

Il Progetto Switchinglow prima parte

In elettronica per progettare e costruire un amplificatore audio abbiamo a disposizione due famiglie di dispositivi attivi - i tubi a vuoto ed i semiconduttori allo stato solido - che possiamo combinare in due famiglie di topologie circuitali - lineare ed a commutazione (switching) - ottenendo quattro combinazioni differenti. Di queste, tre sono ben note: lineare a valvole, lineare a semiconduttori e switching a semiconduttori.

La quarta combinazione, switching a valvole, sarà oggetto di questa serie di articoli sul "Progetto Switchinglow", con la speranza di offrire ai nostri lettori un argomento inusuale che riteniamo abbia tutte le caratteristiche per meritare di essere scoperto, sperimentato ed approfondito.

ALCUNE DOVEROSE PREMESSE

Conviene elencare subito i punti critici di questo progetto così che il lettore abbia modo di valutare in anticipo la sfida che stiamo per proporre.

Anzitutto un amplificatore in classe D valvolare non potrà mai avere l'efficienza energetica del suo omologo allo stato solido. Va poi evidenziato che come

qualsiasi altro circuito switching di potenza, anche questo per quanto concerne i disturbi irradiati e condotti, costituisce un impegno per la compatibilità elettromagnetica.

Osserviamo anche che, come per tutti i classe D, gran parte della qualità complessiva dipende dallo stadio modulatore.

Ed infine sottolineiamo che nulla abbiamo più a che fare con il dominio analogico tanto caro a chi apprezza le classi lineari: qui siamo dichiaratamente agli antipodi, qui le valvole funzionano in due stati estremi.

Quindi perché cimentarsi nello studio e realizzazione di amplificatori così potenzialmente insidiosi?

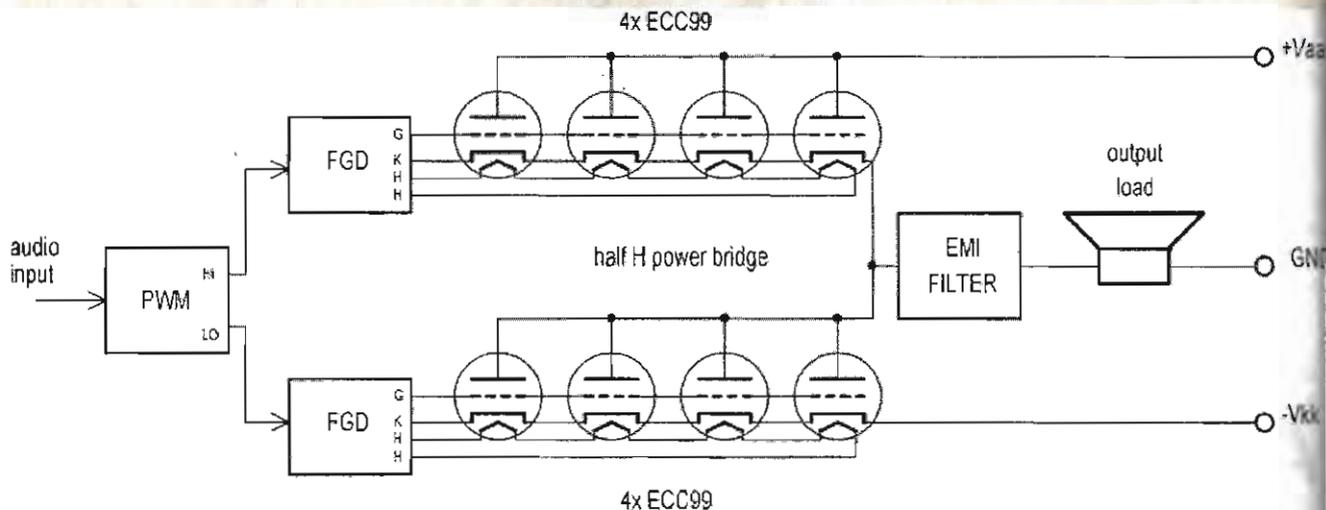
La risposta è duplice: intanto siamo audiofili e quindi desideriamo

capire che caratteristiche percettive emozionali si possono ottenere.

