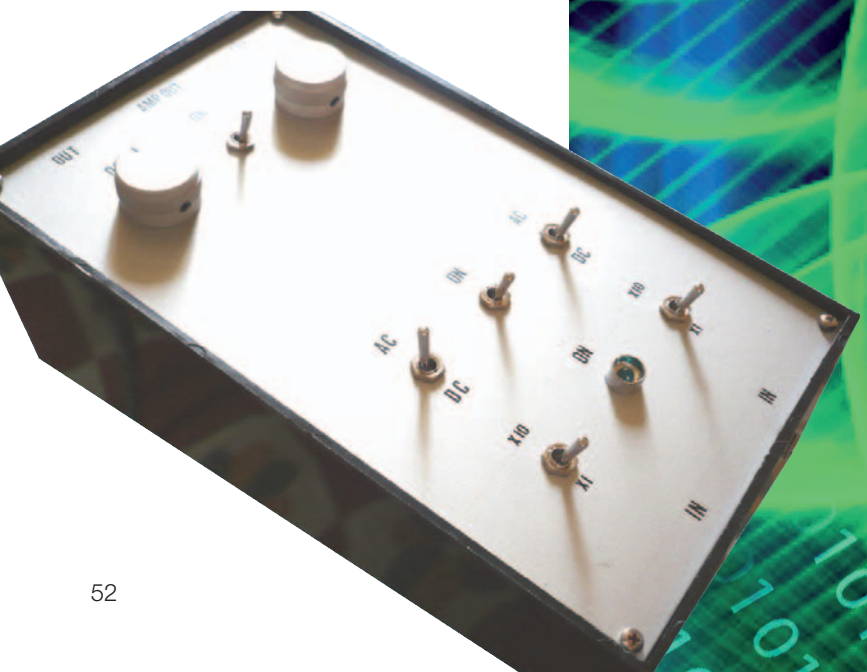
di MARIO ROTIGNI

COME TRASFORMARE UN PC *in oscilloscopio*

Il desiderio di costruirsi un laboratorio in casa spendendo pochi soldi, suggerisce di utilizzare come oscilloscopio un PC con uno dei tanti programmi disponibili in rete. E' opportuno però prevedere una buona protezione da rischi di danneggiamento. Ecco come

L'uso del PC casalingo come strumento di misura può rivelarsi piuttosto nocivo per la nostra macchina, esponendola a rischi connessi a possibili danni elettrici dovuti a sovratensioni e sovracorrenti. Ho quindi voluto realizzare un accessorio che offrisse un elementare sottoinsieme delle funzioni base offerte dallo stadio di ingresso di un vero oscilloscopio ed al tempo stesso proteggesse il PC. Lo scopo dell'articolo è in realtà duplice, realizzare lo stadio di ingresso ed allo stesso tempo, richiamare l'attenzione su alcuni aspetti del progetto di un apparato elettronico, a volte trascurati, le protezioni. Questi accorgimenti rientrano nelle filosofie di Robust Design e Design for Reliability che si preoccupano non solo di progettare ap-



specifiche

Per definire correttamente le specifiche dobbiamo innanzitutto avere chiaro il campo di applicazione previsto. In questo caso si tratta di verifiche di circuiti in banda audio, sensori e piccole applicazioni di microcontrollori per robotica amatoriale. Potremmo ad esempio verificare i sensori acustici del nostro robot, la risposta di fotoresistenze o gli impulsi di comando dei motori. Naturalmente, dovremo limitare le nostre aspettative adattandole alle caratteristiche delle schede audio.
Definiamo quindi le specifiche desiderate per il nostro FrontEnd.

- Funzione da realizzare: Amplificatore di ingresso per Oscilloscopio basato su PC,con protezione /separazione della circuiteria interna del PC da possibili rischi elettrici dovuti a segnali di ingresso anomali.
- Possibilità di utilizzo di un Amplificatore di Isolamento con separazione galvanica tra ingresso ed uscita.
- Numero di canali: due gemelli.
- Amplificazione: Fissa, 1 o 10, da decidere in sede di montaggio, vedi articolo
- Attenuazione Ingresso:Selezionabile x1 o x10
- Segnale in ingresso Max: 10 V con Attenuazione x10, 1 V con Attenuazione x1
- Segnale in Uscita: 1V massimo
- Accoppiamento: Corrente Continua o Corrente Alternata selezionabile (cc / ac)
- Banda Passante: cc – 20KHz
- Elevata Impedenza Ingresso per non caricare i circuiti sotto test.
- Alimentazione autonoma a batteria
- Indicazione di batteria scarica

parecchiature rispondenti alla specifica del cliente ma anche del mantenimento di tali specifiche nel tempo. Come accade in campo industriale, definiremo anzitutto le specifiche dell'apparato che vogliamo costruire, sceglieremo i componenti che riterremo più idonei e consolideremo lo schema elettrico, passando poi alla realizzazione vera e propria. Infine rivisiteremo criticamente il progetto chiedendoci conferma delle scelte effettuate, a beneficio dei futuri progetti. Lo schema comprenderà tutta una serie di accorgimenti comunemente usati per la protezione dei circuiti. L'adozione o meno di ciascuno di essi verrà decisa alla luce dell'ambito applicativo.

BACKGROUND: LA NECESSITÀ DI PROTEGGERE

Tutte le apparecchiature elettriche ed elettroniche sono soggette durante la loro vita ad esposizione a sovratensioni ed in qualche caso, sovracorrenti, ovvero a valori delle grandezze elettriche fondamentali superiori a quelle proprie richieste per il normale svolgimento delle proprie funzioni. Tali fenomeni sono spesso indipendenti dalla volontà del progettista e dell'utilizzatore, accadono in istanti spesso imprevedibili, con intensità non nota a priori e non sono sostanzialmente del tutto eliminabili, per quante precauzioni si possano prendere. Una progettazione poco attenta a tali fenomeni può peggiorare la situazione, rendendo le apparecchiature più sensibili ed esposte a danneggiamenti o sede di generazione di transitori nocivi. Un'attenta considerazione delle cause di questi fenomeni è importante per garantire l'affidabilità del nostro progetto, cioè garantire la sua disponibilità a svolgere le proprie funzioni correttamente nel tempo. Le perturbazioni elettriche più comuni sono sovratensioni, riconducibili a due origini, interna all'apparecchiatura o esterna, generata dall'ambiente. Vediamone un possibile elenco, pensando ad un caso generale.

Sovratensioni di origine interna all'apparecchiatura

- Transitori di alimentazione.
- Apertura/chiusura di circuiti induttivi
- Accoppiamenti capacitivi (sono tipicamente eliminati nella valutazione dei prototipi).

Su queste sorgenti di sovratensione abbiamo buone possibilità di intervento come progettisti, identificandole le sorgenti nel nostro circuito ed eliminando o riducendo a valori facilmente tollerabili gli effetti di ogni fenomeno. Come vedremo, l'aggiunta alla circuiteria interna di componenti che riducono l'ampiezza dei fenomeni indesiderati è la cura primaria adottata per i fenomeni di origine interna. Appartengono a questa classe di accorgimenti i diodi di ricircolo montati in parallelo alle bobine di relè che certamente avrete visto più volte.

I transitori di alimentazione e l'apertura/chiusura di circuiti fortemente capacitivi possono inoltre generare sovracorrenti da tenere in considerazione.

Sovratensioni di origine esterna all'apparecchiatura

- Sovratensioni sulle linee di alimentazione.
- Sovratensioni sulle linee di segnale.
- Sovratensioni indotte per accoppiamento Induttivo o Capacitivo.
- Scariche elettrostatiche dirette sui connettori di ingresso/uscita o alimentazione oppure sul contenitore dell'apparecchiatura.

L'origine di questi fenomeni può essere dovuta a fenomeni atmosferici anche lontani, guasti o transitori di manovra propagatisi lungo le linee di distribuzione dell'energia elettrica. Le scariche elettrostatiche (vedi riquadro dedicato) sono invece dovute a prossimità o contatto tra corpi a differente potenziale elettrico. Questo fenomeno può nascere quindi anche dal contatto con gli esseri umani utilizzatori dell'apparecchiatura, qualora siano accessibili connettori oppure attraverso pannelli o parti metalliche.

I singoli fenomeni sono sostanzialmente imprevedibili, dipendendo da fattori troppo diversi per poterne tenere conto. Nel caso di sovratensione propagata dalle linee di alimentazione, dipendono ad esempio dalla distanza dalla sorgente del fenomeno, nel caso di scariche elettrostatiche l'intensità dipende anche dall'umidità dell'aria, oltre che dalla natura dei corpi che divengono sede di cariche elettriche. Alcuni ambienti sono naturalmente predisposti alla generazione di transitori, si pensi alle automobili con la loro bobina di accensione.

L'industria e gli enti normativi internazionali hanno lavorato molto su questo problema, definendo per ogni ambito applicativo (telecomuncazioni, industriale, residenziale, automotive ad esempio), delle classi di severità ed impulsi tipici come descritto in REF1, REF 13 e REF 14. REF14 (Harris Application Note 9769) contiene anche ulteriori riferimenti ad utili Application Notes specifiche per campo di applicazione.

PER *approfondire...*

[REF1] Dispositivi di Protezione da Sovratensioni, Fare Elettronica Gennaio 2006

[REF 2] Le Sovratensioni di Rete, Fare Elettronica Maggio 2006

[REF 3] Analog Devices Application Note AN397 Electrically Induced Damage to Standard Linear Integrated Circuits.

[REF 4] Understanding and Protecting Integrated Circuits from Electrostatic Discharge (ESD), W.Freeman Analog Devices

[REF 5] ADI Reliability Handbook, Analog Devices

[REF 6] ESD Association, www.esda.org

[REF 7] Operational Amplifier for everyone, Book online Texas Instruments

[REF 8] National Semiconductor Application Note AN1511 Cable Discharge Event.

L'AMPLIFICATORE DI INGRESSO

Molti Amplificatori Operazionali sono adatti allo scopo, la mia scelta è caduta su un componente non particolarmente recente con cui ho dimestichezza, il CA3140. Originariamente prodotto da RCA Semiconductors è ancora oggi in produzione dopo trentanni. Questo componente è stato tra i primi operazionali con ingresso a MOSFET, con buone caratteristiche di velocità, basse correnti ed elevata impedenza di ingresso. Lo stadio di uscita realizzato con bipolari comprende una protezione integrata contro corto circuiti. Il CA3140 viene ancora utilizzato ad esempio per la realizzazione di strumentazione. Varie interessanti applicazioni sono riportate nel datasheet (vedi REF 9). Può essere sostituito TL081, con un certo degrado dell'impedenza di ingresso.

L'AMPLIFICATORE DI ISOLAMENTO

Inglesismo che andrebbe forse meglio tradotto con 'Amplificatore Isolato', indica un amplificatore con separazione galvanica totale, segnale ed alimentazione, tra stadio di ingresso e stadio di uscita. L'amplificatore di isolamento scelto è ISO124 originariamente prodotto da Burr-Brown, ditta specializzata in circuiti integrati analogici per trattamento e conversione di segnale. Oggi Burr-Brown è integrata in Texas Instruments ed ISO124 è facilmente reperibile anche per corrispondenza. ISO124 è un amplificatore a guadagno unitario che assicura una tensione di isolamento di 1500V efficaci tra ingresso ed uscita. Questo ci consente l'isolamento elettrico della circuiteria di ingresso del PC dal circuito sotto test, mettendo quindi la scheda audio e motherboard al riparo da quanto accade nel circuito del frontend e nel circuito in prova. La tenuta dell'isolamento è verificata con collaudo su tutti i pezzi prodotti. L'isolamento, per questioni di semplicità e costo, è realizzato da ISO124 trasmettendo il segnale digitalizzato attraverso una barriera capacitiva realizzata da due condensatori integrati nel package. I condensatori della barriera garantiscono l'isolamento galvanico tra ingresso ed uscita. L'informazione è trasmessa con una modulazione del duty cycle, tecnica simile al PWM usato nel controllo della velocità di motori in continua. Questa tecnica è più economica rispetto ad altre usate dalla stessa Burr-Brown in passato, quale l'isolamento attraverso un piccolo trasformatore incapsulato nello stesso package dell'amplificatore. Come messo in evidenza dal datasheet, nessun componente esterno è necessario, la linearità è molto buona e la banda passante garantita di 50KHz largamente sufficiente per soddisfare la nostra specifica. Ho scelto il componente in contenitore DIP16 per semplificare la realizzazione dello stampato. Bisogna notare come la tensione di isolamento può essere compromessa da un montaggio non corretto. Una superficie dello stampato non pulita può produrre percorsi debolmente conduttivi, sufficienti a degradare l'isolamento. Cosi come una non sufficiente separazione fisica della circuiteria di ingresso da quella di uscita. Il rame sotto il circuito integrato è quindi stato integralmente rimosso in corrispondenza della parte centrale del corpo DIL16. Non è del tutto corretto considerare l'amplificatore di isolamento come un puro componente di protezione, come a prima vista si potrebbe essere indotti a fare. Esso è inserito nel percorso principale di trasmissione del segnale ed un suo guasto renderebbe inservibile lo strumento. Bisogna poi ricordare che l'isolamento è garantito tra ingresso ed uscita , non tra ingresso e la propria massa. La sezione di ingresso di ISO124 contiene circuiti sensibili alle sovratensioni e va quindi adeguatamente protetta, mantenendo la tensione tra pin di ingresso e massa ingresso entro i valori massimi (10 V, vedi datasheet) e contando sulla barriera di isolamento come ultima difesa per evitare la propagazione del guasto ai circuiti seguenti. L'isolamento totale del segnale permette anche di interrompere i cosiddetti ground-loop. Il segnale in uscita da ISO124 contiene rumore residuo alla frequenza di 500KHz, dovuto alla modulazione. Essendo tale frequenza ben oltre la frequenza di taglio della nostra catena di misura (amplificatore più scheda audio), nessun filtro specifico è stato previsto, contando sul filtraggio integrato nella scheda audio (filtro anti-aliasing prima del convertitore Analogico-Digitale).

