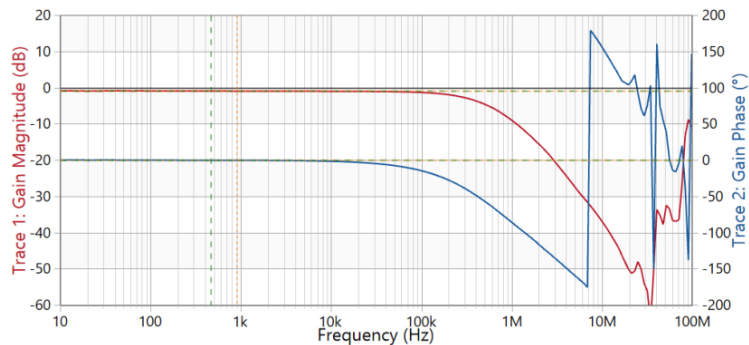
Circuito realizzato su scheda millefori



Relazione tensioni d'ingresso e uscita:



Analisi in frequenza





UNIVERSITÀ DI PADOVA

Dipartimento
di Tecnica e Gestione
dei Sistemi industriali

Grazie per l'attenzione





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA