



Andrea Nigro

Laboratorio di Sistemi e Segnali

Guida alle Esercitazioni

a.a. 2007-08

Indice

1 Introduzione.....	5
2 Lavorare in laboratorio.....	6
3 Il quaderno di laboratorio.....	7
3.1 Linee guida generali.....	7
3.2 Altre osservazioni e suggerimenti.....	8
4 Esercitazione n. 1: Familiarizzazione con gli strumenti.....	9
4.1 Familiarizzazione.....	9
4.2 Studio di un circuito RC passa-alto	10
4.3 Diodo.....	10
5 Esercitazione n. 2 : Amplificatori a transistor.....	11
5.1 Amplificatore ad Emittitore Comune (CE)	11
5.2 Inseguitore di tensione	12
5.3 Resistenza d'uscita	13
5.4 Risposta in frequenza	13
6 Esercitazione n. 3 : Amplificatore differenziale.....	14
6.1 Progettazione e montaggio.....	14
6.2 Misure	15
6.3 Miglioramento del CMRR del circuito con un terzo transistor	15
7 Esercitazione n. 4 : Amplificatore operazionale (I).....	17
7.1 Introduzione.....	17
7.2 Misura della tensione di offset	17
7.3 Misura del prodotto guadagno x banda	18
7.4 Amplificatore differenziale	18
8 Esercitazione n. 5 : Amplificatore operazionale (II).....	19
8.1 Misura della "Slew Rate"	19
8.2 Derivatore	19
8.3 Sommatore	20
9 Esercitazione n. 6: Amplificatore operazionale – Filtro attivo.....	21
9.1 Progettazione e realizzazione del circuito.....	21
9.2 Misure.....	21

10 Esercitazione n. 7: Circuiti logici I.....	22
10.1 Livello di commutazione delle porte logiche TTL	22
10.2 OR esclusivo	22
10.3 Flip-flop SR	23
11 Esercitazione n. 8 - 9 : Circuiti logici II.....	24
11.1 Contatore a 4 bit	24
11.2 DAC a 4 bit	24
11.3 Circuito completo.....	25
12 Esercitazione n. 10 : Microprocessore Z80 (I).....	27
12.1 Verifica della temporizzazione dei comandi e cicli di istruzione	27
12.2 Operazioni di input e output	27
13 Esercitazione n. 11 : Microprocessore Z80 (II).....	29
13.1 Montaggio del DAC	29
13.2 Collegamento del DAC allo Z80	30
13.3 Calibrazione del DAC	30
13.4 Generazione di un dente di sega. Misura dell'ampiezza e del periodo.	31
13.5 Forma d'onda costruita con dati memorizzati.	32
14 Esercitazione n. 12: Microprocessore Z80 (III).....	33

1 Introduzione

Queste note costituiscono una guida per gli studenti che devono frequentare le esercitazioni del corso.

E' molto importante, prima di ogni esercitazione, leggere accuratamente il corrispondente paragrafo (così come è fondamentale, prima di ogni esercitazione, aver studiato e compreso i corrispondenti argomenti trattati a lezione e sulle dispense), in modo da poter lavorare proficuamente in laboratorio. I fisici sanno che un'ora di studio può far risparmiare parecchio ore in laboratorio.

E' anche fondamentale che tutti gli studenti, fin dall'inizio, abbiano una sufficiente padronanza degli strumenti che utilizzeranno durante le esercitazioni: a questo scopo è dedicata la prima esercitazione ("Familiarizzazione con gli strumenti"), la cui importanza non va sottovalutata. Grossolani errori, perdite di tempo e conseguenti frustrazioni sono spesso dovute, nelle sessioni successive, a un cattivo uso degli strumenti.

Il lavoro in laboratorio si svolge in gruppi, ma è necessario che tutti i componenti del gruppo siano egualmente "consapevoli" di ciò che si sta facendo e partecipino con un ruolo attivo.

Il lavoro in laboratorio è parte essenziale di questo corso, quindi gli studenti devono dedicarsi ad esso molto seriamente. E' solo attraverso questo lavoro che si può sperare di raggiungere una reale e utile padronanza della materia, toccando con mano quelli che sono i problemi pratici che si incontrano nella realizzazione concreta di circuiti elettronici.

2 Lavorare in laboratorio

E' bene ricordare alcuni punti che vi aiuteranno a lavorare proficuamente in laboratorio:

Strumenti: accendete gli strumenti che utilizzerete nel corso dell'esperienza all'inizio e lasciateli sempre accesi. E' assolutamente insensato spegnere e riaccendere continuamente oscillografo, multimetro, ecc.. Lo stesso vale per i generatori di funzione o gli alimentatori. Naturalmente è spesso opportuno disconnettere le tensioni da un circuito mentre lo si sta montando o modificando: questo può essere meglio ottenuto disconnettendo i cavi che portano le alimentazioni alla basetta.

Progettare l'esperienza: prima di tutto occorre avere uno schema chiaro del circuito che si vuole costruire, corredato del valore dei componenti. In alcuni casi i valori dei componenti sono già definiti nella traccia dell'esperienza, in altri essi devono essere scelti sulla base di un vostro progetto. In tal caso, prima di iniziare a montare il circuito, eseguite tutti i calcoli e le scelte necessarie, con l'accuratezza necessaria in modo da evitare banali errori dovuti alla fretta. Fate un disegno chiaro e tenetelo sempre sott'occhio.

Costruire il circuito: tradurre il disegno in un circuito montato sulla basetta è molto semplice nelle prime esperienze, ma diventerà rapidamente più complicato. E' importante eseguire sempre montaggi ordinati, in cui i componenti sono ancorati solidamente alla basetta, e in cui sia facile accedere ai vari punti del circuito con i puntali degli strumenti diagnostici (multimetro, oscillografo). E, possibilmente, in cui sia agevole sostituire un componente. Prima di montare ogni componente verificate che il valore sia quello giusto.

Diagnostica: dopo aver montato il circuito dovete verificare che esso funzioni correttamente. Molto spesso avviene il contrario: il circuito non dà segni di vita, ovvero si comporta in modo diverso da quello atteso. In questi casi è necessario investigare sulle cause di malfunzionamento, cioè eseguire delle procedure diagnostiche. Quindi bisogna avere sempre a disposizione i puntali del multimetro e le sonde dell'oscillografo, da utilizzare (in base alle situazioni) per questo scopo.

Le cause del malfunzionamento possono essere varie:

- cattive connessioni;
- errori di montaggio;
- errata scelta di uno o più componenti;
- componente difettoso.

Prima di invocare l'aiuto dell'assistente dovete procedere voi stessi a tutte le verifiche che aiutano a identificare il problema:

- verificate accuratamente che il circuito sia montato correttamente, cioè secondo il progetto che avete sotto occhio;
- verificate di nuovo che il valore dei componenti montati sia quello corretto;
- misurate con lo strumento idoneo al caso la tensione nei vari nodi del circuito per verificare che essa sia ragionevolmente simile al valore atteso;
- valutate la corrente che circola in ogni ramo (o componente), in base alle misure di tensione di cui sopra;

Per individuare "dove" il circuito non funziona, applicate il segnale al suo ingresso e poi seguitelo passo passo, verso l'uscita, con la sonda dell'oscilloscopio.

Nella grande maggioranza dei casi riuscirete ad individuare il problema e a risolverlo!

3 Il quaderno di laboratorio

Scrivere e mantenere un quaderno di laboratorio è una delle cose più importanti che dovete imparare, se non l'avete già acquisito dai corsi precedenti. Un buon quaderno di laboratorio è uno strumento essenziale del fisico sperimentale ed è il punto di partenza per la scrittura di articoli scientifici o per preparare presentazioni orali.

Un quaderno ben scritto che include schemi, grafici, tabelle e dettagli sulle misure fatte vi consente di ricevere un efficace aiuto da parte dei vostri stessi colleghi e degli assistenti.

Un quaderno mal scritto risulterà invece molto frustrante per voi stessi e per chi vi assiste. E' spesso molto difficile rispondere alla domanda "perché il circuito non funziona?", oppure "perché i miei risultati sono sbagliati di un ordine di grandezza?", se non si è in grado di ripercorrere con esattezza il procedimento sperimentale seguito. Ed è profondamente illusorio pensare di ricordare a memoria ciò che è stato fatto, ovvero i valori dei parametri utilizzati.

3.1 Linee guida generali

Create un indice (all'inizio o alla fine del quaderno) e aggiornatelo ogni volta che aggiungete nuovo materiale.

Il quaderno dovrebbe contenere descrizione, tabelle, grafici, calcoli, analisi e conclusioni in modo compatto, ordinato e leggibile. Quindi scrivete tutto e solo il necessario, usando un buon italiano (limitate i termini inglesi all'indispensabile), senza dimenticare i necessari confronti tra i risultati ottenuti e ciò che ci si attende dai calcoli o dalla teoria.

Non cancellate o strappate pagine dal quaderno. Annullate con una riga le parti "errate", lasciando che siano comunque leggibili. Spesso si scopre che certe cose non erano poi veramente sbagliate, e comunque è utile sempre avere una traccia di ciò che si è fatto.

Fogli "volanti" non sono accettabili in un quaderno. Grafici o tabelle prodotti con il computer devono essere accuratamente attaccati (usate lo Scotch Magic!) al quaderno stesso.

Annotate tutto ciò che è rilevante sulle impostazioni e sulle letture degli strumenti, in modo da poter rapidamente ritrovare la stessa condizione sperimentale anche in momenti successivi.

Fate dei semplici schizzi per mostrare le forme d'onda osservate nei punti rilevanti di un circuito. Questo aiuta a comprendere ciò che sta avvenendo e identificare eventuali malfunzionamenti.

Quando costruite delle tabelle disegnate chiaramente le colonne (con intestazioni e unità di misura).

Non appena avete fatto delle misure esaminatele per comprendere subito la qualità dei dati (eventualmente aiutandovi con grafici fatti a mano). Questo esame preliminare serve a verificare che i dati siano ragionevolmente vicini ai comportamenti attesi, e consente di individuare subito errori o malfunzionamenti

evitando quindi di raccogliere grandi quantità di dati per accorgersi poi di qualche errore, e dover ricominciare tutto da capo.

3.2 Altre osservazioni e suggerimenti

Unità di misura: usatele in modo appropriato e scrivetele correttamente, come dovreste già sapere, e cioè, per esempio, volt e non Volt, dB e non db, Hz e non hZ o simili nefandezze. Informazioni sui guai derivanti dal cattivo uso delle unità di misura al sito: www.hq.nasa.gov/pub/pao/reports/1999/MCO_report.pdf

Cifre significative: sceglietele con criterio. Si sono visti studenti usarne anche otto (quale strumento di quelli usati ha questa risoluzione?) e altre volte appena una o due, mentre forse era ragionevole usarne tre.

Errori di misura: argomento importante ma spesso non particolarmente significativo in questo contesto, e allora non ha molto senso indugiarvi troppo. Badate poi che molte volte gli errori sistematici sono dominanti rispetto ai casuali e allora certi sviluppi matematici perdono senso. Del resto molte delle misure che dovete fare rappresentano complessivamente l'*andamento* di un determinato fenomeno, che è ciò che vogliamo porre in luce e che ha molta più importanza di una analisi fine dell'errore del singolo punto sperimentale.

Fit: i fit statistici non sono una panacea, in particolare per dati sbagliati e ancor meno per scelte sbagliate sui dati da utilizzare. Caso tipico: studio della risposta in frequenza di un circuito RC. Spesso ci si dimentica che i comportamenti asintotici sono un'approssimazione, valida solo a grandi distanze dalla frequenza di taglio: quindi è insensato fare un fit lineare dei dati nella regioni vicine alla suddetta frequenza di taglio. Queste ingenuità si evitano facilmente se si fanno rapidamente, a mano, dei grafici che mostrano subito il reale andamento del fenomeno. L'occhio umano è uno strumento molto importante e il fisico sperimentale non deve abbandonarne l'uso a favore del computer!

Grafici: devono essere sempre corredati delle unità di misura sui due assi, possibilmente espresse in unità direttamente leggibili. Per esempio, non è molto sensato esprimere le frequenze in unità logaritmiche scrivendo 3 per indicare 1 kHz. Anche se la scala è logaritmica i valori andrebbero scritti in modo che voi stessi possiate capirci qualche cosa. E magari individuare subito qualche errore grossolano.

Schemi sperimentali: sono una parte essenziale di una buona relazione di laboratorio. Dovrebbero contenere tutti gli elementi perché il lettore capisca cosa si è messo assieme per l'esperienza, in particolare l'indicazione degli strumenti usati. Gli schemi elettrici, in particolare, dovrebbero riportare le indicazioni del tipo e dei valori dei componenti usati (che spesso invece sono indicati da qualche altra parte, rendendone difficile la lettura) e magari anche le indicazioni dei livelli in continua e/o dei livelli dei segnali misurati nei vari punti.

4 Esercitazione n. 1: Familiarizzazione con gli strumenti

Lo scopo di questa esercitazione è di consentire agli studenti di familiarizzarsi con la strumentazione del Laboratorio e di acquisire una buona padronanza del loro uso

Le attrezzature che dovrete imparare a conoscere e ad usare sono:

Basetta per il montaggio dei circuiti
internamente?)

(quali punti sono collegati fra loro

Alimentatori di tensione continua
GND?)

(che differenza c'è fra i terminali di massa e

Tester

Generatore di funzioni

Generatore di impulsi

Oscilloscopio analogico

(a che serve la sonda? che differenza c'è fra ingresso AC e DC?)

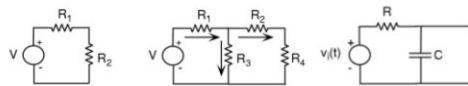
Oscilloscopio digitale

LCR Meter

E' importante che tutti prendano confidenza con gli strumenti, in modo da non avere dubbi sul loro funzionamento e sulle loro prestazioni, con particolare riferimento agli strumenti che verranno usati più spesso, come ad esempio il generatore di funzioni o l'oscillografo analogico.

4.1 Familiarizzazione

Il modo migliore per farlo e' di costruire semplici circuiti con 2 o 3 resistori, oppure con resistori e capacitori, come nella figura.



Si può quindi procedere nel modo seguente:

Costruire uno qualunque dei circuiti sulla basetta, dopo aver misurato il valore dei componenti scelti;

collegare il generatore di funzioni all'ingresso del circuito;

selezionare un'onda sinusoidale sul generatore di funzioni;

quanto atteso.

Si suggerisce in particolare di realizzare un partitore resistivo, come nella prima figura a pagina precedente, con $R_1 = R_2 = 2 \text{ M}\Omega$. Applicando all'ingresso un segnale a onda quadra di 1 volt picco-picco alla frequenza di 10 kHz, si osserverà l'uscita: prima collegandola all'oscilloscopio con un cavetto e poi attraverso la sonda. E allora sarà utile riflettere sui risultati ottenuti nei due casi.

Avendo compreso come funzionano l'oscillografo ed il generatore di funzioni in regime sinusoidale, ripetere le osservazioni in regime impulsivo.

Dopo aver preso confidenza con tutti gli strumenti e con la basetta, si può procedere al punto successivo.

4.2 Studio di un circuito RC passa-alto

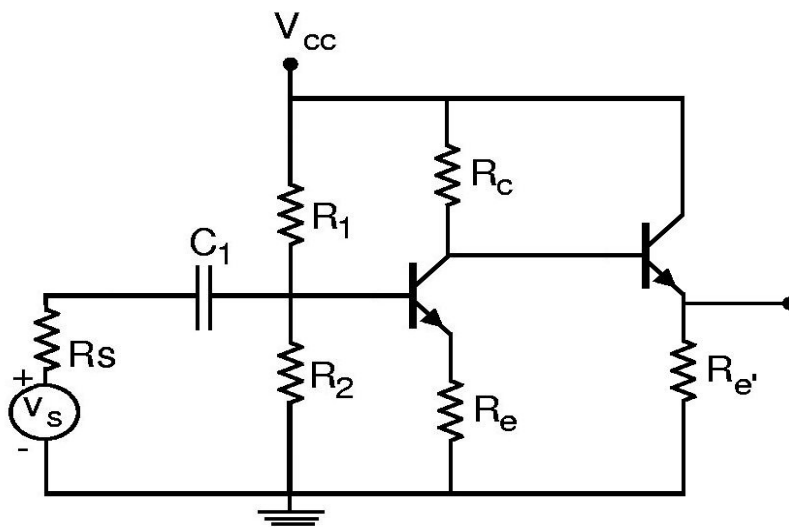
Costruire un circuito RC passa-alto con frequenza di taglio dell'ordine di 10 – 100 kHz e impedenza di ingresso abbastanza alta ($> 1 \text{ k}\Omega$). Studiare, in regime sinusoidale, l'andamento con la frequenza della funzione di trasferimento (modulo e fase), costruendo i diagrammi di Bode del circuito. E' opportuno fare un congruo numero di misure in modo da mettere bene in evidenza gli andamenti asintotici ed il comportamento attorno alla frequenza di taglio.