IL VOLTAGE CONVERTER

Il Voltage Converter LTC1044 è usato per la generazione delle tensioni negative, riducendo cosi il numero di batterie necessarie all'alimentazione del nostro circuito. LTC1044 è una versione migliorata di ICL7660, con cui resta compatibile e sostituibile, prodotto da varie Case. Ho preferito questo componente per la pre-

segue a pagina 58

[REF 9] Intersil CA3140 Datasheet

[REF 10] Texas Instruments ISO124 Datasheet

[REF 11] Linear Technology LTC1044 Datasheet

[REF 12] Application Note Texas Instruments sboa004 'SINGLE-SUPPLY OPERATION OF ISOLATION AMPLIFIERS'

[REF 13]Littelfuse 'EC 101 Chapter 1-Introduction to Circuit Protection'

http://en.littelfuse.cn/cgi-bin/r.cgi/en/know_content.html?ContentID=77&LFSESSION=IE6VHcc1Df

[REF 14] Harris Application Note AN9769, An overview of electromagnetic and Lightning induced voltage transient

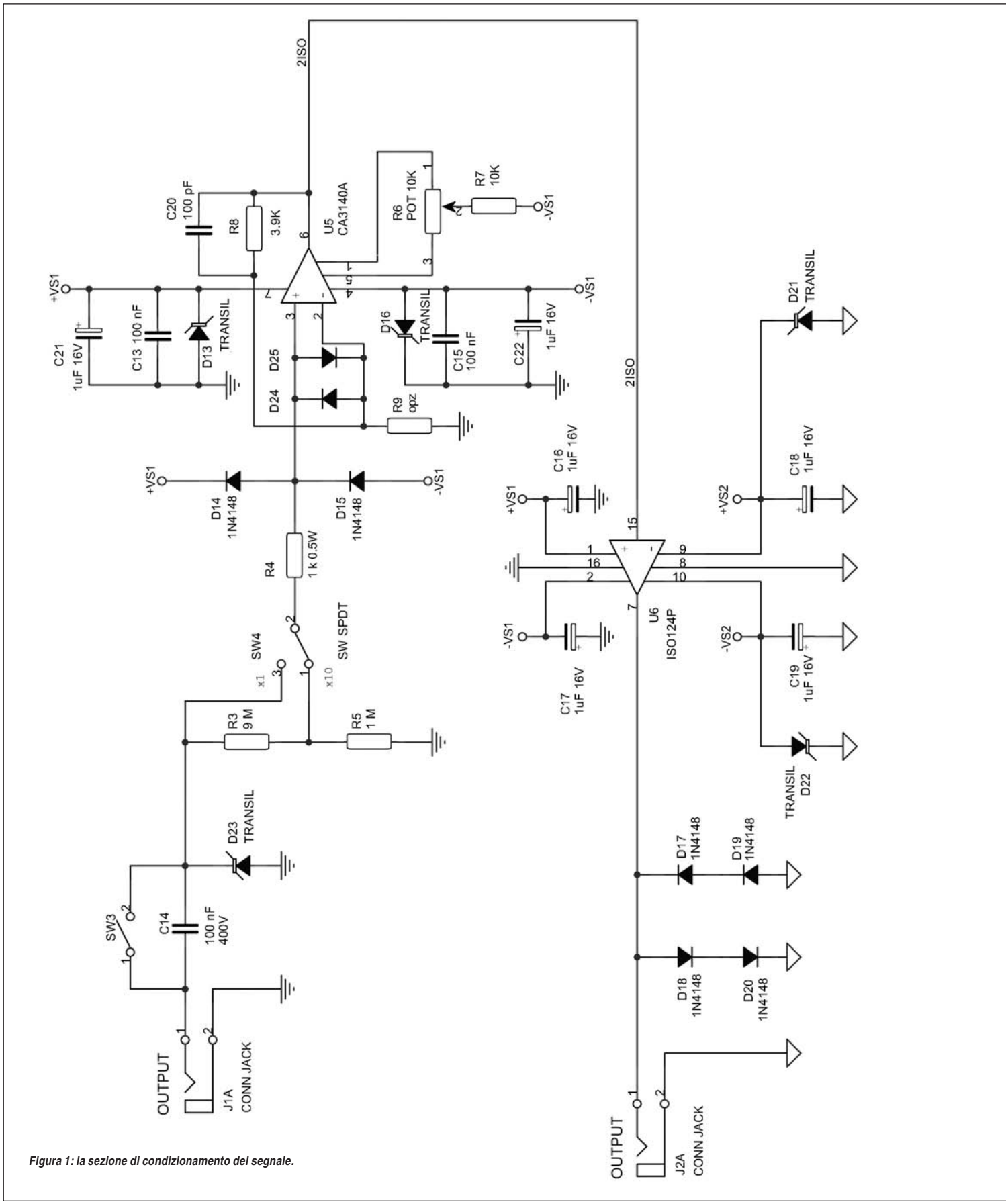


Figura 1: la sezione di condizionamento del segnale.

LISTA COMPONENTI

BT1,BT2	batterie 9V
C1,C2,C3,C7,C8,C9	Condensatori al Elettrolitici al Tantalio 10 uF 16V
C4,C10	Condensatori Elettrolitici 100 uF 25V
C5,C11	Condensatori Ceramici 330 nF 50V
C6,C12,C13,C15	Condensatori Ceramici 100 nF 50V
C14	Condensatore Poliestere 100 nF 400V
C16,C17,C18,C19,C21,C22	Condensatori Elettrolitici al Tantalio 1uF 16V
C20	Condensatore Ceramico 100 pF 50V
D1,D2,D5	1N4001
D4,D10	LED Rossi
D6,D12	Diodi zener 6.2V
D23	TRANSIL BZW06-5V8B
D13,D16,D21,D22	TRANSIL BZW06-6V4B
D14,D15,D17,D18,D19,D20	diodi 1N4148 (vedi testo)
D24,D25	diodi 1N4148
J1 CONN	JACK 3,5mm femmina da pannello
J2 CONN	JACK 6,3mm femmina da pannello
R1,R2	Resistori 5% 1/4W 120ohm
R3	Resistore 1% 1/2W 9 M
R4	Resistore 5% 1W 1 k
R5	Resistore 1% 1/2W 1 M
R6	Trimmer da cs 10K
R7	Resistore 5% 1/4W 10K
R8	Resistore 5% 1/4W 3.9K
R9	opzionale, vedi testo
SW1b,SW1a	Interruttore due vie - due posizioni
SW3	Interruttore una via - due posizioni
SW4	Deviatore una via due posizioni
U1,U3	circuito integrato LM7805-TO220
U2,U4	circuito integrato LTC1044
U5	circuito integrato CA3140A
U6	circuito integrato ISO124P

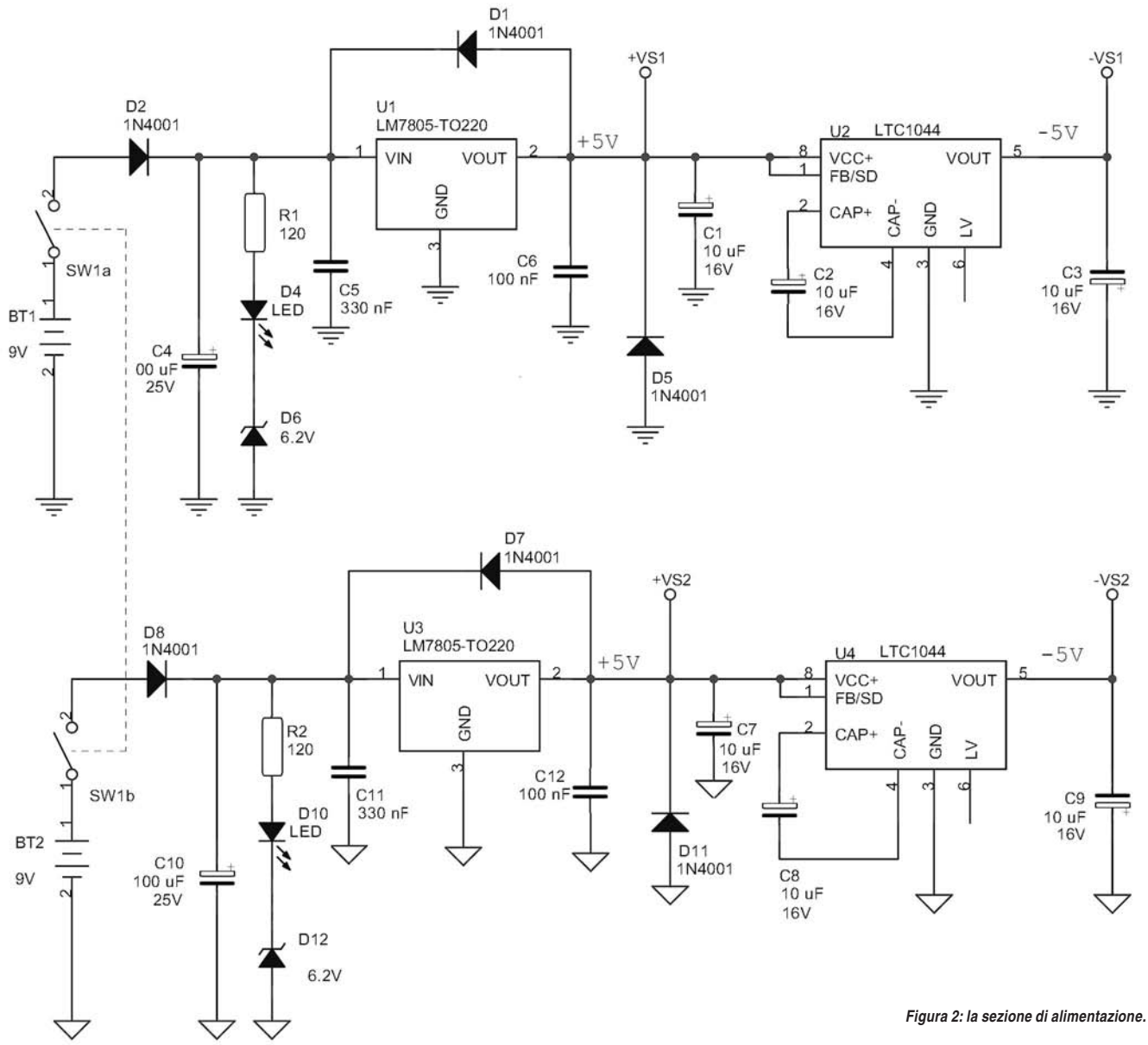


Figura 2: la sezione di alimentazione.

senza dell'opzione BOOST che elevando la frequenza di commutazione, evita di generare rumore direttamente in banda audio, cioè la gamma di frequenze di nostro interesse. LTC1044 utilizza il principio delle pompe di carica (vedi datasheet pag 5-12 e 5-13, REF11) per moltiplicare, dividere o invertire di polarità la tensione in ingresso. La tensione di uscita non è stabilizzata, quindi l'integrato è adatto dove occorra una compatta sorgente di tensione negativa per alimentare pochi carichi a basso consumo, quale appunto il nostro caso.

TRANSIL

I componenti TRANSIL sono già stati descritti sulla rivista, vedi REF1, e quindi non mi dilungo. Ricordo solo che possono essere grossolanamente considerati come veloci diodi zener con buone capacità di dissipazione per brevi periodi. Mi preme qui sottolineare che per costruzione questi componenti presentano una capacità non trascurabile (il componente usato in questo progetto, BZW04 5V8 ha capacità di 4nF). L'uso di questi componenti per la protezione delle linee di segnale va quindi studiata con attenzione per non compromettere l'integrità del segnale stesso. Nel nostro caso, viste le basse frequenze in gioco, l'effetto è modesto. E' interessante però notare come l'impedenza di ingresso sia ridotta a qualche centinaio di kiloohm ad 1KHz dai 10 Mohm nominali. Una famiglia equivalente è costituita dai Transzorb (nome registrato dal costruttore).

SCHEMA ELETTRICO

Iniziamo la descrizione dello schema partendo dal circuito alimentatore. Si è scelto per semplicità l'alimentazione duale, suggerita dall'uso dell'Amplificatore di Isolamento. E' possibile infatti utilizzare ISO124 con alimentazione singola ma a spese di una maggiore complessità circuitale (vedi Application Note REF 12). L'alimentazione è fornita da due pile 9 V ciascuna delle quali alimenta un regolatore LM7805 per ottenere la tensione di alimentazione positiva ed un LTC1044 in cascata per ottenere la tensione negativa. U1 ed U2 generano VS1 e –VS1, alimentazioni dell'amplificatore di ingresso. U3 ed U4 generano VS2 e –VS2 utilizzate per l'alimentazione isolata della sezione di uscita dell'Amplificatore di Isolamento U6. La durata prevista di batterie di buona qualità è circa dieci ore di funzionamento continuo. Notare che i due rami risultano elettricamente isolati e del tutto indipendenti. Nel caso non sia impiegato U6, tutta la circuiteria relativa ad U3 ed U4 può essere omessa dal montaggio. Ingresso (pin 15) ed uscita (pin7) andranno in tal caso cortocircuitati sul circuito stampato, come pure il pin 8 con la massa della circuiteria di U5. Descriviamo in dettaglio il ramo +/-VS1, tutti i commenti sono validi anche per il ramo gemello +/-VS2. Immediatamente a valle del doppio interruttore SW1/SW2, troviamo un diodo in serie che realizza la protezione contro accidentali inversioni di polarità. Una soluzione ancora migliore potrebbe essere l'inserimento di un ponte raddrizzatore, eliminando cosi la necessità di rispettare una polarità definita per le connessioni di alimentazione. Tale soluzione comporta però un costo leggermente maggiore ed un ulteriore aumento della caduta di tensione e potenza dissipata dalla nostra protezione. Segue il condensatore di filtro principale ed una spia di accensione con un semplice controllo della carica della batteria. Il LED si spegne quando la tensione di batteria scende sotto i 9 V. Abbiamo infatti che la tensione ai capi della resistenza R1/LED è uguale a VBAT meno la caduta sul diodo di protezione D2, meno la tensione di zener. Diminuendo progressivamente VBAT per la scarica della pila, la tensione residua diventerà insufficiente ad accendere il LED, segnalando cosi la necessità di procedere alla sostituzione delle pile quando segnalato. Il circuito con i componenti a schema è dimensionato per LED rossi con VF di 1.6 V nominali. Il circuito si può dimensionare ed adattare a LED di diverso colore (aventi normalmente diverse tensioni dirette) con l'equazione seguente:

VBAT-0,7V= 120*I + VF+Vzener

Dove:

VBAT va diminuita di 0.7 V per tenere conto della caduta su D2, ove usato.

La corrente I deve essere sufficiente a portare il diodo zener in zona attiva e ad accendere il LED in modo visibile. VF è la caduta di tensione del LED scelto polarizzato direttamente (diodo in conduzione). Nel prototipo il LED è completamente spento a tensioni poco inferiori ad 8 V con un I circa 8mA. R2, D10, D12 potrebbero essere omesse ipotizzando una sostituzione globale delle pile. Il diodo D1 protegge il regolatore U1 dalla corrente di scarica del carico capacitivo offrendo una via alternativa a bassa impedenza, impedendo che sovracorrenti siano iniettate nell'uscita del regolatore durante i transitori di spegnimento. I datasheet ne raccomandano l'uso nel caso di carichi fortemente capacitivi e tensioni maggiori di 6V. Montare il diodo nel nostro circuito non sarebbe quindi strettamente necessario ma previsto per eccesso di zelo. Il diodo D5 protegge l'alimentatore da inversioni di polarità sul carico. Viene inserito in alimentatori di uso generale. Non essendo il nostro caso, potrebbe essere tranquillamente omesso. U2 è connesso come invertitore di tensione con la funzione BOOST, già introdotta. Veniamo ora alla sezione di misura. Lavorando in banda audio viene comodo utilizzare come connettori di ingresso ed uscita segnale dei jack 3.5 mm e 6.3mm. Un jack femmina mono (o stereo con un solo segnale più massa utilizzati) è quindi impiegato come connettore di ingresso da pannello per ciascun canale. Immediatamente dopo il connettore troviamo Il condensatore C14 che realizza l'accoppiamento AC, escludendo la componente continua dal segnale di ingresso. SW3 chiuso permette di realizzare invece l'accoppiamento in CC, cortocircuitando il condensatore. Notare l'elevata tensione massima sopportata da C14 che riduce la possibilità di danni al componente in presenza di sovratensioni in ingresso. Essendo montato direttamente sul deviatore SW3, non viene infatti protetto dal Transil D23 posto come prima protezione all'ingresso del circuito stampato. Il Transil BZW06-5V8 è stato scelto nella sua famiglia di appartenenza avendo la tensione di intervento minore disponibile, 5.8V. E' possibile che la scheda audio del vostro PC abbia un condensatore in serie al segnale di ingresso, la banda passante in questo caso non raggiungerà la continua e l'eventuale componente continua del segnale di ingresso non sarà comunque riprodotta. C14/SW3 sono seguiti dal partitore di tensione a due posizioni, x1 o x10. In entrambi i casi l'impedenza nominale di ingresso vista dal circuito sotto

misura è 10 Mohm (vedi descrizione Transil). Troviamo poi la rete di protezione dell'amplificatore composta da R4, D14 e D15. R4 limita la corrente di guasto eventualmente iniettata nell'ingresso dell'Amplificatore Operazionale ed è sovradimensionata in potenza e quindi tensione massima sopportabile per poter resistere a fenomeni di sovratensione ripetuti nel tempo. Va calcolata per limitare la corrente dovuta a sovratensioni residue ad un massimo di 5mA. I diodi di clamp D14 e D15 entrano in conduzione quando le tensioni in ingresso sono più positive di +VS1 o più negative di –VS1, rispettivamente, proteggendo gli ingressi dell'Amplificatore Operazionale. Come spesso capita in elettronica, questo circuito è in realtà più critico di quanto sembri ad una prima occhiata. Pur usando per D14/D15 diodi veloci, i diodi di protezione integrati nell'ingresso dell'operazionale potrebbero entrare in conduzione per primi, sopportando inizialmente il maggior carico dell'over-stress elettrico. Per migliorare l'efficacia di D14/D15, e quindi far si che assorbano la maggior porzione di sovracorrente, è importante che l'induttanza associata alle loro connessioni sia la più piccola possibile. Le tracce di connessione ed i terminali dei diodi saranno quindi mantenuti più corti possibile. Componenti a montaggio superficiale offrirebbero un vantaggio intrinseco in questa applicazione. Le correnti di perdita (leakage) dei diodi si aggiunge poi alla corrente degli ingressi dell'Amplificatore (piccola ma non nulla), contribuendo ad un errore di offset. L'errore può essere diverso in funzione dell'attenuazione attiva, impedendo di compensarlo con una taratura. Inizialmente si erano sperimentati diodi schottky tra i più facilmente reperibili, BAT85. La minore soglia dei diodi schottky rispetto ai diodi al silicio integrati, aiuterebbe a garantire che entrino in conduzione in anticipo rispetto ai veloci ma poco capaci in corrente, diodi interni. L'elevato offset dovuto all'importante corrente di leakage ne ha provocato la sostituzione con veloci diodi da commutazione, i classici 1N4148. Un'attenta ricerca di diodi schottky o tradizionali con basse correnti di leakage può quindi essere opportuna, qualora si voglia buona precisione in tensione continua. Anche nel caso la propria scheda audio sia accoppiata in alternata, è opportuno rendere minimo l'offset, per far lavorare nelle migliori condizioni l'Amplificatore Operazionale. I diodi D24 e D25 provvedono invece alla protezione degli ingressi dell'OpAmp da eccessive tensioni differenziali, impedendo differenze maggiori della loro tensione di caduta diretta,

circa 0.7V. Anche se siamo giustamente abituati a considerare nulla la differenza di tensione tra gli ingressi, tale condizione è in realtà soddisfatta solo dall'Amplificatore Operazionale ideale. Nella realtà in generale non sarà cosi e può essere opportuno limitare la tensione, considerando che la massima tensione sopportabile tra i pin 2-3 dal CA3140 è, da datasheet, 8 V. In questo caso la scelta dei componenti è meno critica. L'amplificatore Operazionale U5 realizza la funzione amplificatore/adattatore di impedenza chiave dell'applicazione. Per presentare un'elevata impedenza di ingresso, evitando di caricare il circuito sotto misura, si è scelta la configurazione non invertente. Quando si desideri amplificazione unitaria, U5 è connesso come inseguitore omettendo R9 e sostituendo R8 con un cortocircuito. Diversamente R8 ed R9 stabiliscono il guadagno con la solita formula:

A = 1 + R8 / R9

La resistenza R8 può essere mantenuta anche nella configurazione a guadagno unitario, come suggerito dal datasheet. La sua funzione consiste nel limitare la propagazione di eventuali sovratensioni ai circuiti interni con rischio di auto oscillazione o saturazione. Il condensatore C20 limita superiormente la banda di funzionamento del circuito. U5 prevede la possibilità di azzeramento dell'offset di ingresso, utilizzata in sede di collaudo e taratura. I condensatori C13/C21 e C15/C22 realizzano il bypass delle alimentazioni. Gli elettrolitici assicurano bassa impedenza dell'alimentazione nelle basse frequenze, i ceramici offrono bassa impedenza alle frequenze medie, prevenendo oscillazioni spurie dei veloci circuiti interni all'OPAMP [vedi REF7]. Occorre sempre ricordare che i transistori interni ai circuiti integrati possono avere frequenze di taglio di centinaia di megahertz, anche se il nostro circuito applicativo è progettato per lavorare a frequenze audio. I diodi Transil D13 e D16 realizzano la protezione dell'amplificatore da Electrical Over Stress, per usare la nomenclatura anglosassone, provenienti dall'alimentazione. La loro soglia di intervento dei componenti scelti BZW06-6V4 è circa 6,4 V, ben all'interno dei limiti massimi di tensione sopportata dall'operazionale ed abbastanza vicino al valore massimo di alimentazione presente nel circuito. Questa protezione è importante in applicazioni con alimentazione da rete, realizzando una rete di protezione a livelli multipli e coordinati con le protezioni previste sugli ingressi degli alimentatori. Lo scopo è tagliare le sovratensioni residue, sempre presenti perché nessuna protezione ha un comportamento ideale. Nel nostro caso di alimentazione a batteria, la sua presenza è una precauzione utile soprattutto verso ESD, si pensi ad esempio alla fase di sostituzione pile. Quando si desidera l'isolamento galvanico tra ingresso ed uscita, U6 è montato con sola funzione di separazione elettrica a guadagno unitario. Il filtraggio dell'alimentazione è realizzato in modo semplice ma aderente ai suggerimenti del costruttore. Il circuito di ingresso di U6 non ha protezioni dedicate in quanto inserito a valle del frontend vero e proprio, CA3140 che ha invece gli ingressi esposti verso l'esterno adeguatamente protetti. I diodi D18…20 limitano la tensione di cresta del segnale in uscita a circa 1.5V picco-picco, restando entro i limiti consigliati per il massimo segnale di ingresso delle moderne schede audio dei PC (tipicamente 1 V efficace). Questo impedisce la propagazione di eventuali segnali di livello eccessivo applicati all'ingresso del frontend, ad esempio a causa di una non corretta scelta dell'attenuazione. Come connettori di uscita si sono nuovamente usati dei jack femmina da pannello, in questo caso un jack stereo da 6.3mm. La connessione con l'ingresso della scheda audio PC può essere fatta con un corto cavo schermato intestato con connettori jack volanti maschi. Si raccomanda di non superare la lunghezza di 60 cm per non rischiare di in-

ESD

Elettro Static Discharge

L'accumulo di cariche elettriche statiche per strofinio è stato, insieme al fulmine, il primo fenomeno elettrico ad essere conosciuto dal Genere Umano. Tutti noi ne sperimentiamo gli effetti quando 'prendiamo la scossa' ad esempio inserendo la chiave nella serratura dell'auto in un giorno secco o ventoso. Questo è precisamente una manifestazione del fenomeno noto come ESD, Electro Static Discharge. Un accumulo di carica statica comporta l'instaurarsi di un potenziale elettrico (tensione). Il contatto o una ridotta distanza tra due corpi con potenziali diversi provoca un brusco passaggio di cariche elettriche (scarica) che riequilibra i potenziali reciproci. Non essendoci un generatore in grado di sostenere il fenomeno, ed essendo quindi limitate le energie in gioco, i transitori sono molto rapidi e si esauriscono in tempi molto brevi. Le tensioni generate dall'accumulo di carica possono facilmente raggiungere parecchi kilovolt (250 V fino a 15KV secondo REF[4]). Il fenomeno di scarica (ESD) può quindi creare danni in strutture sensibili, quali i circuiti integrati, danneggiando gli isolamenti o provocando la circolazione di correnti eccessive con fusioni totali o parziali delle strutture microscopiche. Le ESD possono avere effetti distruttivi palesi, interrompendo il funzionamento di un circuito integrato. Il loro effetto può spesso essere subdolo, provocando micro - danneggiamenti che possono evolvere in guasto in seguito a ripetuti episodi o instaurare un degrado delle prestazioni, pur non compromettendo immediatamente in modo evidente, il funzionamento dell'apparato in cui il componente è inserito. Tipico caso è l'aumento delle correnti di leakage in ingressi di Amplificatori di segnale a basso livello. Per questa ragione anche esperti professionisti possono essere portati a sottovalutare il fenomeno, dopotutto è difficile imputare un malfunzionamento o un guasto ad ESD senza applicare raffinate tecniche di analisi. I documenti REF [3] e REF [5] riportano interessanti fotografie dei danni prodotti a strutture di circuiti integrati da ESD e sovratensioni. L'intensità e frequenza dei fenomeni ESD dipende dalle caratteristiche dei materiali interessati, dalle condizioni di pulizia delle superfici coinvolte, dall'umidità ambientale. I fenomeni ESD sono quindi difficili da classificare a priori. Esiste la necessità di avere dati di riferimento per dimensionare correttamente le protezioni e progettare le idonee apparecchiature di prova. Le normative internazionali hanno cercato a tal scopo di classificare le più