Poi perché siamo autocostruttori e, senza troppa complicazione di mezzi, desideriamo avventurarci con le nostre sperimentazioni in un territorio inesplorato che fa intravedere grandi spazi di manovra per chi, come i nostri lettori, vuole mettere alla prova la propria creatività.

In questo senso il Progetto Switchinglow non è un kit da scatola di montaggio per la realizzazione di un prodotto finito da tenere in salotto, ma è piuttosto una piattaforma di sviluppo a più gradi di libertà, che ognuno potrà modificare a propria scelta, ricercando performance, soluzioni e qualità finale di ascolto secondo la propria competenza e sensibilità.

fig.1 - Schema a blocchi di un amplificatore in classe D valvolare in configurazione a mezzo ponte con alimentazione duale.



Il Progetto Switchinglow non è un punto di arrivo bensì un punto di partenza curioso ed intrigante che speriamo possa servire per sviluppare esperienza e novità ulteriore per gli anni a venire. Gli amplificatori in classe D progettati e costruiti seguendo le indicazioni del Progetto Switchin-

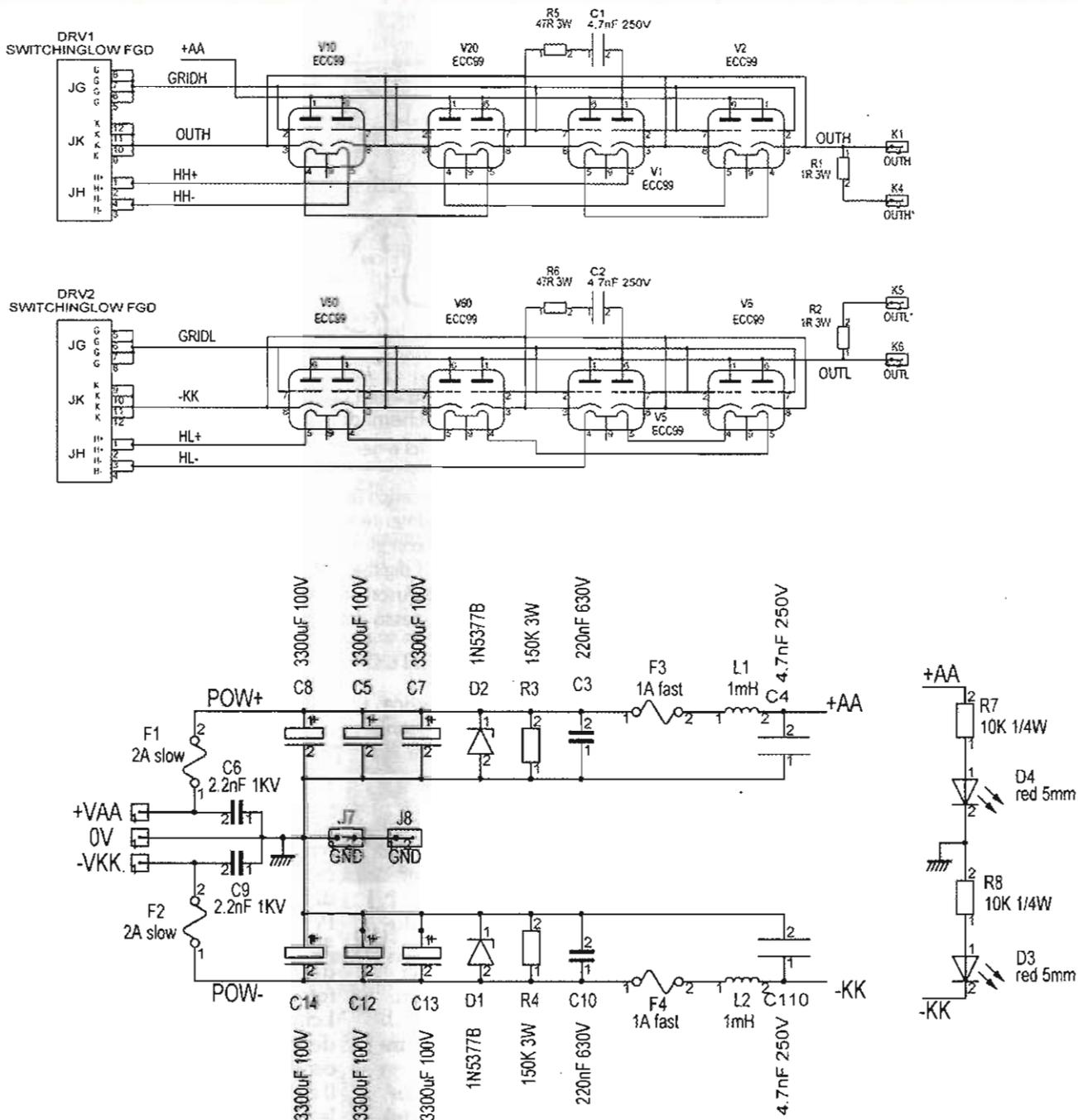
glow sono comunque dei veri amplificatori valvolari, perché l'energia elettrica prodotta dall'alimentatore viene applicata al diffusore per tramite della conduzione degli elettroni nel vuoto della valvola, ma sono anche dei veri amplificatori digitali perché la medesima energia viene appli-

