

Il Progetto Switchinglow

(terza ed ultima parte)

Concludiamo la descrizione del Progetto Switchinglow, piattaforma sperimentale per lo sviluppo di amplificatori valvolari in classe D presentata nel corso del 2016 al Gran Galà dell'Alta Fedeltà di Padova e Milano, alla Mini Maker Faire di Trieste, alla European Maker Faire di Roma ed al Burning Amp di San Francisco.

ALIMENTAZIONE

Dopo aver descritto nelle precedenti due puntate i blocchi che costituiscono il Progetto Switchinglow (ponte di potenza a triodi, circuiti di pilotaggio delle griglie Floating Grid Driver, filtro EMI di uscita e modulatore PWM), prima di procedere con la descrizione dell'assemblaggio finale occorre spendere qualche parola sul sistema di alimentazione. Come già scritto nella puntata precedente i circuiti FGD devono essere alimentati indipendentemente uno dall'altro per mezzo dei rispettivi trasformatori; questi forniscono anche le tensioni per l'accensione dei filamenti dei triodi costituenti i due rami del ponte.

Anche il modulatore PWM dovrà essere alimentato per proprio conto con una tensione a 5 V.

Il ponte di potenza richiede invece una tensione continua duale +Vaa, -Vkk compresa nel range +/-12 V.. +/-90 V che può essere ottenuta da un alimentatore da banco oppure da un semplice trasformatore a presa centrale seguito da un raddrizzatore a ponte, come indicato in fig. 1. Se si dispone di un Variac, si può inserirlo nel primario di questo trasformatore a presa centrale in modo da avere la possibilità di regolare la tensione di uscita da applicare al ponte di potenza.

Ricordiamo di inserire sempre un fusibile in serie ai primari dei trasformatori, che andrà scelto in base alla loro potenza.

Una corrente di uscita di circa 1A su entrambi i rami +Vaa e -Vkk sarà comunque sufficiente per mettere in funzione il ponte di potenza.

Attenzione anche allo spunto di corrente che si può verificare al momento dell'accensione della tensione di rete: si manifesta per effetto della carica dei condensatori elettrolitici dei due banchi di alimentazione dei triodi

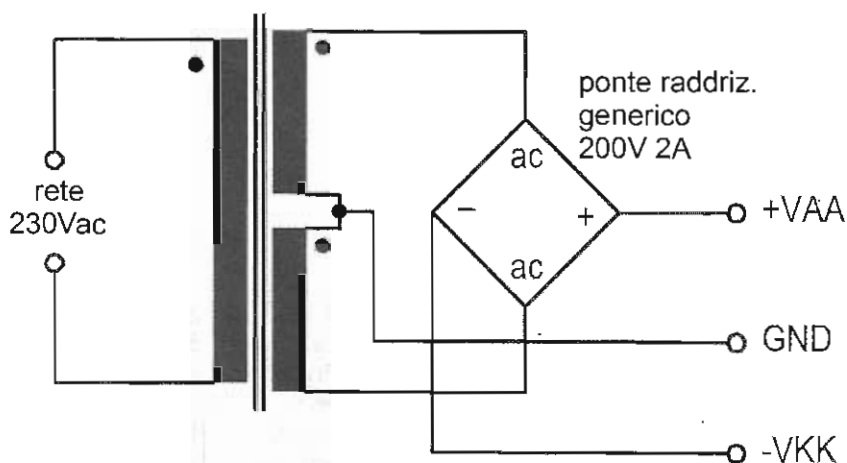


fig.1 - Schema elettrico dell'alimentatore del ponte di potenza. Per le prove e per il rilievo degli oscillogrammi che seguono, è stato utilizzato un trasformatore toroidale da 50 VA con secondario da 25+25 Vac.



fig.2 - Assemblaggio del c.s. del filtro di uscita sopra al c.s. del ponte di potenza e dei circuiti FGD al di sotto.

oppure per effetto della magnetizzazione residua dei nuclei dei trasformatori toroidali.

ASSEMBLAGGIO COMPLESSIVO

I due circuiti stampati del ponte di potenza vanno posti affiancati, con le valvole inserite. Si raccomanda di non piegare o ruotare le valvole du-

rante l'inserzione negli zoccoli: i piedini delle ECC99 non sono adatti a subire pieghe o torsioni che li spezzerrebbero. Inoltre conviene sempre indossare un paio di guanti da lavoro quando si maneggiano le valvole, per evitare di ferirsi in caso di sfortunata rottura del vetro.

Ad unire i due c.s. del ponte provvede il c.s. del filtro di uscita, che va avvitato



fig.3 - Particolare del collegamento tra le uscite OUTL*, OUTH* del ponte di potenza ed il filtro di uscita.

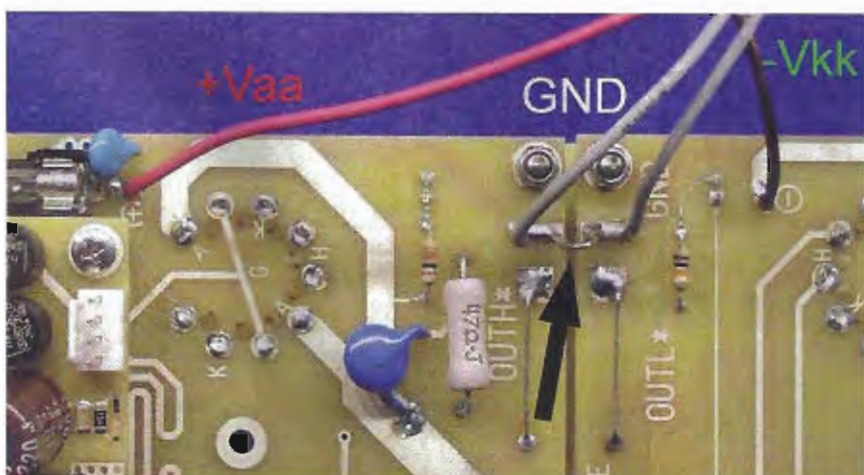


fig.4 - Particolare del ponticello di massa e dei punti di applicazione delle tensioni di alimentazione +Vaa, -Vkk del ponte di potenza.

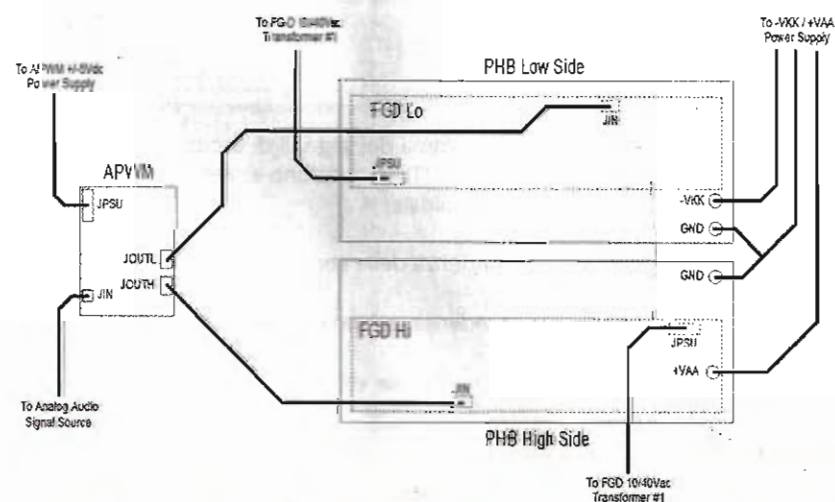


fig.5 - Schema delle cablature.

nelle torrette previste. Dopo averlo fissato si può procedere a collegare le uscite del ponte OUTL*, OUTH* agli ingressi del filtro me-

diente saldatura di alcuni spezzoni di rame nudo ed altrettanto per quanto riguarda le masse GND tra ponte e filtro di uscita; inoltre si dovrà eseguire

il ponticello che collega la massa comune tra i due c.s. del ponte.

Le fig. 2, 3, 4 illustrano il risultato finale di queste operazioni, che devono essere concluse con la cablatura delle varie filature, come indicato in fig. 5. Prima di fissare i due circuiti FGD sotto ai c.s. del ponte e dopo aver inserito nei rispettivi zoccoli tutte le valvole, conviene verificare l'assenza di cortocircuiti tra le griglie ed i catodi, in modo da scongiurare il rischio di danneggiamento dei circuiti FGD, che non sono protetti contro il cortocircuito sull'uscita di comando delle griglie. La verifica va fatta applicando i puntali di un multimetro tra i connettori JG e JK sul c.s. del ramo superiore del ponte e sul c.s. del ramo inferiore.

Attendiamo di installare al loro posto i circuiti FGD perché prima conviene testarli con una accensione a vuoto.

PRIMA ACCENSIONE DEL MODULATORE PWM E DEI CIRCUITI FGD

Per la prima accensione di questi due blocchi funzionali forniamo all'ingresso JIN del modulatore PWM un segnale audio sinusoidale da 1 kHz e 1 Vpp. Applichiamo la tensione di 5 V e con l'oscilloscopio verifichiamo sul test point SAW che il generatore di onda triangolare oscilla a circa 220 kHz (fig. 6) e che sul test point LPF sia presente la sinusoide del segnale di ingresso. Verifichiamo poi le uscite di ingresso. Verifichiamo poi le uscite OUTH ed OUTL; con il trigger dell'oscilloscopio agganciato al segnale sinusoidale di ingresso ed espandendo la base dei tempi si dovrà osservare come il duty cycle delle uscite OUTH ed OUTL vari a seconda del livello della sinusoide che selezioneremo spostando la soglia del trigger. Le due uscite devono risultare in controfase. Se all'oscilloscopio compaiono le tracce come in fig. 7 e fig. 8 possiamo essere sicuri che il modulatore PWM sta funzionando bene e possiamo passare all'accensione dei circuiti FGD. Questi sono alimentati indipendentemente uno dall'altro, quindi possiamo accenderne uno alla volta e prima di fissarli ai c.s. del ponte.

Con il modulatore PWM acceso e collegato agli ingressi dei circuiti FGD, diamo la rete ad uno dei trasformatori che alimenta uno dei due circuiti FGD. Applicando la sonda dell'oscilloscopio tra i pin 1, 2 e 3, 4 del connettore JH si dovranno vedere

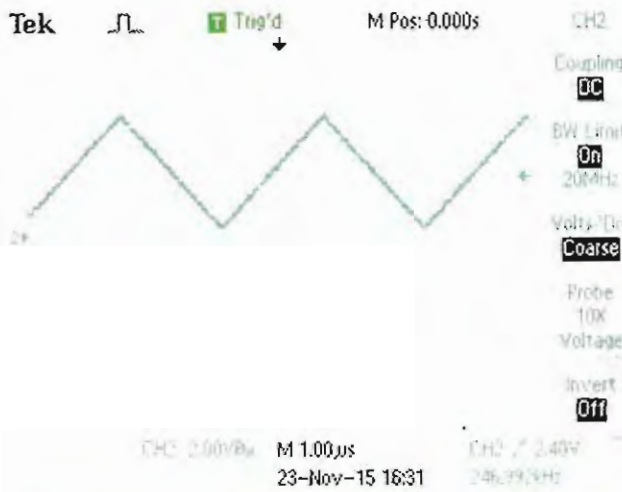


fig.6 - Oscillogramma del segnale ad onda triangolare del modulatore PWM.

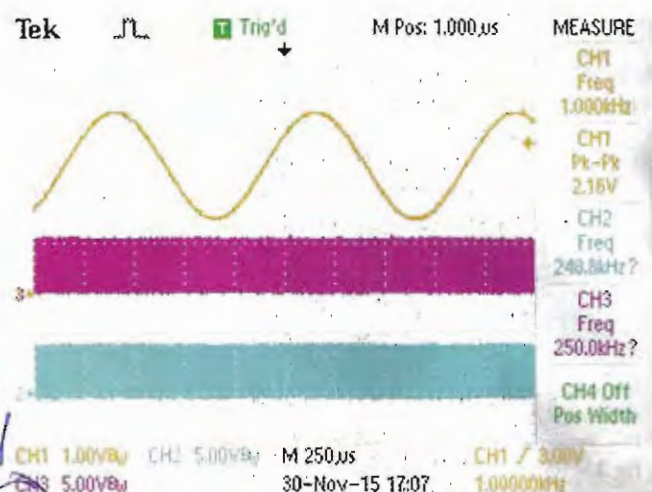
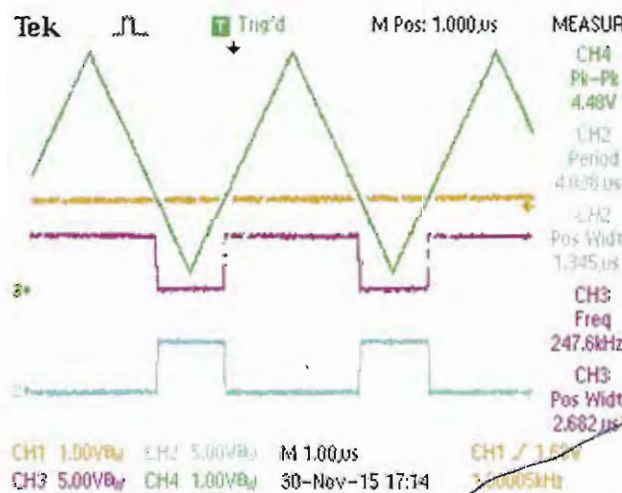
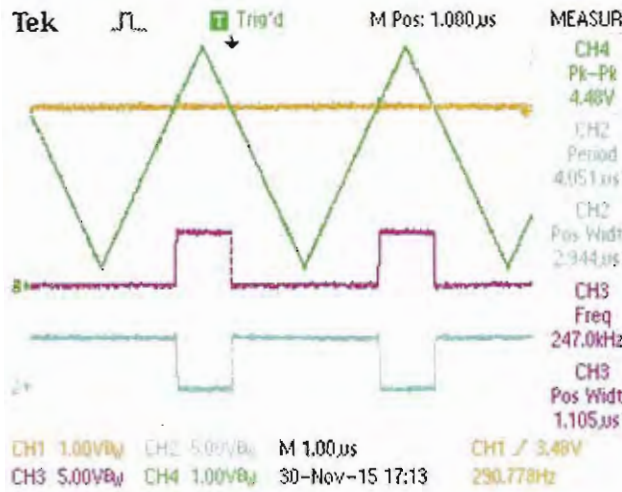


fig.7 - Oscillogramma dei segnali di uscita del modulatore PWM OUTH ed OUTL.



(fig. 9) i 50 V ondulati al doppio della frequenza della rete Vac che serviranno ad accendere i filamenti; attenzione a non cortocircuitare i pin 1 e 2 con i pin 3 e 4 di JH altrimenti saltano i fusibili del circuito FGD!

chiamo l'uscita di comando delle griglie: se l'oscilloscopio ha due canali colleghiamo la sonda della prima traccia al modulatore PWM sulla cui uscita abbiamo collegato l'ingresso del circuito FGD sotto test e colle-

ghiamo la sonda della seconda traccia sull'uscita JG del circuito FGD. La massa della prima sonda dovrà essere collegata alla massa GND del modulatore PWM mentre la massa della seconda sonda dovrà essere col-

fig.8 - Oscillogramma dei segnali di uscita del modulatore PWM OUTH ed OUTL in relazione ai vari livelli del segnale di ingresso sinusoidale:

- a) in corrispondenza delle sommità della sinusoide,
- b) in corrispondenza del passaggio per lo zero
- c) in corrispondenza dei ventri.

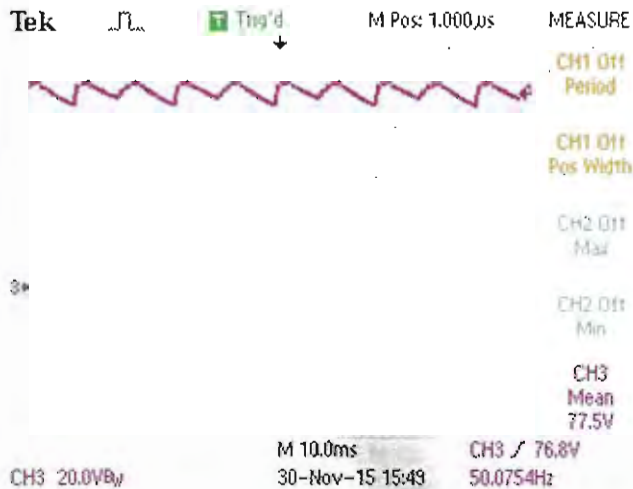


fig.9 - Tensione a vuoto di accensione dei filamenti presente sul connettore JH dei circuiti FGD.

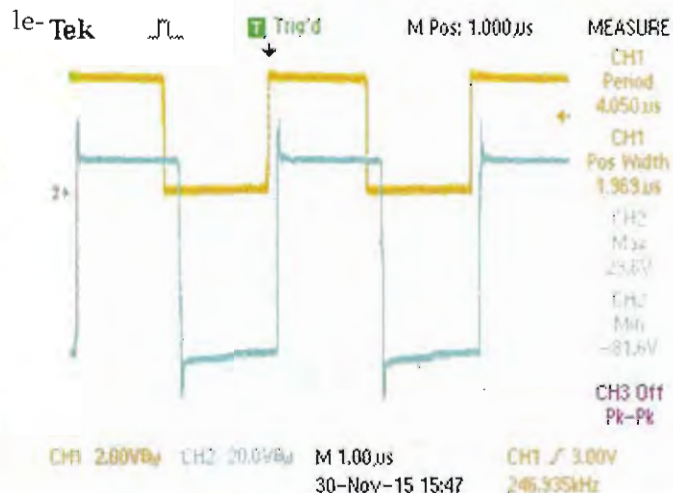


fig.10 - Uscita del modulatore PWM (traccia gialla) ed uscita JG a vuoto del circuito FGD (traccia azzurra). Per misurare il segnale sull'uscita JG occorre collegare la massa della sonda dell'oscilloscopio a JK.

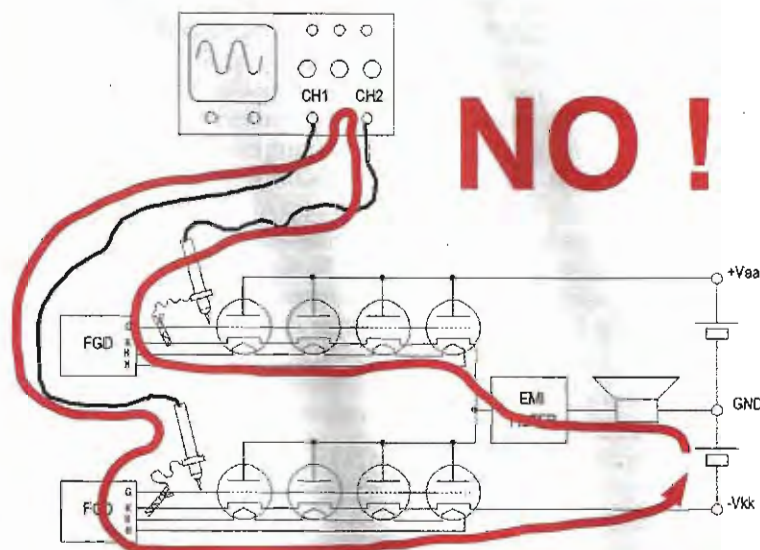


fig.11 - Cortocircuito causato dalla connessione delle masse delle sonde dell'oscilloscopio nel caso si voglia tentare di osservare contemporaneamente le due uscite JG dei circuiti FGD installati nel ponte di potenza.

Questa misura è possibile solo impiegando un oscilloscopio ad ingressi isolati. Anche tentare di osservare contemporaneamente l'uscita sul diffusore e le uscite dei circuiti FGD collegando le masse delle sonde contemporaneamente al nodo GND tra +Vaa e -Vkk e le masse JK degli FGD causa lo stesso cortocircuito!