4.3 Diodo

Costruire un semplice circuito per studiare la caratteristica corrente-tensione di un diodo.

5 Esercitazione n. 2 : Amplificatori a transistor

Utilizzeremo i transistori tipo 2N2222A (npn) per costruire un semplice amplificatore a due stadi, con amplificazione di tensione pari a ~ 8 . Le caratteristiche di questo transistor sono pienamente descritte nel foglio fornito dal costruttore: è bene dare una scorsa a questo foglio, anche per imparare a leggere questo tipo di documentazione. Tuttavia per questo circuito l'unico dato che ci interessa realmente è il valore di h_{fe} : il costruttore ci indica per esso un intervallo tra 50 e 350, a seconda del particolare esemplare e anche delle condizioni di utilizzo.



5.1 Amplificatore ad Emettore Comune (CE)

La prima cosa da fare è progettare e montare il primo stadio. Esso è costituito da un amplificatore CE con rete auto-polarizzante in grado di fornire una amplificazione di tensione $A_v \sim 8$ (attenzione: amplificazione di un segnale variabile, non dei livelli di polarizzazione in continua!).

Scegliamo $V_{CC} = 12\text{ V}$ e decidiamo di lavorare con la tensione di base, $V_B = 1.7\text{ V}$. Da ciò consegue che la tensione dell'emettitore sarà $V_E = 1\text{ V}$. Decidiamo di far lavorare il transistor con una corrente di collettore di 1 mA : quindi la resistenza di emettitore dovrà essere

$$R_E = V_E / I_E = (1\text{ V}) / (1\text{ mA}) = 1\text{ k}\Omega$$

Poiché vogliamo che l'amplificazione di tensione sia pari ad 8 dovremo avere:

$$R_c = 8R_e = 8\text{ k}\Omega$$

La tensione del collettore dovrà quindi essere

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 12 - (1 \text{ mA})(8 \text{ k}\Omega) = 4 \text{ V}$$

La V_{CE} sarà quindi di 3 V. Ci aspettiamo quindi di poter amplificare senza deformazione segnali d'ingresso non superiori a $(3 \text{ V})/8 \sim 350 \text{ mV}$

Ci restano da scegliere le resistenze del partitore di base. Dobbiamo imporre che la corrente del partitore sia molto maggiore della corrente di base. Nel peggiore dei casi $h_{fe} = 50$, quindi

$$I_B = I_C/50 = 20 \text{ }\mu\text{A}$$

E' quindi sufficiente porre $I_P = 200 \text{ }\mu\text{A}$, da cui

$$R_1 + R_2 = 12 \text{ V} / (200 \text{ }\mu\text{A}) = 60 \text{ k}\Omega$$

Inoltre si deve avere $V_B = 1.7 \text{ V}$ e quindi

$$R_2/(R_1 + R_2) = 1.7 / 12 = .14 \quad R_2 = .14 \times 60 \text{ k}\Omega \sim 8 \text{ k}\Omega$$

e infine

$$R_1 \sim 52 \text{ k}\Omega$$

Non tutti i valori che abbiamo scelto corrispondono a resistori effettivamente disponibili. Ma possiamo lievemente modificare il progetto adattandolo alle disponibilità: il comportamento del circuito non cambia se i valori finali di correnti e tensioni statiche sono un po' diversi rispetto a quelli calcolati sopra.

Ora possiamo montare il circuito. Dopo averlo montato, collegare l'alimentazione e verificare con il tester che tutte le tensioni V_C , V_E e V_B siano corrette e vicine ai valori attesi. In particolare dobbiamo verificare che la differenza di potenziale base-emettitore sia $\sim 0.7 \text{ V}$ e che la differenza di potenziale collettore-emettitore sia positiva e molto maggiore di 0.2 V . In questo modo saremo sicuri che il transistor e' nella regione attiva. Se ciò non e', verificare che i resistori abbiano il valore previsto, che tutte le connessioni siano ben fatte e che la tensione d'alimentazione e la massa arrivino sulla scheda di montaggio. Se dopo queste verifiche non avete ancora risolto il problema provate a sostituire il transistor.

Se la verifica e' positiva possiamo applicare all'ingresso un segnale sinusoidale ad una frequenza intermedia (20 - 30 kHz e 200 - 300 mV di ampiezza picco-picco). Misuriamo con l'oscilloscopio la tensione d'uscita del primo stadio; dovremmo trovare un segnale sinusoidale con ampiezza 8 volte superiore rispetto al segnale d'ingresso. Aumentando progressivamente l'ampiezza del segnale d'ingresso si vedrà ad un certo punto che il segnale d'uscita si deforma e che le sommità della sinusoide vengono 'tagliate': ciò e' dovuto al fatto che l'ampiezza del segnale d'uscita supera la massima dinamica consentita dal valore statico di V_{CE} .

5.2 Inseguitore di tensione

Possiamo ora aggiungere al circuito il secondo stadio costituito da un inseguitore di tensione ("emitter follower"), utilizzando un altro transistor 2N2222A. Questa volta dobbiamo scegliere solo il valore della resistenza R_E .

Come facciamo? La base del secondo transistor verrà collegata direttamente al collettore del primo. Quindi la sua tensione statica sarà $V_{B'} = 4 \text{ V}$, e di conseguenza $V_{E'} = 3.3 \text{ V}$. Ponendo $R_{E'} = 1 \text{ k}\Omega$ avremo una corrente di collettore/emettitore di $\sim 3 \text{ mA}$, che e' un valore assolutamente ragionevole.

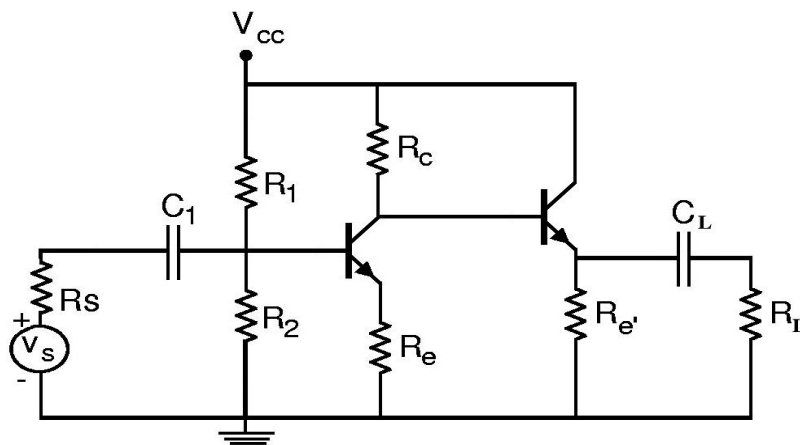
Disconnettiamo l'alimentazione (e il generatore di segnali) e montiamo il secondo transistor. Verifichiamo di nuovo con il tester che tutte le tensioni statiche siano corrette; in caso positivo possiamo riapplicare il segnale di ingresso e misurare il segnale d'uscita sul secondo emettitore. Dovremmo trovare di nuovo un valore di amplificazione ~ 8 (l'inseguitore di tensione non amplifica in tensione!).

A volte questo circuito può essere molto “disturbato”. Potete migliorarne il comportamento aggiungendo un resistore sul collettore.

5.3 Resistenza d'uscita

Possiamo misurare la resistenza d'uscita R_O del secondo stadio del nostro amplificatore. Per farlo dovremo confrontare la tensione d'uscita con e senza un carico R_L esterno. Naturalmente dovremo scegliere il valore del carico esterno in modo da ottimizzare la sensibilità della nostra misura. E' noto che questo si ottiene quando R_L ha un valore vicino a R_O . Poiché ci aspettiamo una resistenza d'uscita dell'ordine di qualche decina di ohm, ci converrà scegliere R_L in questo intervallo di valori.