cata ad impulsi, invece che in modo continuo come negli amplificatori lineari.

SCHEMA A BLOCCHI

Iniziamo ad elencare gli elementi che compongono un amplificatore in classe D valvolare. Come dallo schema a blocchi di

fig.2 - Schema elettrico del mezzo ponte con doppi triodi ECC99. I rami superiore ed inferiore sono realizzati su due distinti circuiti stampati ognuno comprendente il rispettivo bus di alimentazione Vaa o negativa Vkk. L1 ed L2 sono Murata 1410524C. I circuiti FGD sono moduli separati che vanno sovrapposti ai c.s. del ponte e sono alimentati direttamente dai loro trasformatori come sarà descritto nella prossima puntata.



RIQUADRO #1

Gli amplificatori in Classe D

In un amplificatore lineare i dispositivi attivi di potenza applicano al carico utilizzatore l'energia elettrica fornita dall'alimentatore facendola variare nel tempo con continuità.

In un amplificatore in classe D i dispositivi di potenza funzionano da interruttori e l'energia è applicata ad impulsi.

Se la frequenza di azionamento di questi interruttori è sufficientemente elevata, almeno una decina di volte la massima frequenza del segnale che si vuole amplificare, sarà il carico utilizzatore a ricostruire il segnale amplificato.

Infatti il sistema formato da bobina mobile e membrana di un altoparlante non è in grado di muoversi alla velocità degli impulsi ma piuttosto integra l'energia media dei medesimi agendo da filtro passa basso. L'informazione sonora ricostruita dal movimento della membrana dipende quindi dal "ciclo utile" (duty cycle) degli impulsi, che è l'unica grandezza variabile ad essi associata, se poniamo come vincolo il fatto che gli impulsi assumano solo due valori di ampiezza. Quanto descritto è la cosiddetta "modulazione di durata degli impulsi" (PWM - Pulse Width Modulation).

Gli schemi elettrici di base sono quelli qui raffigurati, e sono detti a ponte ad H oppure a mezzo ponte ad H. Questi sono schemi di principio che permettono di far scorrere una corrente bipolare nel carico utilizzatore e sono utilizzati non solo negli amplificatori in classe D ma anche negli azionamenti dei motori elettrici e nei circuiti di conversione dell'energia elettrica denominati "inverter".