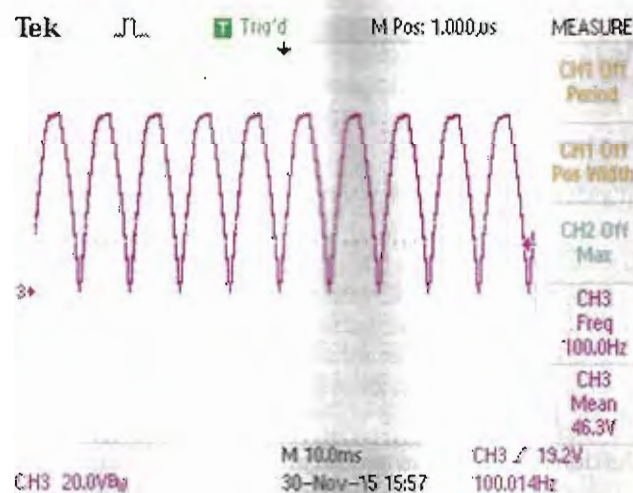


fig.12 - Tensione di accensione dei filamenti presente sui connettori JH dei circuiti FGD quando le valvole sono inserite.

gata a quella che è la massa dell'uscita JG del circuito FGD, ovvero al connettore JK. In questo modo sullo schermo dell'oscilloscopio vedremo contemporaneamente i segnali di ingresso e di uscita del circuito FGD, come riportato in fig. 10.

Attenzione! In questo modo abbiamo collegato temporaneamente tramite le masse delle sonde dell'oscilloscopio la massa del modulatore PWM con JK; i due circuiti sono isolati, pertanto non succede nulla di male.

Ripetiamo la procedura con il secondo circuito FGD; si dovrà ottenere il medesimo risultato, ovviamente riferito alla seconda uscita del modulatore PWM.

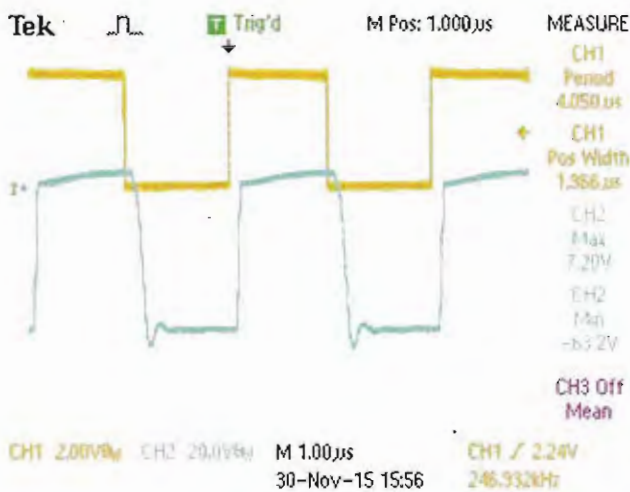


fig.13 - Uscita del modulatore PWM (traccia gialla) ed uscita JG del circuito FGD (traccia azzurra) caricata dalle valvole con i filamenti accesi.

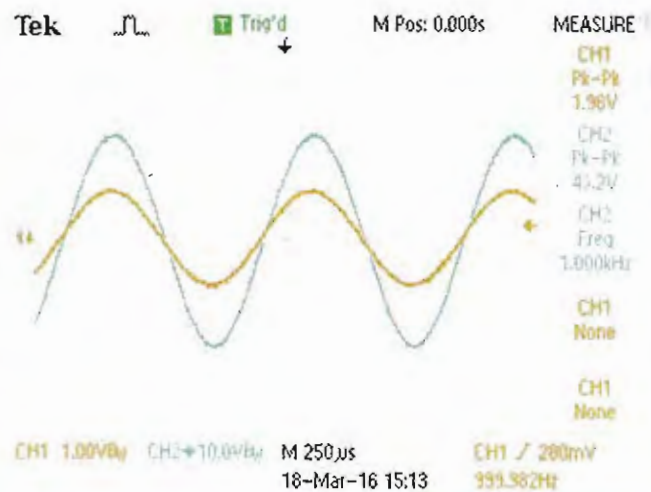


fig.14 - Segnale di ingresso al modulatore PWM (traccia gialla) e segnale di uscita ai capi della resistenza di carico applicata all'uscita del filtro EMI (traccia azzurra). L'oscillogramma qui riprodotto è stato registrato con +Vaa, -Vkk pari a +/-37 V e resistenza di carico di 40 ohm.