Tuttavia, una resistenza così bassa posta in parallelo a $R_{e'}$ farebbe fluire nel transistor una corrente continua troppo elevata, modificando le polarizzazioni. Ciò si evita mettendo in serie all'uscita (cioè a R_L) un capacitore C_L . La misura va quindi fatta ad una frequenza abbastanza alta, tale che l'impedenza del capacitore sia comunque trascurabile rispetto a R_L .



5.4 Risposta in frequenza

Vogliamo costruire il diagramma di Bode dell'ampiezza della funzione di trasferimento. Quindi dobbiamo misurare la amplificazione di tensione dell'amplificatore in tutto l'intervallo di frequenza esplorabile con il generatore di funzioni disponibile (da pochi Hz fino a qualche MHz). Possibilmente le misure devono essere equamente distribuite in scala logaritmica ed eventualmente infittite per porre in evidenza i cambi di regime attorno alle frequenze critiche. In queste misure può essere necessario aggiustare l'ampiezza del segnale d'ingresso: diminuendola quando il segnale d'uscita risultasse deformato; aumentandola quando diventasse troppo piccolo per consentirne una buona misura.

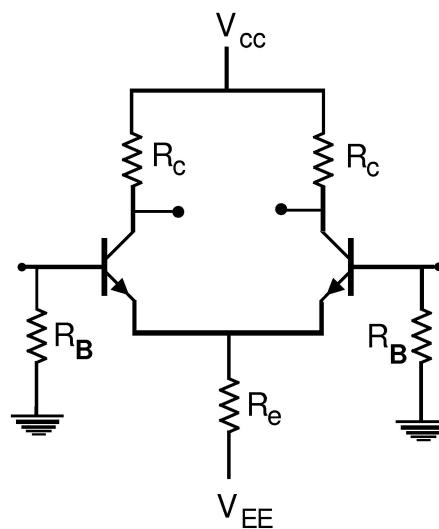
Ci aspettiamo di osservare, a bassissima frequenza, un comportamento di tipo 'passa alto', seguito, a media frequenza da un'amplificazione costante. A frequenze molto alte dovremmo osservare una discesa (comportamento tipo 'passa basso') dovuta alle capacità interne dei due transistori. E' possibile che quest'ultima zona non sia osservabile, perché situata al di là della massima frequenza ottenibile con il generatore.

6 Esercitazione n. 3 : Amplificatore differenziale

Vogliamo costruire un amplificatore differenziale utilizzando due transistor 2N2222A.

Studieremo poi le sue prestazioni con uscita in singola, cioè prelevandola da uno dei due collettori. In questa modalità la simmetria del circuito non è particolarmente rilevante; comunque sceglieremo, per semplicità, di porre le due resistenze di base e le due resistenze di collettore circa uguali.

Dovremo progettare la rete di polarizzazione in modo che la tensione delle 2 basi sia prossima a zero: questo ci consentirà di eliminare i capacitori di disaccoppiamento agli ingressi e quindi ottenere una buona risposta anche a bassissima frequenza.



6.1 Progettazione e montaggio

Anzitutto, utilizzeremo due tensioni di alimentazione uguali ed opposte, per esempio, $V_{CC} = 14V$, $V_{EE} = -14V$.

Conviene scegliere i 2 resistori R_B dell'ordine di $1\text{ k}\Omega$. In questo modo la tensione di ciascuna base sarà prossima a zero; infatti $V_B = R_B I_B$ e, poiché I_B è presumibilmente dell'ordine delle decine di μA , avremo una V_B dell'ordine di pochi mV. A questo punto V_E sarà bloccato a $-0.7V$ e quindi la scelta di R_E determinerà la somma delle due correnti di emettitore; ipotizzando che i due transistor siano circa uguali viene così determinata la corrente di ciascun emettitore. Infine potremo scegliere R_C .

Per scegliere convenientemente i valori di R_E ed R_C bisogna avere presente gli obiettivi che si desidera raggiungere:

1. siamo interessati ad avere un Common Mode Rejection Ratio grande, e questi migliora al crescere di R_E ; siamo meno interessati ad avere una grande amplificazione in assoluto;
2. occorre lasciare al transistor una congrua dinamica d'uscita, quindi una V_{CE} a riposo di almeno $6 - 7\text{ V}$

Montare accuratamente il circuito alimentarlo e verificare che il punto di lavoro dei due transistor sia corretto, cioè prossimo ai valori di progetto e comunque, che i due transistor sono nella regione attiva e che le due V_{CE} sono di ampiezza sufficiente.

6.2 Misure

Per misurare direttamente A_d e A_c dovremmo poter inviare ai due ingressi due segnali uguali ovvero due segnali uguali ed opposti.

Possiamo più facilmente misurare A_1 ed A_2 , cioè le due amplificazioni con ingresso singolo e ricavare poi

$$A_d = (A_1 - A_2)/2$$

$$A_c = (A_1 + A_2)$$

Queste misure andrebbero in linea di principio fatte applicando alternativamente il segnale ad uno dei due ingressi e corto circuitando l'altro. Conviene effettuare queste misure a media frequenza, verificando che i valori trovati siano (almeno come ordine di grandezza) in accordo con i valori attesi.

Ci aspettiamo di trovare, per A_1 e A_2 , due valori molto simili in valore assoluto, ma di segno opposto; A_d rappresenta in sostanza la media dei due valori assoluti, mentre A_c è la differenza. Quindi è chiaro che il circuito è tanto migliore quanto più A_1 e A_2 sono vicini (sempre in valore assoluto!).

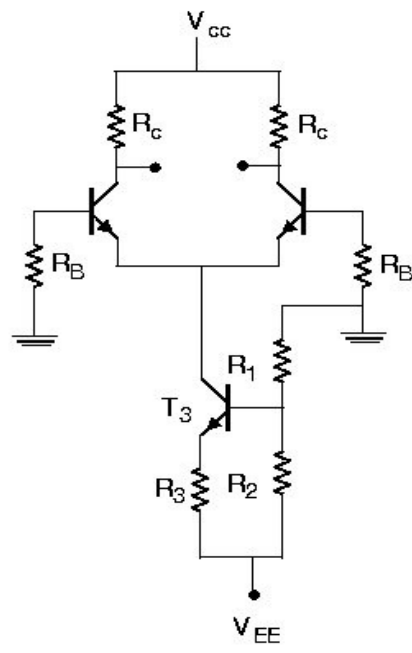
Si noti che le amplificazioni in singola di questo circuito sono comunque elevate, quindi va verificato che il segnale in uscita non sia distorto (sintomo di saturazione o di interdizione del transistor). In tal caso occorre ridurre opportunamente l'ampiezza del segnale d'ingresso. Inoltre è bene verificare le misure per due o tre valori di frequenza; vogliamo essere sicuri di non trovarci vicini alla frequenza di taglio del circuito, che può essere anche relativamente bassa.

Da tutte le considerazioni qui esposte è chiaro quindi che queste misure sono delicate e dovete cercare di valutare ragionevolmente gli errori di misura.

6.3 Miglioramento del CMRR del circuito con un terzo transistor

Si può provare a migliorare il CMRR del circuito, sostituendo la resistenza di emettitore con un generatore di corrente. Questo viene ottenuto inserendo il transistor T_3 . Scegliere le resistenze R_1 ed R_2 in modo da fissare la tensione di base ad un valore opportuno (per esempio $V_{BE}/2$); a questo punto la corrente erogata da T_3 è determinata dalla scelta di R_3 . La cosa più semplice è di scegliere R_3 in modo da avere grosso modo la stessa corrente che si aveva nella resistenza R_E nel circuito precedente.

Dopo aver montato il circuito, verificare di nuovo tutte le tensioni statiche, per assicurarsi che l'amplificatore stia funzionando correttamente. Rimisurare nella nuova situazione A_1 e A_2 e ricavare il CMRR. Se il circuito è stato progettato e montato correttamente il CMRR può essere molto elevato e A_c potrebbe risultare troppo piccola per poter essere apprezzata con gli strumenti a nostra disposizione.