Poiché l'applicazione dell'energia fornita dall'alimentatore viene applicata al carico facendo assumere ai dispositivi di potenza solo due stati estremi, qualsiasi amplificatore in classe D si presta naturalmente ad avere un ingresso puramente numerico. Questo è interessante per chi è appassionato di musica liquida: infatti con gli amplificatori in classe D è possibile ottenere una catena di riproduzione del suono rimanendo sempre nel dominio digitale, con la conversione in onde acustiche ascoltabili dal nostro orecchio che avviene teoricamente direttamente nel diffusore, praticamente un attimo prima, più propriamente nel filtro EMI. In questo senso gli amplificatori in classe D sono spesso definiti "power DAC", ovvero convertitori digitali-analogici di potenza.

fig.1, abbiamo bisogno di un circuito a ponte ad H.

Per non moltiplicare il numero delle parti necessarie, ci limitiamo ad un mezzo ponte con alimentazione duale.

I rami del ponte sono costituiti dai dispositivi di commutazione di potenza, nel nostro caso triodi che verranno fatti funzionare come interruttori elettronici, applicandovi un opportuno pilotaggio PWM sulle griglie.

Per non dover affrontare costi esorbitanti e per poter contare su valvole attualmente in produzione, abbiamo deciso di utilizzare i doppi triodi ECC99.

Per ottenere una corrente anodica relativamente elevata con tensioni di alimentazione relativamente modeste, il Progetto impiega quattro doppi triodi collegati in parallelo in entrambi i rami inferiore e superiore, una tecnica ben nota a chi si occupa di OTL...sempur lineari!

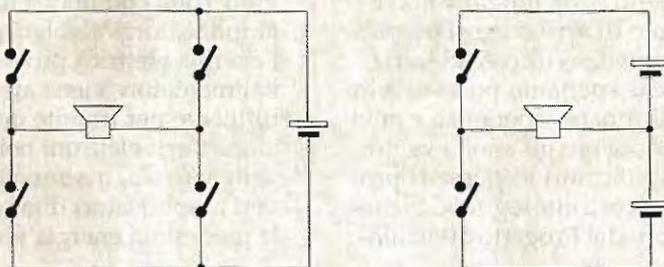
Le griglie di ogni ramo sono pilotate dagli impulsi PWM provenienti dai circuiti FGD - Floating Grid Driver- di pilotaggio isolati. Il pilotaggio delle valvole deve avvenire infatti applicando gli impulsi PWM tra griglie e catodi: poiché i catodi del ramo superiore non sono collegati ai catodi del

ramo inferiore, occorre che i circuiti di pilotaggio siano tra loro isolati galvanicamente.

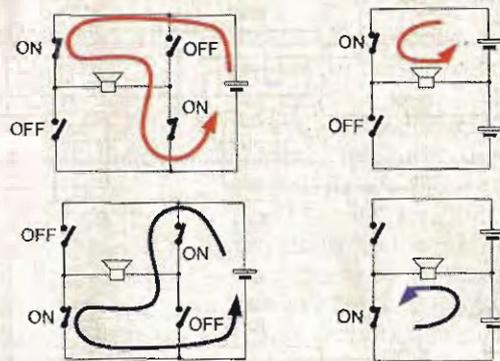
Ogni FGD avrà allora un proprio alimentatore, che è stato dimensionato per provvedere anche alla tensione di accensione dei filamenti del ramo di triodi pilotati dal rispettivo FGD.

Per mantenere l'isolamento, ogni FGD riceve gli impulsi generati dal modulatore PWM mediante fotoaccoppiatori.

I circuiti FGD non sono altro che dei buffer traslatori di livello: in corrispondenza del valore logico 0 del segnale PWM applicato al loro ingresso forniscono una ten-



Schema elettrico di principio di un amplificatore in classe D con circuito a ponte ad H completo ed alimentazione singola oppure a mezzo ponte ed alimentazione duale.