frequenti condizioni causanti ESD, che un componente può incontrare nel processo di fabbricazione o nell'uso in servizio, definendone un modello.
Le espressioni Human Body Model (HBM), Machine Model (MM), Charged Device Model (CDM) identificano I tre modelli attualmente definiti ed usati come riferimento dall'industria manifatturiera elettronica e dai costruttori di semiconduttori, in particolare (per maggiori dettagli sulle normative vedere REF [6]) . Il modello HBM si riferisce alla situazione descritta in apertura, un contatto dovuto ad un essere umano. Questa è probabilmente la più frequente sorgente di ESD anche in servizio per apparecchiature quali elettrodomestici, personal computer, strumentazione. Il modello MM cerca di descrivere ESD generate nel funzionamento di macchine, quali accumuli di cariche dovute a parti in movimento, è stato proposto estrapolando il caso peggiore per HBM. Anche questo caso potrebbe ripresentarsi in servizio se classifichiamo qui la connessione di cavi, magari trascinati sul pavimento o superfici isolanti. Un'interessante analisi della scarica elettrostatica dovuta a cavi è contenuta in REF [8]. Il modello CDM simula i fenomeni ESD dovuti al contatto di uno o più pin di circuito integrato, elettricamente carichi con una superficie conduttiva a potenziale diverso (tipicamente massa), Questa situazione si può verificare soprattutto durante le fasi finali della produzione del circuito integrato e durante l'assemblaggio su schede, più difficilmente in campo una volta che l'applicazione sia stata costruita. Per ciascuno dei modelli è stato definito un circuito equivalente ed una forma d'onda tipica, come ben riportato in REF [4]. Procedure e precauzioni di manipolazione vengono caldamente raccomandate dai costruttori di dispositivi. Essi integrano anche protezioni apposite nella circuiteria degli Input/Output dei circuiti integrati e semiconduttori in genere. Purtroppo, l'intensità dei fenomeni incontrata dalle apparecchiature elettroniche è ben maggiore di quanto si riscontri nel controllato ambiente manifatturiero. I livelli di tensione massima delle specifiche a livello componente sono spesso simili ai livelli richiesti dalle normative a livello sistema (applicazione). Quello che cambia è il valore di picco della corrente di scarica che l'apparecchiatura è chiamata a sopportare in servizio. Non essendo possibile garantire che i nostri apparati siano esenti da ESD durante la loro vita operativa, è necessario quindi prevedere le opportune protezioni supplementari in fase di progetto, in modo da assistere ed alleviare l'eventuale intervento delle protezioni integrate. Essenzialmente tre sono le strategie di base possibili, combinabili in varie configurazioni:
1)Scegliere componenti con buone protezioni integrate per le funzioni di Input/output. E' ad esempio il caso dei driver/receiver per linee di comunicazione RS232, CAN, USB etc dove si trovano componenti capaci di resistere a picchi di tensione molto più elevati degli standard 2KV. Non è infrequente trovare componenti garantiti per 15KV.
2)Protezione con elemento in parallelo. L'elemento non lineare in parallelo al circuito da proteggere, limitata l'ampiezza in tensione delle sovratensioni generate da ESD, offrendo un percorso a bassa impedenza verso massa per le tensioni elevate. Il picco di corrente generato dal guasto fluisce attraverso la protezione e non attraverso il circuito funzionale. Questa è la funzione svolta nel nostro Frontend da Transil e Transzorb.
3)Protezione con elemento in serie, destinato a limitare la corrente massima circolante in seguito al fenomeno. Si riconoscerà qui la funzione di R4
E' infine interessante notare che la circolazione di correnti impulsive con elevato contenuto di armoniche in alta frequenza, tipico dei fenomeni ESD, può indurre problemi di immunità elettromagnetica nei circuiti vittime del fenomeno.
Questo aspetto collaterale, meglio indirizzato in testi riguardanti la Compatibilità Elettromagnetica, contribuisce a ridurre la robustezza del nostro progetto ed offre ulteriori ragioni per prendere sul serio la mnaccia ESD.

trodurre problemi di stabilità per l'amplificatore di uscita dovuti al pilotaggio di elevati carichi capacitivi.

COLLAUDO

Il circuito è alloggiato in un contenitore Teko mod 104, in plastica facilmente lavorabile, con pannello metallico. Il pannello è stato forato, sono state realizzate le scritte con lettere trasferibili e poi protetto con smalto sintetico spray acquistato in un grande magazzino per bricolage. Sono stati montati tutti gli interruttori e deviatori facendo molta attenzione a non graffiare la superficie trattata. I cablaggi verso i connettori di ingresso ed uscita e verso i deviatori sono stati realizzati con spezzoni di cavo schermato. Le calze sono state saldate solo lato circuito stampato per evitare ground –loops. Assicurarsi che la calza del cavetto che collega il jack di ingresso con C14/SW3 sia connessa alla calza del cavetto che porta il segnale all'ingresso del circuito stampato. Le batterie sono state fissate al fondo del contenitore con nastro biadesivo, anche se sono disponibili in commercio clips per una più elegante soluzione di montaggio. Come si può vedere dalle fotografie, vi sono alcuni comandi e connettori di uscita aggiuntivi non ancora descritti. Nello stesso contenitore ho, infatti, montato un piccolo generatore di onde sinusoidali ed una sorgente DC calibrati. Essendo questi kit commerciali non sono descritti nel presente articolo. L'insieme Amplificatore più generatore di segnali costituisce un'elementare stazione di collaudo realizzata in poco spazio. Le sonde per prelevare i segnali dal circuito sotto misura potrebbero essere realizzate con un puntale da tester, con corto collegamento di massa munito di coccodrillo ed uno spezzone di cavetto schermato terminante con un jack maschio volante da inserire nel connettore di ingresso del nostro Frontend.Prepariamo il cavo di connessione dall'uscita al PC, usando uno spezzone di cavo schermato intestati con jack stereo 6,3 mm in partenza e jack stereo 3,5 mm in arrivo. Prepariamo anche un cavo jack stereo 3,5 mm - jack mono 3,5 mm per la connessione dell'ingresso del Frontend in fase di collaudo. L'unico strumento che supporremo disponibile per procedere al collaudo è un economico multimetro digitale (tester), oltre naturalmente al PC completo del programma oscilloscopio di vostra scelta. Per quanto mi riguarda, la scelta è caduta sull'ottimo programma Virtual Analyzer, già varie volte presentato con buon

dettaglio sulla rivista. Questo programma ha il vantaggio di possedere una funzione generatore di segnale che ben si presta a pilotare l'ingresso del nostro Frontend durante il collaudo. Il collaudo inizia prima di montare gli amplificatori U5 ed U6 su entrambi i canali di misura. Usando il tester come ohmetro nella portata più bassa disponibile, assicuriamoci che non vi siano cortocircuiti tra l'ingresso alimentazione e massa, quindi tra anodo di D2 e D8 verso massa, se montati i diodi anti-inversione polarità, o tra i capi di C4 e C10. Assicuriamoci anche che non vi siano cortocircuiti tra ciascun polo delle quattro alimentazioni (+VS1, -VS1, +VS2, -VS2) e tutti gli altri, tra ciascun polo e massa e tra le due masse isolate. Inseriamo una spina jack in cortocircuito nei connettori J1, commutiamo SW4 in posizione attenuazione x1 e SW3 in posizione 'DC' (SW3 chiuso). Colleghiamo BT1 e BT2, verifichiamo la corretta accensione dei LED D4 e D10. Usando il tester come voltmetro DC verifichiamo le tensioni di alimentazione:

VS1, VS2 +5V +/-5%

-VS1, -VS2 -5V +/-5%

Verifichiamo ora presenza e valore della tensione di alimentazione di U5 ai pin 4 e 7 e la tensione di uscita al pin 6 (attesi 0 V). Possiamo ora spegnere l'alimentazione ed assemblare gli amplificatori U5. Usando il tester come Voltmetro AC, verifichiamo che non vi siano tensioni alternate indice di auto oscillazioni sui pin 6 U5. Riportiamo il tester in DC e, sempre mantenendo la spina di corto circuito, regoliamo R6, per ridurre a zero la tensione continua di uscita di U5. Annulliamo in questo modo l'offset introdotto da sbilanciamenti dello stadio di ingresso dell'operazionale. Verifichiamo che l'uscita non cambi significativamente portando SW4 in posizione x10. Verifichiamo ora le tensioni di alimentazione di U6 ai pin 1,9 e 2, 10. Se tutto è a posto, spegniamo il circuito, montiamo U6 e misuriamo le sue tensioni di uscita in DC ed AC. Non avendo U6 regolazioni di offset, eventuali tensioni continue resteranno come errore sistematico del nostro canale di misura.Non dovremmo misurare apprezzabili tensioni AC.