7 Esercitazione n. 4 : Amplificatore operazionale (I)

7.1 Introduzione

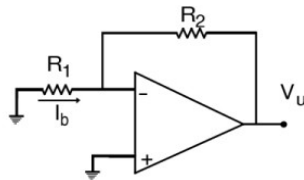
In questa esercitazione (e nella prossima) utilizzeremo l'amplificatore operazionale LM358 (o equivalente). Si tratta di un integrato a 8 piedini, contenente due amplificatori operazionali. Come al solito è opportuno prendere visione dei fogli illustrativi per familiarizzarsi con le caratteristiche principali di questo dispositivo. Sebbene lo LM358 possa funzionare anche con una sola alimentazione è opportuno, per le nostre misure, fornirgli una doppia alimentazione (il piedino denominato 'ground' va quindi alimentato con la tensione negativa), entro i limiti previsti dal costruttore.

Inoltre è bene sempre ricordare che l'uscita dell'operazionale non è in grado di fornire correnti molto grandi: quindi le resistenze della rete di reazione non devono essere troppo piccole.

Ultima avvertenza: è importante essere in grado di accorgersi che l'amplificatore non sta funzionando correttamente. E' relativamente facile, durante il montaggio, danneggiare inavvertitamente l'integrato; in genere, quando l'operazionale è stato danneggiato, la tensione di uscita resta stabilmente ad un valore prossimo a quello di una delle due alimentazioni, indipendentemente da ciò che applichiamo agli ingressi, quindi è facile diagnosticare questo inconveniente (attenzione: rischiate di non accorgervene se gli ingressi dell'oscilloscopio sono in modalità "AC"!). Un altro indizio diagnostico è la tensione fra l'ingresso invertente e quello non invertente: se è maggiore di qualche millivolt (ricordate che questi oggetti hanno un guadagno altissimo) vuol dire che l'operazionale non è alimentato correttamente oppure è guasto.

7.2 Misura della tensione di offset

La tensione di offset d'ingresso, V_{os} , è definita come la tensione che occorre porre tra i due ingressi per azzerare perfettamente l'uscita. E' conveniente misurarla introducendo una reazione invertente (vedi figura): si ha allora: $V_{os} \sim -V_u(R_1/R_2)$



Questa formula è valida purché sia possibile trascurare il contributo della corrente di polarizzazione I_B che scorre nell'ingresso invertente (in sostanza se $R_1 I_B \ll V_{os}$).

Dalle specifiche fornite dal costruttore I_B è minore o dell'ordine di 100 nA, mentre la V_{os} è dell'ordine dei mV. Questo ci fornisce le informazioni necessarie per scegliere R_1 . La scelta di R_2 determina il fattore di amplificazione: è chiaro che dovremo amplificare molto per rendere visibile sull'uscita l'effetto dell'offset.

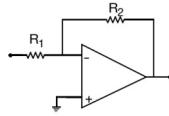
(Nota bene: R_2 non deve comunque essere troppo piccola. Il suo valore determina la corrente che viene estratta dall'uscita, ed essa non deve avvicinarsi ai valori massimi previsti dal costruttore.)

Il valore di V_{os} osservato sperimentalmente è in genere molto piccolo, spesso assai inferiore ai valori prudenzialmente dichiarati dal costruttore. Questo non deve stupire: i progressi nella tecnologia dei circuiti

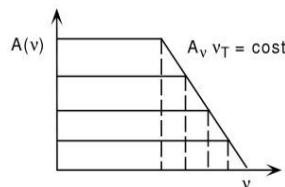
integrati rendono possibile raggiungere ottime simmetrie negli stadi di ingresso anche in amplificatori a basso costo come lo LM358.

7.3 Misura del prodotto guadagno x banda

Costruire un amplificatore invertente e misurare l'andamento della risposta in funzione della frequenza per vari valori dell'amplificazione, costruendo il diagramma di Bode complessivo (vedi figura). verificare che il prodotto (Amplificazione)x(Banda Passante) è costante.



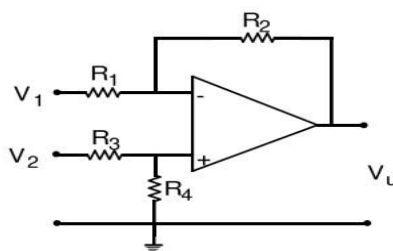
E' opportuno scegliere i vari valori di amplificazione (almeno tre, meglio quattro) in modo oculato, cioè tale da consentirci di apprezzare bene questo comportamento in un intervallo più grande possibile di valori e con un congruo numero di misure in funzione della frequenza (senza però farne troppe nella regione in cui l'amplificazione è costante).



7.4 Amplificatore differenziale

Progettare e costruire l'amplificatore differenziale (come in figura) verificarne il funzionamento e misurare il Common Mode Rejection Ratio (CMRR) a media frequenza.

Confrontare il risultato ottenuto con il valore stimato sulla base dei valori effettivi dei resistori utilizzati.

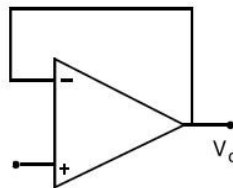


In aula abbiamo studiato questo circuito ricavando la sua amplificazione nell'ipotesi di assoluta simmetria dei resistori, cioè $R_1=R_3$ e $R_2=R_4$. Dovete quindi calcolare nuovamente l'amplificazione, eliminando questa ipotesi, e ricavare A_d , A_c e il Common Mode Rejection Ratio atteso. Naturalmente, in questo calcolo, faremo comunque l'ipotesi che il CMRR intrinseco dell'operazionale sia infinito (ovvero molto maggiore di quello derivante dalla rete resistiva esterna).

8 Esercitazione n. 5 : Amplificatore operazionale (II)

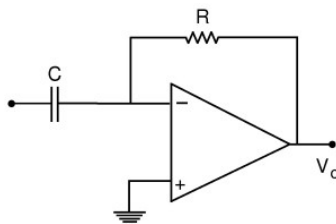
8.1 Misura della "Slew Rate"

Per misurare la slew rate dell'operazionale e' conveniente costruire un amplificatore non invertente con amplificazione unitaria (inseguitore di tensione). Inviando all'ingresso un segnale rettangolare di ampiezza sufficientemente grande e' possibile, osservando il segnale in uscita, misurare direttamente la slew rate. Confrontare il valore ottenuto con quello dichiarato dal costruttore nei fogli illustrativi.



8.2 Derivatore

Costruire un derivatore scegliendo un opportuno valore per R e C, in modo che il prodotto RC sia dell'ordine di 100 μ s. Studiare il diagramma di Bode dell'ampiezza nel più ampio intervallo possibile di frequenza utilizzando un segnale d'ingresso sinusoidale. Studiare poi il comportamento del circuito con segnali d'ingresso di forma diversa (onda triangolare, onda rettangolare) di opportuna frequenza.

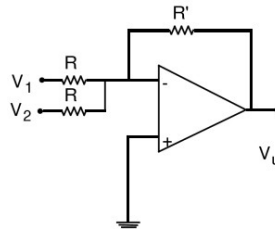


Il circuito illustrato in figura ha ben poche probabilità di funzionare in modo soddisfacente. Il forte effetto Miller generato dall'altissima amplificazione dell'operazionale provoca l'insorgenza di una risonanza molto stretta (in sostanza il circuito acquista un comportamento tipo RLC), in grado di catturare disturbi esterni e amplificarli enormemente, rendendo il circuito non utilizzabile.

Per ovviare a questo inconveniente è sufficiente aggiungere all'ingresso, in serie al capacitore, un ulteriore resistore, dell'ordine di 500 – 1000 ohm; in questo modo è possibile utilizzare il circuito e fare le misure descritte in precedenza. E' comunque molto istruttivo osservare il comportamento del circuito con e senza questo nuovo resistore.