Percorso bidirezionale della corrente che attraversa il carico utilizzatore nei due schemi di principio.

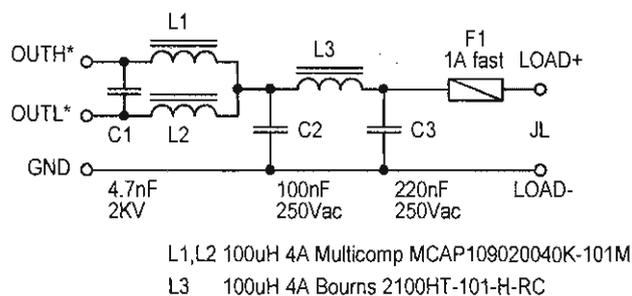
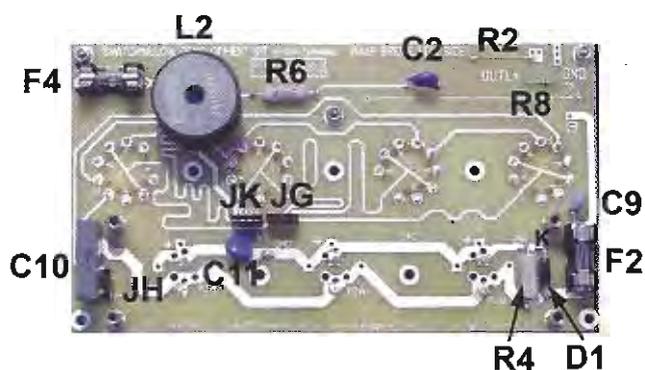
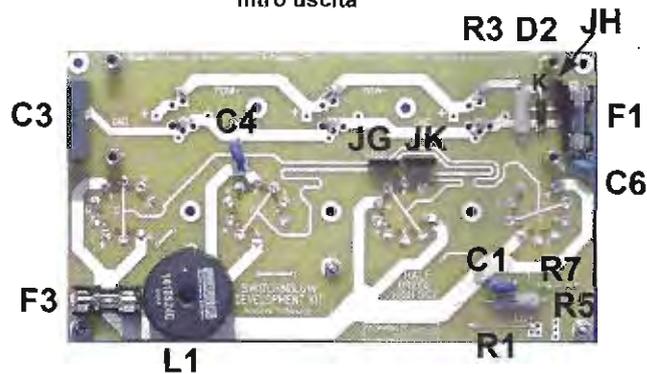
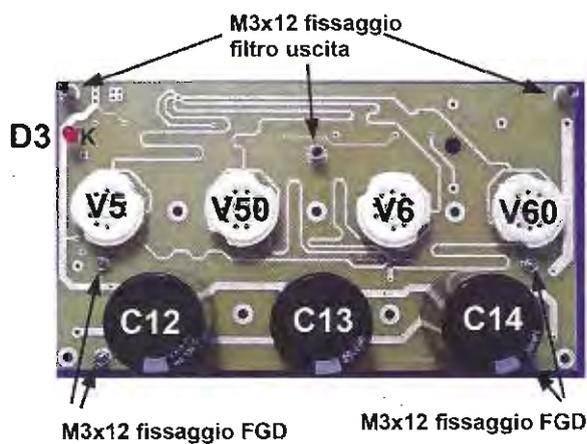
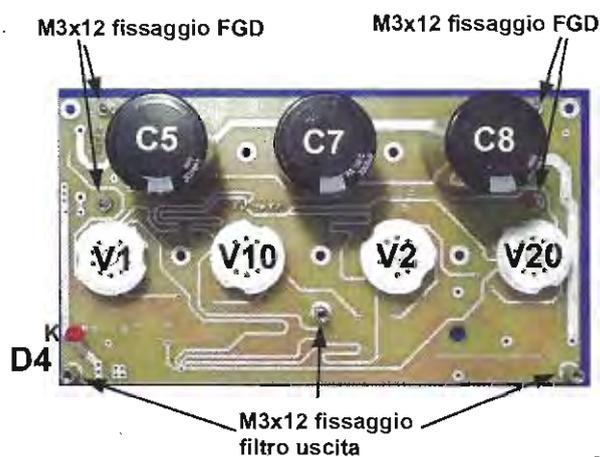
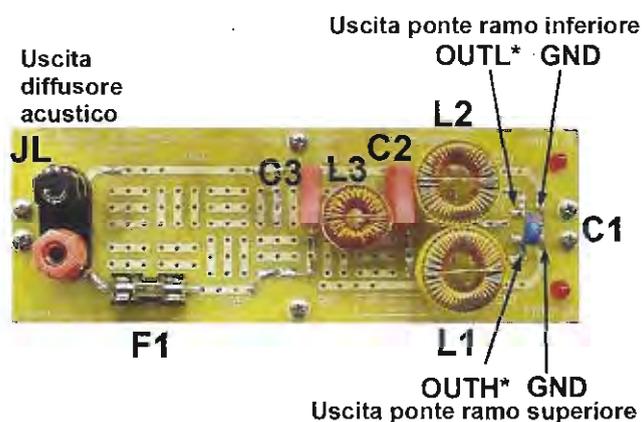