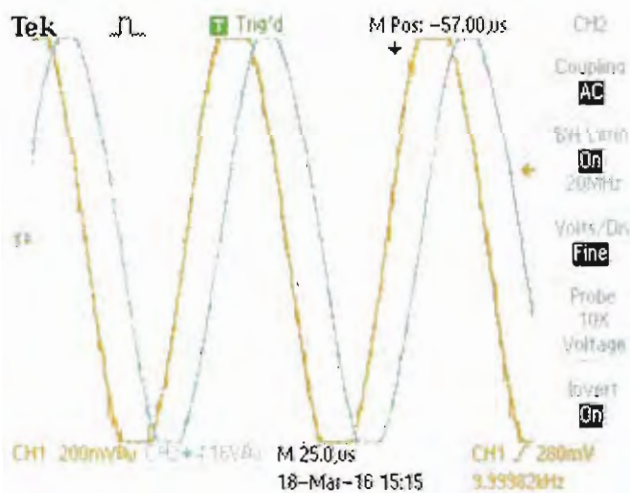
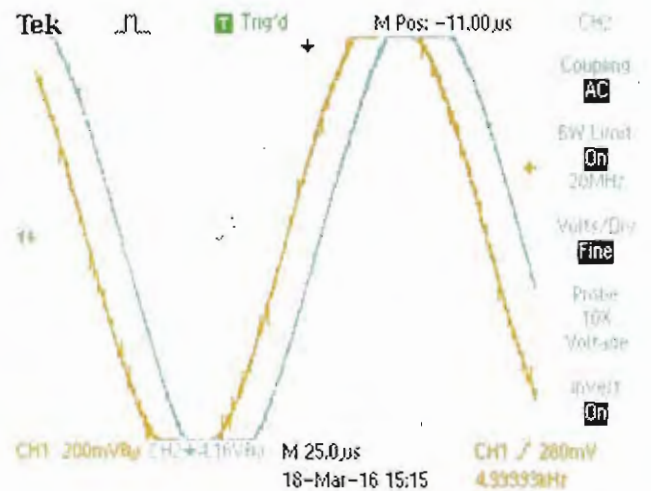
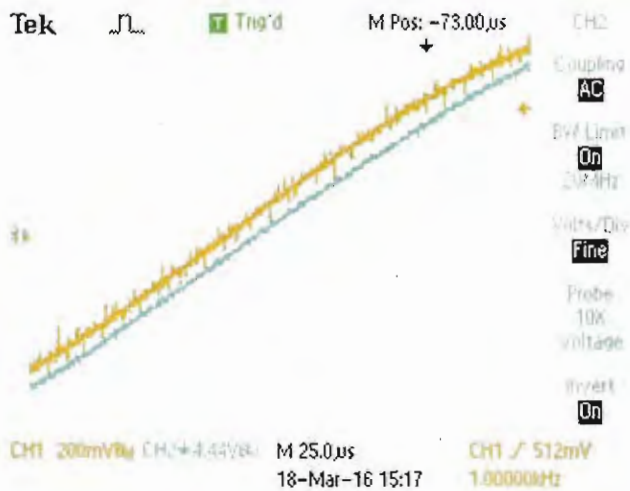


fig.15 - Ritardo di fase costante tra segnale di ingresso del modulatore PWM ed uscita del ponte di potenza:

- a) ad 1 kHz,
- b) a 5 kHz,
- c) a 10 kHz.

Se disponiamo di un oscilloscopio a quattro tracce potremo vedere contemporaneamente le due uscite PWM

(che sono gli ingressi dei due FGD) e le due uscite JG. Ancora attenzione ! In questo modo

avremo la massa GND del modulatore PWM collegata assieme ai connettori JK di entrambi gli FGD.

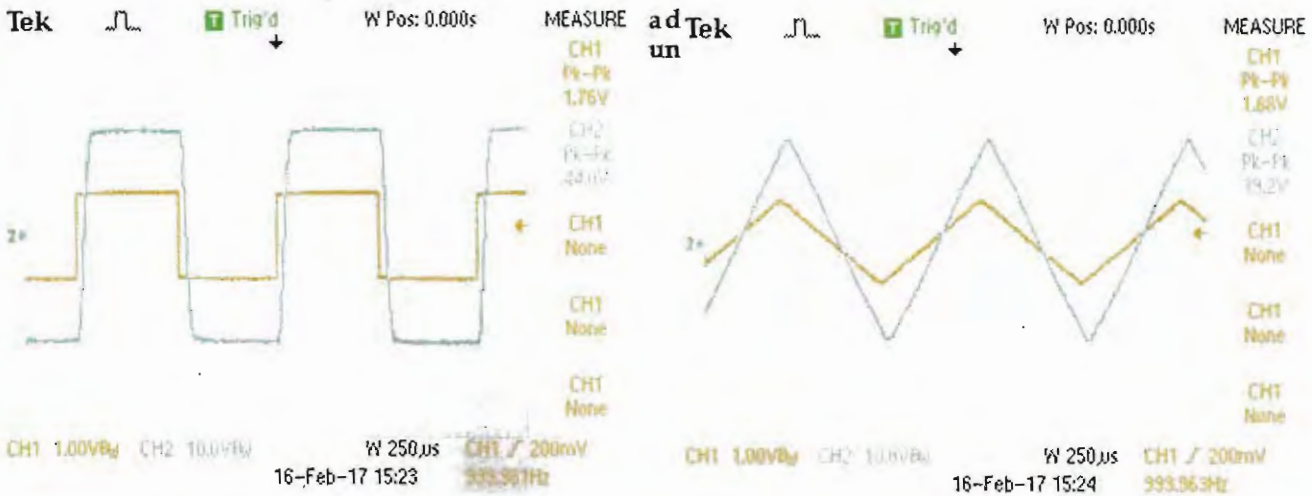


fig.16 - Risposta al segnale ad onda quadra a) e triangolare b).

Questo si può fare SOLO se gli FGD NON SONO installati sui c.s. del ponte di potenza!

