

Introduzione

Descritto la struttura generale del preamplificatore e il progetto stadio di amplificazione vero e proprio, è ora tempo di trattare dell'alimentatore. Questo deve fornire una tensione anodica di 250V e una bassa tensione di 6.3V per i filamenti.

Requisiti di progetto

Il progetto dello stadio attivo ha dovuto soddisfare nove esigenze. Riguardo all'alimentatore va detto che gli alimentatori sono in effetti due: uno per la tensione anodica, 250V con un assorbimento di circa 8mA e uno per la tensione dei filamenti, 6.3V con 0.6A.

L'alimentatore anodico deve fornire una tensione continua

- a) Relativamente stabile. La stabilità non è tuttavia cruciale, poiché gli stadi attivi lavorano in classe A (la corrente è costante) e le prestazioni dello stadio attivo sono abbastanza poco sensibili a variazioni della tensione anodica dell'ordine di $\pm 10\%$.
- b) Con minima ondulazione residua ("ripple", in inglese). Il rapporto di reiezione dalla tensione di alimentazione a quella di uscita per lo stadio attivo adottato si può valutare con una simulazione. Ne risulta un valore di 0.055V/V (-25.2 dB). Significa che 1V di ondulazione residua sulla tensione anodica, produce un disturbo di 55mV sull'uscita. Per fissare un requisito, si stabilisce che il rapporto tra il segnale e detto disturbo deve essere superiore a 100dB. L'ampiezza efficace nominale del segnale di uscita è 1V, il disturbo deve essere 10^{-5} volte inferiore (-100dB), ossia $10\mu V$. Con una reiezione di 0.055V/V, l'ampiezza massima ammessa dell'ondulazione sulla tensione anodica è $10/0.055\mu V \cong 182\mu V = 0.182mV$. Il valore di progetto deve essere convenientemente inferiore, per tenere conto di tutti i fattori di non-idealità, fisicamente presenti ma ignorati nei calcoli e nelle simulazioni.
- c) Con bassa impedenza di uscita. Il funzionamento dello stadio attivo resta ragionevolmente vicino a quanto calcolato solo se l'alimentatore anodico approssima ragionevolmente un generatore di tensione ideale.

Quanto all'alimentatore per i filamenti, si può scegliere che la tensione prodotta sia continua o alternata: in entrambi i casi necessita

- d) Stabilità
- e) Tra la tensione di filamento e la massa deve esserci una differenza costante, pena l'insorgenza di ronzio a frequenza di rete sul segnale di uscita. Nel caso di alimentazione dei filamenti in alternata, il metodo più semplice per soddisfare codesto requisito, consiste nel connettere due resistori, con resistenza intorno a 100Ω , tra ciascun terminale della tensione di filamento e massa.

- f) La differenza (fissa) tra tensione di filamento e massa deve essere tale da minimizzare la tensione tra catodo e filamento delle valvole utilizzate. Il mancato rispetto di questa condizione comporterebbe uno stress aggiuntivo per le valvole, con conseguente accorciamento della loro vita, come spiegato nella precedente puntata.
- g) Limitazione dello spunto iniziale di corrente. All'accensione, i filamenti (freddi) presentano una resistenza (R) molto minore che in condizione di funzionamento (caldi). Se l'alimentatore dei filamenti fosse un perfetto generatore di tensione (V costante) ed essendo la potenza assorbita V^2/R , questa sarebbe, all'accensione, molto maggiore che in condizioni operative. Il risultato sarebbe, anche in questo caso, un accorciamento della vita delle valvole, il che sarebbe assolutamente indesiderato.

Schema elettrico

La soluzione trovata per le esigenze elencate nel paragrafo precedente è nello schema di figura 1.

Dalla tensione di rete alternata (220V 50Hz) al trasformatore (T1), sono previsti una spina VDE da pannello (P1), un fusibile di protezione in caso di guasti (F1), un interruttore di accensione/spegnimento dotato di lampada spia (SW1) e un condensatore anti-scintilla (C1) ai capi di SW1.

Un solo trasformatore (T1), a due secondari, fornisce le tensioni alternate necessarie a generare la tensione anodica e quella per i filamenti.

L'alimentatore anodico (dei filamenti) è costituito dai componenti D1, C2, R1, C3, R2, C4, R3, C5, D2, D3 (D5, C6, R5, R6, C7, R7, R8, D6, D8).

Il resistore R4, il condensatore C7 e al diodo zener D4 generano una tensione continua stabilizzata alla quale viene riferita la tensione dei filamenti.

Salvo P1, T1, F1, SW1 e C1, tutti gli altri componenti sono montati su un unico circuito stampato (PCB ASSY).