Rimuoviamo la spina di corto circuito e misuriamo la tensione di uscita per accertarci che non vi siano tensioni maggiori di 1,5 V circa, DC o ac. Se tutto è a posto, dovremmo misurare solo una tensione di rumore di qualche millivolt. Ora che siamo certi dell'assenza di tensioni indesiderate e potenzialmente pericolose sull'uscita, possiamo collegare per la prima volta il nostro Frontend all'ingresso della scheda audio del Personal Computer / Oscilloscopio. Verifichiamo con il tester l'assenza di cortocircuiti sui cavi tra segnale - massa e segnale - segnale. Verifichiamo con il tester predisposto come voltmetro ac la presenza del segnale sul contatto jack corrispondente al segnale di ingresso, vedi configurazione del programma nel seguito. Visual Analyzer non ha una calibrazione permanente, misurando quindi il segnale in uscita con il voltmetro potremo quindi stabilire un rapporto tra le letture dell'oscilloscopio ed i livelli di segnale in ingresso, tenendo presente che stiamo lavorando con Amplificazione unitaria. Raccomando di scegliere per questa misura una frequenza del segnale generato all'interno della gamma di frequenza del multimetro, solitamente piuttosto limitata, 1KHz è un buon valore di riferimento. Il jack 3.5 del cavo di uscita del Frontend, va collegato alla presa jack azzurra (AUX) della scheda audio. Lanciamo il programma Visual Analyzer. Suggerisco di impratichirsi nell'uso dell'oscilloscopio e del generatore di funzioni (wave) selezionando come ingresso (barra menu, ultima voce a destra) la voce'mixer stereo'.

Senza alcun bisogno di connessioni esterne, questa configurazione permette di vedere subito l'effetto delle modifiche apportate a livelli, frequenze e base dei tempi.

Notare che nel caso vengano dubbi circa la generazione dei segnali in uscita, sarà semplice sincerarsi della loro presenza collegando le casse ed ascoltando i toni generati. Una volta a proprio agio, riverificheremo di nuovo la qualità del segnale visualizzato in condizioni di ingresso in corto circuito. L'ampiezza della fascia di rumore ci consente di valutare il rumore intrinseco del nostro canale di misura (amplificatore, cavi, convertitore della scheda audio). E' anche utile osservare la traccia con l'ingresso aperto.

Colleghiamo il cavo jack 3.5-jack3.5 all'uscita altoparlante del PC.

Questo sarà il nostro generatore di funzioni con cui valutare le prestazioni del Frontend sotto test. Impostiamo l'oscilloscopio:

- Selezioniamo sulla barra menù a destra 'Linea Ingresso'.
- Trigger ON, slope positiva.
- Asse x, 0.97ms/div (vedremo cosi circa un periodo a quadretto del segnale ad 1KHz.).
- Tutti i filtri disabilitati (default).

Abilitiamo l'Oscilloscopio con un click su 'ON', barra menù a sinistra.

Impostiamo poi il generatore, barra menù 'wave':

- Frequenza 1000 (Hz).
- Wave Function SINE.
- Livello di uscita circa 100mV (40% in questo caso).
- Enable.

Accendiamo il Frontend e facciamo un click sul pulsante 'ON' del pannello wave. Ora se tutto è a posto dovremmo vedere nella finestra Oscilloscopio la sinusoide ad 1 kHz in uscita dal nostro Frontend. Non si dovrebbero notare distorsioni apprezzabili della sinusoide e la traccia dovrebbe essere pulita, senza rumore sovrapposto. Possiamo ora commutare il partitore di ingresso in posizione x10 verificando l'attenuazione del segnale di ingresso. Verificheremo poi che il deviatore ac/dc non introduca variazioni apprezzabili del nostro segnale alternato, privo di componente continua. Possiamo ora misurare la banda passante del nostro Frontend. Ritorniamo al menù 'Wave' e scegliamo Wave Function Sweep. Osserviamo la finestra Spectrum Analyzer, vedremo una riga spostarsi da sinistra verso destra, inizialmente di ampiezza costante e poi decrescente. Il generatore di funzione genera, infatti, una frequenza singola, da cui la riga nello spettro, frequenza progressivamente crescente. Applicheremo la definizione di larghezza di banda, leggendo il valore in decibel sulla scala Y dello Spectrum Analyzer e cercando il punto sull'asse X per cui l'ampiezza è diminuita di 3 dB. La frequenza corrispondente è al limite superiore della banda passante. Possiamo anche servirci di un cursore posizionato 3dB sotto l'ampiezza a bassa frequenza. Nel prototipo la banda passante è risultata circa 16KHz, un po' inferiore a quanto atteso ed alla specifica desiderata ma sufficiente per gli scopi prefissi. Questa è in realtà la banda passante complessiva del canale di misura considerato, Generatore – Fron-

tend – Ingresso scheda audio. Senza strumentazione esterna più sofisticata, non abbiamo modo di raffinare la nostra indagine e verificare quale sia il fattore limitante.

USO DELLO STRUMENTO

L'uso dello strumento è molto semplice ma sono opportuni alcuni accorgimenti operativi. Le connessioni tra Frontend e PC andrebbero effettuate preferibilmente con entrambe le apparecchiature spente. Prima di toccare cavi e Frontend suggerisco di premere il palmo della mano contro il contenitore metallico del PC. In un moderno impianto elettrico, infatti, e comunque in un impianto eseguito a norma, il conduttore di terra mette a massa tutte le carcasse metalliche delle apparecchiature collegate alla rete. In questo modo scarichiamo l'energia statica accumulata su di noi e preveniamo, almeno per qualche tempo, la generazione di fenomeni ESD. Il jack 3.5 del cavo di uscita va collegato alla presa jack azzurra (AUX). Questo permette di evitare trattamenti del segnale e/o filtraggi non graditi nell'applicazione di cui ci stiamo occupando. Siamo, infatti, interessati a vedere nel modo più fedele possibile il segnale presentato all'ingresso. L'amplificatore dovrebbe essere inizialmente predisposto con attenuatore x10 e SW3 aperto (ac). Partiamo quindi dalla condizione di attenuazione massima e ci portiamo in seguito nelle condizioni operative più idonee ad osservare il segnale sotto esame. Evitiamo in questo modo il rischio di esporre ad elevati potenziali gli stadi di ingresso del nostro strumento. Analogamente, quando utilizziamo strumenti di misura su segnali non ben conosciuti, partiamo dalla portata più elevata aumentando gradualmente la sensibilità. Trattandosi di un amplificatore di tensione, lo strumento andrà connesso in parallelo ai circuiti da ispezionare, la sua sonda di ingresso va usata come la sonda di un voltmetro o di oscilloscopio.

CONCLUSIONI

Abbiamo definito uno schema con tutte le protezioni e lo abbiamo poi ridotto ad un ragionevole minimo, ragionando sul contesto in cui lo strumento è destinato ad operare. Abbiamo svolto, nel nostro piccolo, la ricerca del compromesso costo-prestazioni, preoccupazione costante di ogni progettista. Abbiamo anche introdotto precauzioni d'uso per evitare fenomeni ESD, molto importanti per coadiuvare le protezioni aggiunte al circuito. Spero abbiate trovato interessante la descrizione completa della costruzione di un piccolo ma utile strumento per un laboratorio casalingo in miniatura. ❑

CODICE MIP 500167