8.3 Sommatore

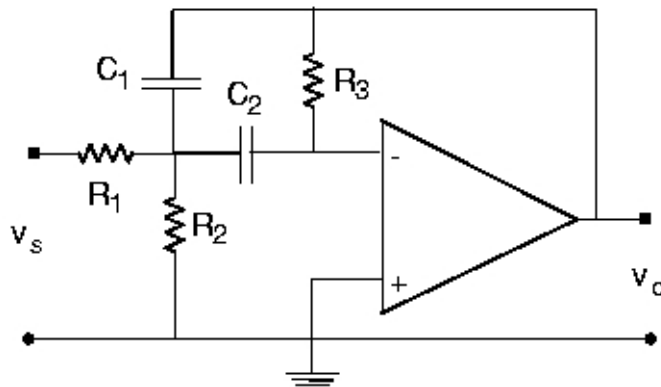
Costruire un sommatore a due ingressi e verificarne il comportamento utilizzando come segnali di ingresso da sommare un'onda sinusoidale e un livello costante (ricavato, mediante un trimmer) da una delle alimentazioni, oppure un'onda sinusoidale e un'onda quadra ricavata dal secondo generatore disponibile sul banco. In quest'ultimo caso, scegliendo poco diverse le frequenze delle due onde, potrete osservare all'oscilloscopio i battimenti fra esse.



9 Esercitazione n. 6: Amplificatore operazionale – Filtro attivo

9.1 Progettazione e realizzazione del circuito

Vogliamo costruire un filtro attivo passa-banda (vedi figura), utilizzando l'amplificatore integrato LM358. Il comportamento di questo circuito è stato studiato nelle dispense del corso.



Valori consigliati:

$$R_1 = 100k$$

$$R_2 = 330 \text{ Ohm}$$

$$R_3 = 1 \text{ MOhm}$$

$$C_1 = C_2 = 2.2 \text{ nF}$$

Con questi valori dei componenti ci aspettiamo:

Frequenza di risonanza: $\sim 4 \text{ KHz}$

Amplificazione sul picco: ~ 5

Fattore di merito: ~ 25

Larghezza di banda: $\sim 150 \text{ Hz}$

9.2 Misure

Dopo aver montato il circuito verificate rapidamente che esso funzioni correttamente.

Successivamente studiate sistematicamente l'andamento in frequenza della risposta effettuando un congruo numero di misure, in modo da evidenziare l'andamento risonante ed essere in grado di ricavare i valori sperimentali per la frequenza di risonanza, amplificazione sul picco, larghezza di banda. Confrontate i risultati ottenuti con i valori attesi.

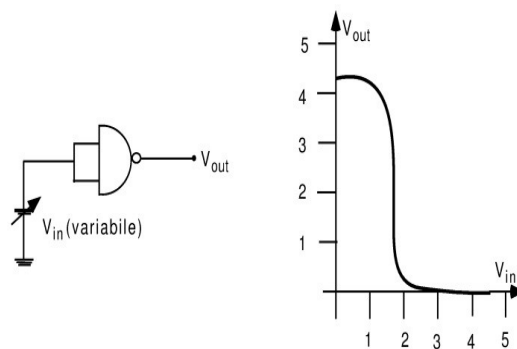
10 Esercitazione n. 7: Circuiti logici I

Questa esercitazione e' dedicata allo studio dei circuiti logici. Utilizzeremo vari integrati della famiglia TTL 74xx. Queste porte logiche devono essere alimentate con una tensione di 5V (o leggermente superiore), mentre il piedino GND deve essere collegato a massa.

Normalmente (tranne l'esperimento 1) gli ingressi delle porte logiche dovranno essere collegati a 5 V o poco meno ("1" logico) oppure a 0 V o poco più ("0" logico). Si noti che lo "0" logico significa collegare l'ingresso a massa e non lasciarlo volante!

Per visualizzare rapidamente il livello delle uscite utilizzeremo dei LED (diodi luminosi). Il LED deve essere protetto con una resistenza dell'ordine di 500 Ohm.

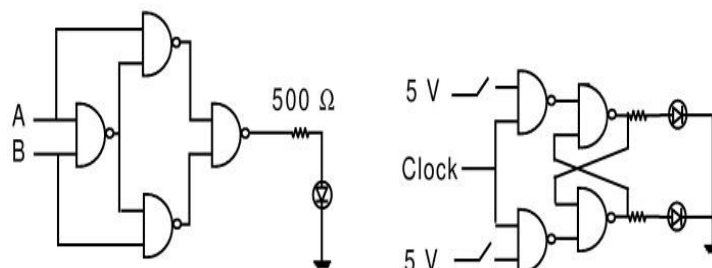
10.1 Livello di commutazione delle porte logiche TTL



Per prima cosa studieremo il livello di commutazione di una porta NOT (costruita utilizzando un NAND 7400). Manderemo all'ingresso una tensione variabile tra 0 e 5 V, ottenuta da uno degli alimentatori disponibili (diverso da quello utilizzato per alimentare il circuito!) e studieremo l'andamento conseguente della tensione di uscita. In figura e' mostrato l'andamento orientativamente previsto.

10.2 OR esclusivo

Costruire il circuito (vedi figura) e verificare la tavola della verità.



10.3 Flip-flop SR

Costruire il circuito (vedi figura) e verificare la tavola della verità. Per fare ciò conviene collegare gli ingressi al livello logico scelto e poi fornire al circuito un impulso di clock manualmente oppure utilizzando il generatore di funzioni in modalità di impulsatore (ovviamente e' necessario fornire impulsi di 5 V su un livello base di 0 V!).

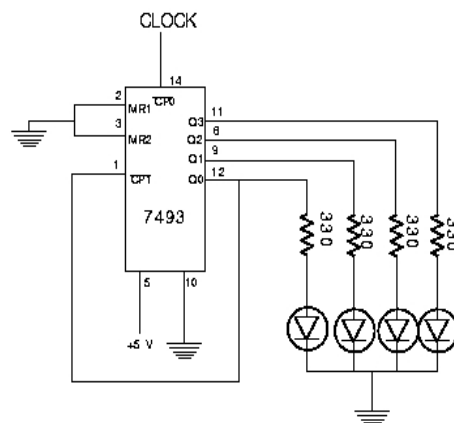
11 Esercitazione n. 8 - 9 : Circuiti logici II

Questa esercitazione e' dedicata alla costruzione di un convertitore digitale-analogico (DAC) a 4 bit. Data la complessità, ad essa sono dedicati due pomeriggi.

Lo schema complessivo è riportato nella figura grande, in cui si distinguono i vari blocchi funzionali: contatore, comparatore d'ingresso, convertitore digitale analogico a pesiera, adattatore di livello logico, clock. La tensione da convertire, V_x , deve essere negativa e viene costruita con un semplice partitore a partire dai -15 V disponibili dall'alimentazione. L'uscita del comparatore ($-15\text{ V} / +15\text{ V}$) viene riportata ai livelli logici standard TTL tramite il blocco "Adattatore di livello logico". Il clock è ottenuto realizzando con due porte NAND un oscillatore a frequenza fissa.

Convieni realizzare il circuito costruendo un blocco per volta e verificandone man mano il funzionamento.

11.1 Contatore a 4 bit



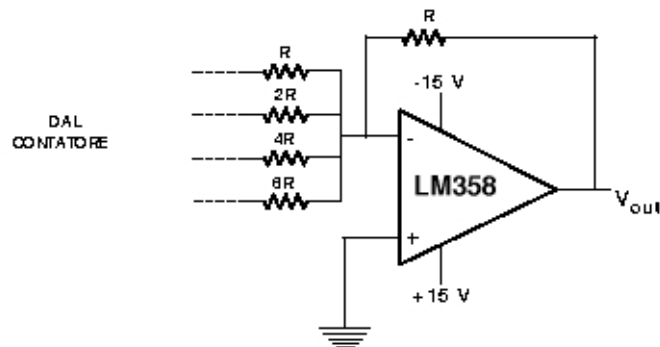
Dobbiamo anzitutto montare il contatore che utilizzeremo per provare il DAC. Possiamo utilizzare l'integrato 7493, montato come suggerito nella figura. Per verificarne il funzionamento inviare all'ingresso di Clock un'onda quadra con ampiezza tra 0 e 5V e frequenza di circa 1 Hz. Si dovrebbe essere in grado di visualizzare la sequenza di accensione dei LED's verificandone la correttezza.