fig.3 (in alto a sinistra) - Assemblaggio del ramo superiore del ponte, lato valvole e lato FGD; questi ultimi vanno innestati sui connettori JH, JK, JG ed avvitati alle rispettive colonnine M3.

fig.4 (in alto a destra) - Assemblaggio del ramo inferiore del ponte. Sono visibili le serpentine per l'equalizzazione Signal Integrity.

fig.5 (in basso a sinistra) - Schema elettrico del filtro EMI versione "basic" e sua realizzazione sulla apposita breadboard millefori.



sione negativa tale da portare in interdizione i triodi, mentre in corrispondenza del valore logico 1 del segnale PWM forniscono una tensione positiva con corren-

te sufficiente per portare i triodi in un regime di forte conduzione. Nel Progetto Switchinglow il blocco modulatore PWM ha ingresso audio analogico ed è di tipo AD, realizzato con il classico circuito oscillatore a dente di sega e comparatore. Ad ingresso audio nullo corrisponde un duty cycle pari al 50%;

con ingresso negativo il duty cycle diminuisce verso lo 0% mentre con ingresso positivo aumenta verso il 100%. Dal modulatore escono due segnali PWM invertiti uno rispetto all'altro per azionare in opposizione di fase i due rami superiore ed inferiore del mezzo ponte. Nel nodo di connessione tra i rami del mezzo ponte è applicato il blocco del filtro EMI di uscita, cui segue il carico utilizzatore, nel nostro caso il diffusore acustico. In questa prima puntata ci concentreremo sulla realizzazione del

te sufficiente per portare i triodi in un regime di forte conduzione. Nel Progetto Switchinglow il blocco modulatore PWM ha ingresso audio analogico ed è di tipo AD, realizzato con il classico circuito oscillatore a dente di sega e comparatore. Ad ingresso audio nullo corrisponde un duty cycle pari al 50%;



fig.6 - Dettaglio dell'assemblaggio del c.s. del filtro EMI sopra i c.s. del ponte.

mezzo ponte e del filtro di uscita. La seconda puntata illustrerà nel dettaglio i circuiti FGD e modulatore PWM, mentre nella terza puntata ci occuperemo della messa in funzione del circuito. Per non appesantire la lettura, riquadri indipendenti affronteranno vari argomenti di base che in qualche modo sono propedeutici al lavoro sul Progetto Switching-glow.

CIRCUITO DI POTENZA

Lo schema di fig.2 illustra il circuito di potenza del mezzo ponte ad H.