Con i circuiti FGD installati sui c.s. del ponte di potenza, il connettore JK del circuito FGD del ramo superiore del ponte risulta collegato all'uscita OUTH* del ponte mentre il connettore JK del circuito FGD del ramo inferiore del ponte risulta collegato al ramo di alimentazione -V_{kk}. In questo caso, collegando la massa della sonda della prima traccia a JK di un FGD e la massa della sonda della seconda traccia a JK dell'altro FGD si forma un cortocircuito netto tra i poli del banco di condensatori elettrolitici del ramo inferiore del ponte, come evidenziato nella fig. 11. Quindi quando avremo i circuiti FGD installati sul ponte di potenza non sarà possibile osservare contemporaneamente JG di entrambi loro ponendo le masse delle sonde sui rispettivi JK (a meno che non si disponga di un oscilloscopio ad ingressi isolati come il Tektronix TPS2024B). Spegniamo tutto, scolleghiamo le sonde dell'oscilloscopio e finalmente installiamo gli FGD sotto ai c.s. del ponte di potenza.

PRIMA ACCENSIONE PONTE DI POTENZA

Riappliciamo corrente prima al modulatore PWM e poi ai circuiti FGD. Avendo installato questi ultimi sui c.s. del ponte di potenza vedremo i filamenti delle otto ECC99 illuminarsi di arancione incandescente.

A questo punto con l'oscilloscopio possiamo vedere l'andamento della tensione dei filamenti, che sarà come in fig. 12. Poi, **collegandoci SOLO**

al FGD per volta, possiamo rivedere l'andamento di JG (con la massa della sonda sul rispettivo JK) rispetto al segnale di uscita del modulatore PWM, come in fig. 13, andamento che risulterà diverso da quanto visto nella prova a vuoto di fig. 10 per effetto del carico costituito dal circuito griglia-catodo che ora si comporta come un diodo a vuoto polarizzato in diretta, in quanto ora le valvole sono accese con i catodi riscaldati. Ora non ci resta che collegare un carico fittizio di prova sull'uscita del filtro EMI ed applicare con cautela

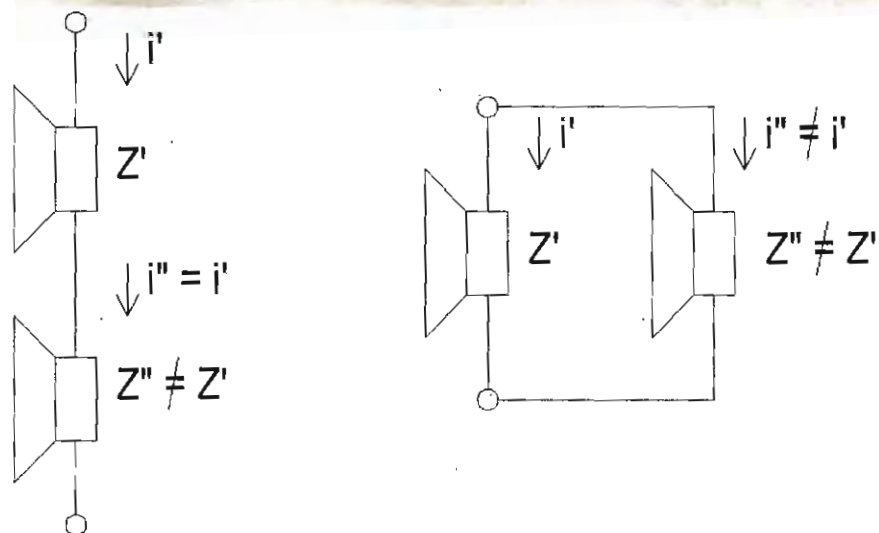
l'alimentazione al ponte di potenza: inizialmente possiamo limitarci a +/- 10 V. +/- 15 V.

Come carico possiamo usare una resistenza da 10..40 ohm e 10..30W di potenza. Collegando le sonde dell'oscilloscopio una al segnale sinusoidale che abbiamo applicato all'ingresso del modulatore PWM e l'altra ai capi della resistenza di carico si dovrebbe ottenere la fig. 14, che visualizza la relazione di ingresso - uscita dell'amplificatore.

Il Progetto Switchinglow ha preso vita !

fig.17 - Corrente che attraversa una coppia di altoparlanti supposti uguali, collegati in serie o in parallelo.

Nel collegamento in serie entrambe le bobine mobili sono attraversate dalla medesima corrente e quindi sviluppano la stessa forza meccanica mentre nel collegamento in parallelo qualsiasi diversità di impedenza tra i due altoparlanti si traduce in una diversità tra le correnti che attraversano le bobine mobili e quindi la forza sviluppata sarà altrettanto differente.



Input frequency 100Hz, +V_{AA}/-V_{KK} = +/-37V

R load (ohm)	Vout pp (V)	Iout pp (A)	Pout pp (W)
open	80	0	0
40	43	1.1	46
20	26	1.3	34
10	14	1.4	20

Input frequency 1KHz, +V_{AA}/-V_{KK} = +/-37V

R load (ohm)	Vout pp (V)	Iout pp (A)	Pout pp (W)
open	79	0	0
40	43	1.1	46
20	26	1.3	34
10	14	1.4	20

Input frequency 10KHz, +V_{AA}/-V_{KK} = +/-37V

R load (ohm)	Vout pp (V)	Iout pp (A)	Pout pp (W)
open	67	0	0
40	38	0.9	36
20	25	1.2	31
10	15	1.5	22

tab.1 - Valori della misura all'oscilloscopio della tensione di uscita picco-picco in funzione della frequenza del segnale di ingresso sinusoidale e del valore della resistenza di carico a 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz (alimentazione ponte +/-37 V). Le misure di corrente e potenza sono invece calcolate.