11.2 DAC a 4 bit

Costruire un DAC invertente a pesiera, come in figura. La scelta dei valori di R' ed R deve essere effettuata in modo da avere un'uscita compresa nella massima dinamica d'uscita possibile per l'operazionale, tenendo conto che il circuito e' destinato a ricevere agli ingressi livelli logici TTL ($0\text{ V} / +5\text{ V}$). Inoltre i valori delle resistenze devono essere non troppo piccoli, per evitare eccessivi carichi di corrente. Cercate di selezionare i resistori R , $2R$, $4R$ ed $8R$ il piu' possibile vicini ai valori nominali, in modo che la scala dei "pesi" sia ragionevolmente vicina a quella ideale.

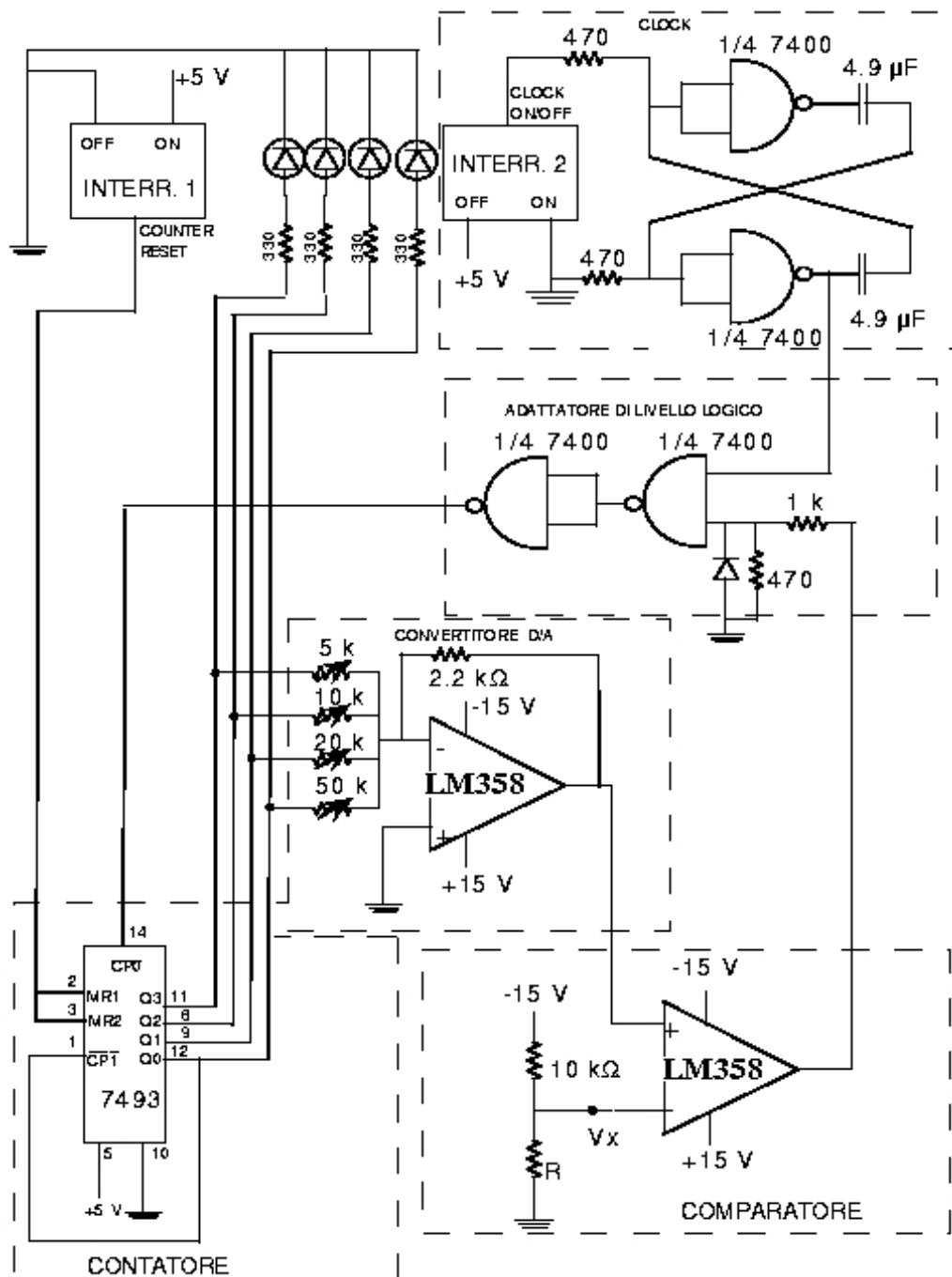
Dopo aver verificato il funzionamento del circuito collegate gli ingressi alle uscite del contatore. Inviando ora un clock a frequenza ragionevolmente elevata si potrà visualizzare sull'oscillografo l'andamento temporale della tensione d'uscita. Costruite un grafico della tensione d'uscita in funzione del numero contenuto nel contatore e verificate che la relazione sia approssimativamente lineare, confrontando il risultato con l'andamento atteso sulla base dei valori effettivi delle resistenze utilizzate.

Si deve anche tenere conto del fatto che le 4 uscite del clock non sono in genere esattamente uguali ai valori nominali dello standard TTL. Tipicamente un "1" logico produrrà un'uscita dell'ordine di 3 – 3.5 V; inoltre, in alcuni casi, i valori delle uscite non sono stabili, ma variano lievemente al variare del conteggio. Questo si traduce in un "deterioramento" complessivo della qualità del convertitore, che non inficia tuttavia il suo funzionamento.



11.3 Circuito completo

Possiamo ora costruire le altre parti del circuito: comparatore, adattatore di livello logico e clock, verificando il funzionamento di ciascuna. Infine, finire i collegamenti e provare il funzionamento per qualche valore della tensione V_x , verificando la linearità della risposta.



12 Esercitazione n. 10 : Microprocessore Z80 (I)

Leggere accuratamente la descrizione della scheda Z80, visualizzando i vari blocchi funzionali in modo da comprenderne pienamente l'uso.

12.1 Verifica della temporizzazione dei comandi e cicli di istruzione

Scrivere un semplice programma di loop infinito e caricarlo in memoria utilizzando la procedura di immissione manuale in memoria.

indirizzo	dato	istruzione	commento
00	00	NOP	nessuna operazione
01	C3	JP0001	salto incondizionato
02	01		all'indirizzo 0001
03	00		

Verificare con l'oscilloscopio i segnali di CLOCK, M1, MREQ, RD, e studiarne le temporizzazioni.

12.2 Operazioni di input e output

Possiamo comprendere il meccanismo di dialogo dello Z80 con dispositivi periferici, utilizzando gli interruttori e il display connesso al bus dei dati. Occorre quindi anzitutto assegnare a ciascuno di questi due dispositivi un indirizzo; ciò viene ottenuto, sulla scheda didattica, collegando con opportuni ponticelli due delle uscite del decodificatore di indirizzi al blocco degli interruttori e al display. (Il decodificatore di indirizzi dispone di quattro uscite, corrispondenti agli indirizzi 00,01,02,03; possiamo quindi scegliere arbitrariamente quali utilizzare tra queste)

Caricare poi in memoria (con la consueta procedura) il programma seguente:

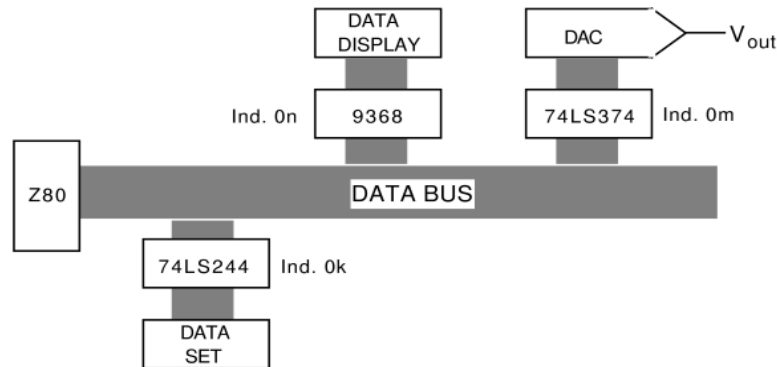
indirizzo	dato	istruzione	commento
00	06	LD B,xx	carica registro B con xx
01	xx		
02	05	DEC B	B=B-1
03	C2	JPNZ 0002	salto condizionato a 0002
04	02		(salta se B diverso da 0)
05	00		

06	DB	IN A,(0n)	carica accumulatore con il dato
07	0n		sul dispositivo d'ingresso (ind. 0n)
08	D3	OUT(0m),A	presenta contenuto accumulatore su
09	0m		dispositivo d'uscita (ind. 0m)
0A	C3	JP 0000	salto incondizionato a 0000
0B	00		
0C	00		

(Nel programma abbiamo indicato con 0n e 0m i due indirizzi: naturalmente dovrete inserire i valori corrispondenti alla scelta che avete fatto con i ponticelli!)