Ogni ramo del ponte è realizzato su un proprio circuito stampato e comprende, oltre ai doppi triodi, il bus dell'alimentazione di potenza con il rispettivo banco di condensatori elettrolitici e le induttanze per la limitazione della corrente impulsiva, una cella di smorzamento ed un paio di LED per indicare la presenza della tensione di alimentazione duale, che dovrà essere inferiore a $\pm 90V$. Una coppia di diodi Zener e di fusibili protegge i banchi di elettrolitici contro eventuali sovratensioni.

Gli elettrolitici dovranno essere preferibilmente di tipo a basso ESR, specifici per circuiti swit-

ching; formano infatti un volano che dovrebbe mantenere costante la tensione di alimentazione, fornendo corrente durante le commutazioni dei triodi e quindi lavorano ad alta frequenza. La tensione massima di 90V è sta-

ta scelta per praticità, per mantenere tutto il circuito "tranquillo" e poco pericoloso per chi ci mette mano, anche se non deve ingannare: comunque tra il ramo inferiore e quello superiore possiamo raggiungere una differenza di potenziale di 180V!

Inoltre l'energia accumulata nei banchi di elettrolitici è più che ragguardevole e può vaporizzare le piste del circuito stampato in caso di cortocircuito accidentale. Sarà però sorprendente verificare come il ponte riesca a funzionare anche con tensioni di alimentazione decisamente più basse, già a partire da $\pm 12V$, quanto di più inusuale se riferito ai tipici valori di tensione anodica impiegati nei lineari!

Le foto di fig. 3 e 4 illustrano l'assemblaggio dei componenti sugli stampati del ramo inferiore e superiore.

Sono ben visibili le serpentine per l'equalizzazione di lunghezza dei segnali (vedi riquadro Signal Integrity); alle frequenze in gioco (200.300 KHz) questo accorgimento non è mandatorio, ma comunque si è preferito introdurlo avendo spazio a disposizione per realizzarlo.

fig.7 - Vista d'insieme del c.s. del filtro EMI avvitato sopra i c.s. del ponte. Il filtro qui fotografato è una versione precedente rispetto a quello di fig.5



RIQUADRO #2

Tecniche di Signal Integrity.

Tutti i circuiti elettronici digitali ad alta velocità sono realizzabili su comuni circuiti stampati se si adottano le tecniche di Signal Integrity che permettono di garantire ad un segnale emesso da un dispositivo trasmettitore di giungere inalterato ad un dispositivo ricevitore.

In elettronica digitale deve essere preservata l'informazione che viene trasferita da una parte all'altra del circuito e questa informazione è il valore logico 0 o 1 associato ad un qualche livello di tensione.

Devo quindi evitare che questi livelli di tensione assumano valori non corretti a causa di distorsioni in corrispondenza dei fronti delle transizioni tra i due valori logici.

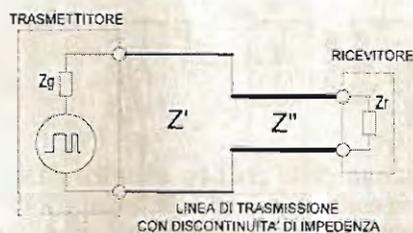
Eletticamente queste distorsioni dei fronti si manifestano quando un segnale incontra delle discontinuità di impedenza sulla linea di trasmissione in cui si sta propagando: ogni discontinuità genera infatti un segnale riflesso che retrocede verso il trasmettitore e la sua sovrapposizione al segnale che procede in avanti verso il ricevitore ne modifica la forma originaria, distorcendolo.

La propagazione è ottimale, senza distorsione, nel caso ideale in cui l'impedenza della linea risulti adattata all'impedenza equivalente di uscita del trasmettitore ed a quella equivalente del ricevitore.

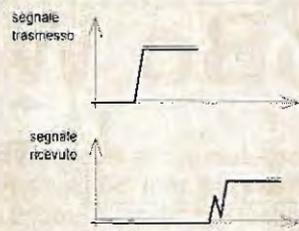
Le tecniche di Signal Integrity di "controllo dell'impedenza" consentono di tracciare le piste di rame di un circuito stampato tenendo conto delle impedenze equivalenti dei pin dei circuiti integrati che devono collegare, in modo da minimizzare le riflessioni e quindi evitare le distorsioni.