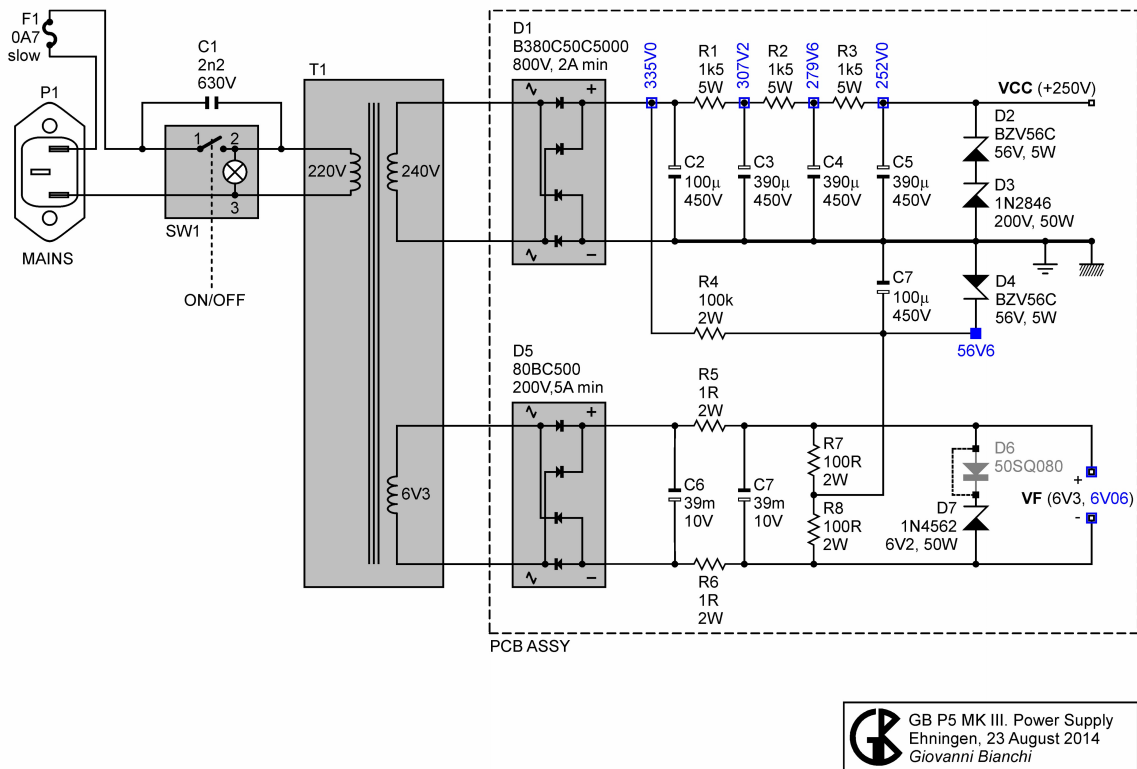


Figura 1. Schema elettrico dell'alimentatore.

Sezione anodica

Le figure 2 e 3 mostrano le forme d'onda calcolate delle tensioni ai capi di alcuni punti significativi dell'alimentatore anodico. Nei calcoli detti, la presenza dei diodi zener D2, D3 è ignorata. Si assume poi che la corrente assorbita sia quella effettivamente misurata (circa 8mA).

La curva nera continua mostra la tensione sul secondario di T1: 335.3V di picco, corrispondenti a 237.1V efficaci (240V nominali). La curva blu tratteggiata, ad essa parzialmente sovrapposta, sarebbe la tensione all'uscita di D1 se nessun altro componente fosse presente e il carico fosse applicato direttamente su detta uscita. In pratica abbiamo una sinusoide rettificata a doppia semionda, essendo trascurabile la caduta di tensione (0.7V circa, contro i 335.3V di picco della sinusoide) sui diodi. Le tensioni quasi-continue ai capi di C2, C3, C4, C5 sono rispettivamente rappresentate dalle curve magenta, nera, verde, rossa. Etichette del colore corrispondente sono inoltre presenti vicino alle corrispondenti curve.

La tensione su C2 (magenta) è la sola su cui si possa intravedere una qualche ondulazione, le rimanenti appaiono perfettamente piatte. Abbastanza ben visibile risulta invece il valore medio ai capi di ogni condensatore: su C2, C3, C4, C5 abbiamo rispettivamente 331.2V, 321.1V, 311.1, 301.0V. La tensione media su C2 è abbastanza vicina a quella di picco, le rimanenti calano

progressivamente, di 10.1 V, passando da C2 a C3, a C4, a C5. Ciò a causa della caduta di tensione su R1, R2, R3.