Ora si può sostituire il segnale sinusoidale di test con un segnale audio di ampiezza non superiore a 2 V_{pp}, sostituire la resistenza di carico con un diffusore e procedere con l'ascolto, aumentando i valori di tensione +V_{aa}, -V_{kk} dell'alimentazione duale del ponte di potenza.

Ricordiamo l'ordine di accensione:

- 1) modulatore PWM
- 2) circuiti FGD e filamenti
- 3) +V_{aa}, -V_{kk} ponte di potenza

mentre l'ordine di spegnimento deve essere l'opposto, quindi 3), 2), 1).

Riapplicando in ingresso il segnale sinusoidale di test ed in uscita la resistenza di carico possiamo vedere come il ritardo di fase tra ingresso del modulatore PWM ed uscita del filtro EMI sia costante al variare della frequenza (fig.15). Questa condizione, assieme al guadagno costante tra ingresso ed uscita entro la banda passante, garantisce che qualsiasi forma d'onda presentata all'ingresso del modulatore venga riprodotta fedelmente dall'uscita del ponte di potenza; gli oscillogrammi di fig. 16 rappre-

sentano le risposte all'onda quadra e ad un segnale triangolare.

Un'altra interessante particolarità del circuito in classe D valvolare è che tende a comportarsi da generatore di corrente costante: la tensione di uscita ai capi del carico aumenta all'aumentare della sua impedenza, come si può verificare variando il valore della resistenza di carico (tab.1) e di conseguenza anche la potenza resa aumenta all'aumentare dell'impedenza del carico. Nei circuiti in classe D a semiconduttore avviene l'opposto perché tendono a comportarsi da generatori di tensione costante e la potenza resa sul carico aumenta al diminuire della sua impedenza.

Il circuito in classe D valvolare si presta dunque al pilotaggio di altoparlanti collegati in serie, che saranno attraversati tutti dalla stessa corrente mentre altoparlanti collegati in parallelo sono attraversati da correnti che non sono

garantite essere identiche, come si evince dalla fig.17.

CONCLUSIONI

Il Progetto Switchinglow è la prima piattaforma di sviluppo per amplificatori in classe D valvolari presentata al pubblico degli audiofili autocostruttori; costituisce la "quarta opzione" per chi si cimenta nella realizzazione di amplificatori audio elettronici, dopo i ben conosciuti lineari valvolari, lineari a semiconduttore e switching a semiconduttore.

Possiamo pensare a questa piattaforma di sviluppo come ad un piccolo robot inviato su un pianeta sconosciuto; ora che vi è atterrato si può iniziare l'esplorazione!

Siamo appena arrivati, non c'è pretesa di competere con 110 anni di esperienza acquisita sui lineari a valvole ma siamo certi che con la dovuta volontà e curiosità questo robot potrà offrire agli appassionati molte nuove strade da percorrere e nuovi territori da sondare, alcuni dei quali potrebbero essere magari i seguenti:

- ricercare le valvole con la resistenza interna minore o con il guadagno di corrente maggiore quando sono polarizzate con griglia positiva

- progettare una valvola ex-novo tagliata ad hoc per questo genere di applicazione

- per i puristi dei tubi a vuoto ideare un circuito FGD completamente valvolare...


- ...e ricercare un circuito modulatore PWM valvolare

- verificare le prestazioni di un modulatore PWM di tipo BD rispetto al tipo AD

- progettare un modulatore PWM con ingresso USB, S/PDIF o con accesso diretto a memory card o internet o con connessione Wi-Fi o Bluetooth per mantenere tutta la catena amplificatrice nel dominio digitale

- individuare i filtri EMI più adatti

Lo spazio che si intravede a disposizione sembra assai vasto e quindi speriamo almeno di aver risvegliato qualche spirito pionieristico!

I lettori che potrebbero essere interessati a procurarsi circuiti stampati, componenti e moduli premontati del Progetto Switchinglow possono contattare l'autore scrivendo a marco@studio-rts-ing-rampin.it 

Avvertenza importante per la compatibilità elettromagnetica.

Come era stato scritto nella prima puntata, ricordiamo che il Progetto Switchinglow non è una scatola di montaggio per realizzare un apparecchio finito da tenere in salotto ma è piuttosto uno strumento di sviluppo per il laboratorio elettronico e come tale va adoperato, con la consapevolezza che in quanto circuito switching può dar luogo ad emissioni radio spurie sia condotte sui cavi (alimentazione, diffusore, ingresso) sia irradiate che possono risultare interferenti con sistemi di radiocomunicazione e radio controllo. Spetta al tecnico, sia amatore o professionista, che utilizzerà questo sistema di sviluppo, decidere come agire per controllare o limitare queste emissioni, come similmente avviene per quanto riguarda le norme di sicurezza elettrica quando ci si dedica alla sperimentazione con qualsiasi altro apparato alimentato da tensioni potenzialmente letali.