Il programma legge il dato contenuto sugli interruttori (unita' di input) e lo scrive sul display (unita' di output). Eseguire il programma con un CLOCK a bassa frequenza in modo da poter cambiare il dato mentre il programma e' in RUN.

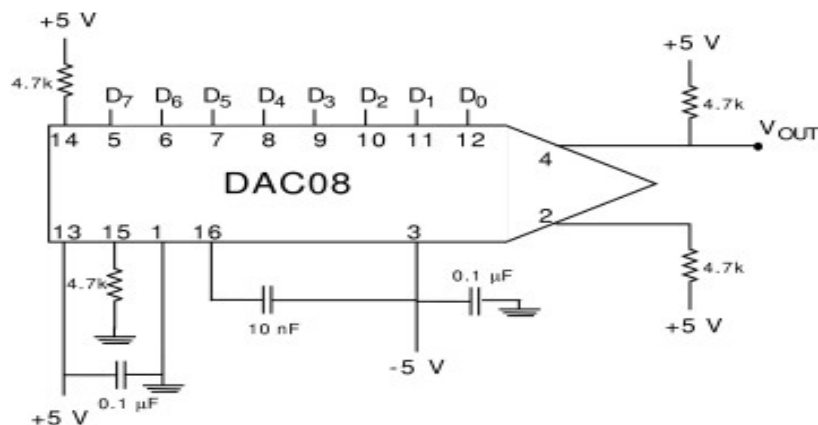
13 Esercitazione n. 11 : Microprocessore Z80 (II)



Lo scopo di questa esercitazione è la costruzione di un convertitore analogico digitale programmabile, utilizzando la scheda Z80 e un convertitore (DAC08) commerciale. Il DAC deve essere interfacciato al bus del microprocessore in modo da divenire una sua periferica di uscita, che potrà quindi essere pilotata da programma.

13.1 Montaggio del DAC

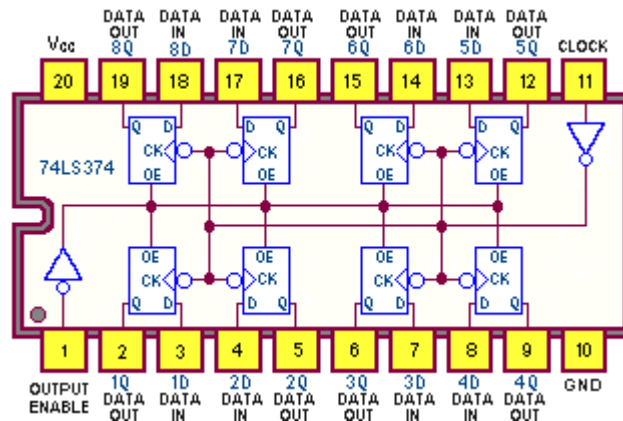
La prima cosa da fare è montare il DAC seguendo lo schema riportato in figura. Con questo montaggio il DAC fornisce all'uscita 0 V quando gli ingressi sono tutti ad "1" logico e +5V quando gli ingressi sono tutti a "0" logico. Verificarne il funzionamento, almeno in maniera grossolana, inviando agli ingressi dei livelli logici (0 o 1) ottenuti con opportuni collegamenti a massa o all'alimentazione dei piedini di ingresso.



13.2 Collegamento del DAC allo Z80

A questo punto possiamo collegare il DAC allo Z80 utilizzando un buffer 74LS374.

Il 74LS374 e' costituito da 8 flip-flops di tipo D, 'edge triggered'. Sul fronte di salita del clock le uscite Q sono poste allo stato logico presente negli ingressi D. L'ingresso 'Output Enable' (attivo basso) puo' essere utilizzato per mettere le 8 uscite nel normale stato logico, oppure in alta impedenza.



Gli 8 ingressi D vanno quindi collegati al bus dei dati, mentre le 8 uscite Q vanno collegate agli ingressi del DAC. OE e Clock vanno ricavati dalla logica di indirizzamento presente sulla scheda Z80 in modo che il dato presente sul bus venga trasferito nel buffer e di qui al DAC. La cosa più semplice è di collegare OE a massa (l'output è quindi sempre abilitato) e il Clock all'uscita del decodificatore di indirizzi corrispondente all'indirizzo scelto per questa periferica (per esempio 03). In questo modo gli ingressi del latch sono abilitati quando la periferica è indirizzata mentre le uscite sono permanentemente connesse agli ingressi del DAC.

13.3 Calibrazione del DAC

Con il programma seguente lo Z80 invia al DAC il dato letto dalla tastiera. Quindi e' possibile eseguire una calibrazione del sistema osservando con l'oscillografo la tensione in uscita dal DAC.

indirizzo	dato	label	istruzione	commento
00	DB	start	IN A,(0k)	legge dato da tastiera
01	0k			
02	D3		OUT(0m),A	scrive dato su DAC
03	0m			
04	D3		OUT(0n),A	scrive dato su display
05	0n			
06	C3		JP start	torna a start
07	00			
08	00			

(Nel programma abbiamo indicato con 0k, 0n e 0m gli indirizzi delle tre periferiche coinvolte: naturalmente dovrete inserire i valori corrispondenti alla scelta che avete fatto sulla scheda!)

13.4 Generazione di un dente di sega. Misura dell'ampiezza e del periodo.

Il programma che segue genera un dente di sega che potrà essere osservato all'oscillografo. Il periodo e' strettamente correlato al numero di cicli di clock necessari per eseguire un ciclo completo del programma.

indirizzo	dato	label	istruzione	commento
00	D3	up	OUT(0m),A	scrive su DAC
01	0m			
02	3C		INC A	A=A+1
03	C2		JPNZ up	ripete se A non 0
04	00	down		
05	00			
06	3D		DEC A	A=A-1
07	D3		OUT(0m),A	scrive su DAC
08	0m			
09	C2		JPNZ down	ripete se A non 0
0A	06			
0B	00			
0C	C3		JP up	ripete il ciclo
0D	00			
0E	00			

13.5 Forma d'onda costruita con dati memorizzati.

E' possibile costruire una forma d'onda a partire da una tabella contenuta nella memoria della scheda.

Inserire in memoria jj dati (che rappresentano i campioni della forma d'onda desiderata) nelle locazioni da kk a kk + jj -1

Scrivere poi il seguente programma:

indirizzo	dato	label	istruzione	commento
00	06	start	LD B,jj	Carica Registro B con numero di dati
01	jj			
02	21		LD HL, 00kk	Carica registri HL con primo indirizzo dati
03	kk			
04	00			
05	7E	loop	LD A,(HL)	Copia (HL) in A
06	D3		OUT(0n),A	Scrive sul DAC
07	0n			
08	23		INC HL	Incrementa HL
09	05		DEC B	B = B-1
0A	C2		JPNZ loop	Ripete per il nuovo dato
0B	05			
0C	00			
0D	C3		JP start	Ripete tutto il ciclo
0E	00			
0F	00			

14 Esercitazione n. 12: Microprocessore Z80 (III)

Vogliamo costruire un convertitore analogico digitale (ADC) “tracking”.

Questo verrà realizzato aggiungendo al sistema realizzato nella esperienza precedente una ulteriore unità periferica.

L'uscita del DAC viene inviata ad un comparatore; all'altro ingresso del comparatore inviamo la tensione che vogliamo convertire (ottenuta tramite un trimmer a partire da una tensione costante). L'uscita del comparatore viene letta (attraverso un buffer) dallo Z80, che è quindi in grado di aumentare o diminuire la tensione del DAC in base al risultato della comparazione (vedi il diagramma di flusso in figura).

Dopo aver montato il circuito scrivete il programma e caricatelo in memoria.

Se tutto è stato fatto correttamente il sistema dovrebbe essere in grado di “inseguire” le variazioni della tensione V_x , sia in aumento che in diminuzione (entro l'intervallo di funzionamento del sistema).