Un ulteriore accorgimento fondamentale serve invece a garantire che più segnali appartenenti ad un qualche bus di dati parallelo giungano contemporaneamente ai rispettivi ricevitori oppure a far in modo che un determinato segnale giunga nello stesso istante temporale a più ricevitori: stiamo parlando in questo caso delle tecniche di Signal Integrity di "equalizzazione della lunghezza" delle linee, ovvero dell'adozione di serpentine nello sbroglio del circuito stampato in modo che, dove serve, segnali diversi impieghino sempre lo stesso tempo per transitare tra i vari dispositivi elettronici interconnessi.

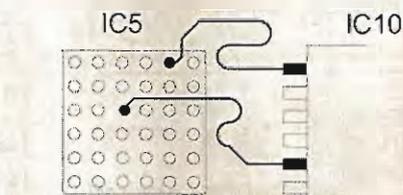
Questa equalizzazione, molto facilmente individuabile osservando la scheda madre di un PC oppure le sue schede di memoria RAM, è stata adottata nel Progetto Switchinglow poiché ogni circuito FGD deve inviare impulsi a più triodi collegati in parallelo e farli azionare contemporaneamente tra i due stati estremi di conduzione o interdizione.



LINEA DI TRASMISSIONE CON DISCONTINUITÀ DI IMPEDENZA



DISTORSIONE DEI FRONTI DEL SEGNALE TRASMESSO CAUSATA DALLA DISCONTINUITÀ DI IMPEDENZA DELLA LINEA



ESEMPIO DI C.S. CON SBROGLIO PISTE EQUALIZZATE IN LUNGHEZZA TRA DUE CIRCUITI INTEGRATI

Può diventare un interessante argomento di approfondimento determinare sperimentalmente l'eliminazione o comunque la modifica di questa equalizzazione di lunghezza delle piste; spesso in elettronica conviene prevedere inizialmente qualcosa in più, per poi semmai provvedere a toglierlo piuttosto che agire al contrario (quando aggiungere potrebbe essere ormai impossibile!).

FILTRO DI USCITA

Lo schema di fig. 5 descrive un semplice filtro EMI di uscita che si è rivelato idoneo all'impiego con il ponte a triodi modulato in PWM, secondo lo schema di modulazione di tipo AD.

Questo filtro è da considerarsi come un suggerimento: è infatti suf-

ficiente per rimuovere gran parte delle componenti ad alta frequenza che potrebbero dare problemi ai tweeter dei diffusori, ma non basta per ottenere un'uscita perfettamente compatibile con le norme sui radiodisturbi e quindi non sarebbe sufficiente per fabbricare un amplificatore che sia un prodotto finito commerciabile. Ricordiamo che lo scopo del Progetto Switchinglow non è di fornire un kit per realizzare un amplificatore in scatola di montaggio ma piuttosto di preparare una piattaforma sperimentale. Il filtro infatti viene assemblato su un circuito stampato simile ad una basetta millefori proprio per lasciare margine di modifica allo sperimentatore.

Oltre al comportamento verso i

disturbi elettromagnetici, questo filtro contribuisce a determinare la qualità acustica e pertanto auspichiamo si presti ad essere oggetto di ricerca da parte dell'appassionato.

Il circuito stampato del filtro viene posizionato a cavallo tra gli stampati dei due rami del ponte di potenza, come si vede nella foto di fig. 6, ed il tutto assume un ingombro quadrato di circa 200 mm di lato (fig. 7).

E' previsto un fusibile veloce in serie ai morsetti di uscita del diffusore per scongiurare che questi sia soggetto a guasti in caso di cortocircuito accidentale tra uno dei bus di alimentazione del ponte e l'entrata del filtro. ⚠

(continua il prossimo mese...)