Il grafico di figura 3 mostra le stesse curve di figura 2, con una differente rappresentazione. C'è un diagramma per la tensione sul secondario di T1 e la corrispondente rettificata a doppia semionda. Ulteriori quattro diagrammi, uno per ciascuna curva, vengono usati per le forme d'onda della tensione su C2, C3, C4, C5. Ognuno di questi quattro diagrammi riporta anche il valore medio della curva rappresentata (linea tratteggiata) e i valori numerici del valore medio stesso e dell'ondulazione picco-picco. I cinque diagrammi di figura 3 condividono l'asse temporale (ascissa), gli assi y hanno invece scale differenti per rendere visibili le varie curve.

Si vede che, passando da C2 a C5, la tensione media si abbassa leggermente e l'ondulazione si riduce in misura molto maggiore. Abbiamo 0.51, 1.2×10^{-3} , 3×10^{-6} , 8.3×10^{-9} Vpp, su C2, C3, C4, C5 rispettivamente. Anche la forma d'onda tende sempre di più a una sinusoide a 100Hz.

Come spiegato in ogni buon testo di Elettronica, la tensione su C2 (V_{C2}) risulta dalla combinazione di carica e scarica. Il primo si ha quando il valore assoluto della tensione all'ingresso del ponte raddrizzatore supera V_{C2} , la scarica si ha nel caso opposto. Durante la carica, V_{C2} assume la forma di un tratto di sinusoide. Durante la scarica V_{C2} tende esponenzialmente a zero.

$$V_{C2,SCARICA}(t) = V_{C2,MAX} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

dove la costante di tempo vale

$$\tau = R_{LOAD} \cdot C_2 = (V_{C2}/I_{LOAD}) \cdot C_2 = (331.2/8 \times 10^{-3}) \cdot 100 \times 10^{-6} \cong 171 \text{ ms}$$

Essendo τ molto maggiore della distanza temporale tra due successivi picchi della tensione rettificata a doppia semionda (10ms), vale l'approssimazione

$$V_{C2,SCARICA}(t) \cong V_{C2,MAX} \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

La tensione su C2 è dunque una successione di tratti sinusoidali in salita (carica) e quasi rettilinei in discesa (scarica), è periodica con frequenza doppia rispetto a quella di rete. Sviluppando V_{C2} in serie di Fourier, si ottengono componenti alla frequenza fondamentale di 100Hz e ai suoi multipli interi. Le tre celle di filtro passa-basso RC R1-C3, R2-C4, R3-C5 attenuano progressivamente tutte le componenti armoniche, maggiormente quelle a frequenze più elevate. A ogni passo, la componente a 100Hz prende viepiù il sopravvento sulle armoniche di ordine maggiore, il che spiega la forma delle tensioni sui vari condensatori.

In aggiunta a questo, i due diodi zener D2, D3 (che equivalgono a un solo diodo con tensione di zener data dalla somma i quella dei due, dunque 256V), abbassano la tensione continua all'uscita intorno a 250V, diminuendo ulteriormente l'ondulazione.

Questo secondo effetto risulta superfluo, visto che anche senza zener, l'ondulazione sulla tensione anodica calcolata è appena 8.3nVpp, corrispondenti a meno di 3nV efficaci: molti ordini di grandezza meno del requisito b) (0.182mV). D2, D3 potrebbero venire eliminati. Contemporaneamente i valori di R1, R2, R3 andrebbero aumentati, per ottenere la caduta di tensione atta a ridurre i 331.2V su C2 sino a 250V. Con un assorbimento di 8mA, dovrebbe essere $R_1 + R_2 + R_3 = 331.2/8 \times 10^{-3} = 41400\Omega$. Mantenendo l'uguaglianza tra le tre resistenze, si avrebbe per ciascuna un terzo del valore precedente: $R_1 = R_2 = R_3 = 13.8k\Omega$. Il circuito risulterebbe più semplice, ma la sua impedenza dinamica di uscita equivarrebbe – circa – al parallelo tra R3 e C5: molto bassa alle alte frequenze, almeno fino alla risonanza di C5, ma crescente al decrescere della frequenza fino al valore asintotico di R3. Questo sarebbe in contrasto con il requisito c), dunque i diodi zener servono.

Quelli utilizzati sono presi da quelli disponibili. Quello che serve è un componente con tensione di zener intorno a 250V e potenza dissipabile non inferiore a 20W. Si può ottenere con uno, più dispositivi in serie (equivalenti a un solo diodo con tensione di zener data dalla somma i quella dei singoli diodi) o più dispositivi uguali in parallelo, come illustrato in seguito.

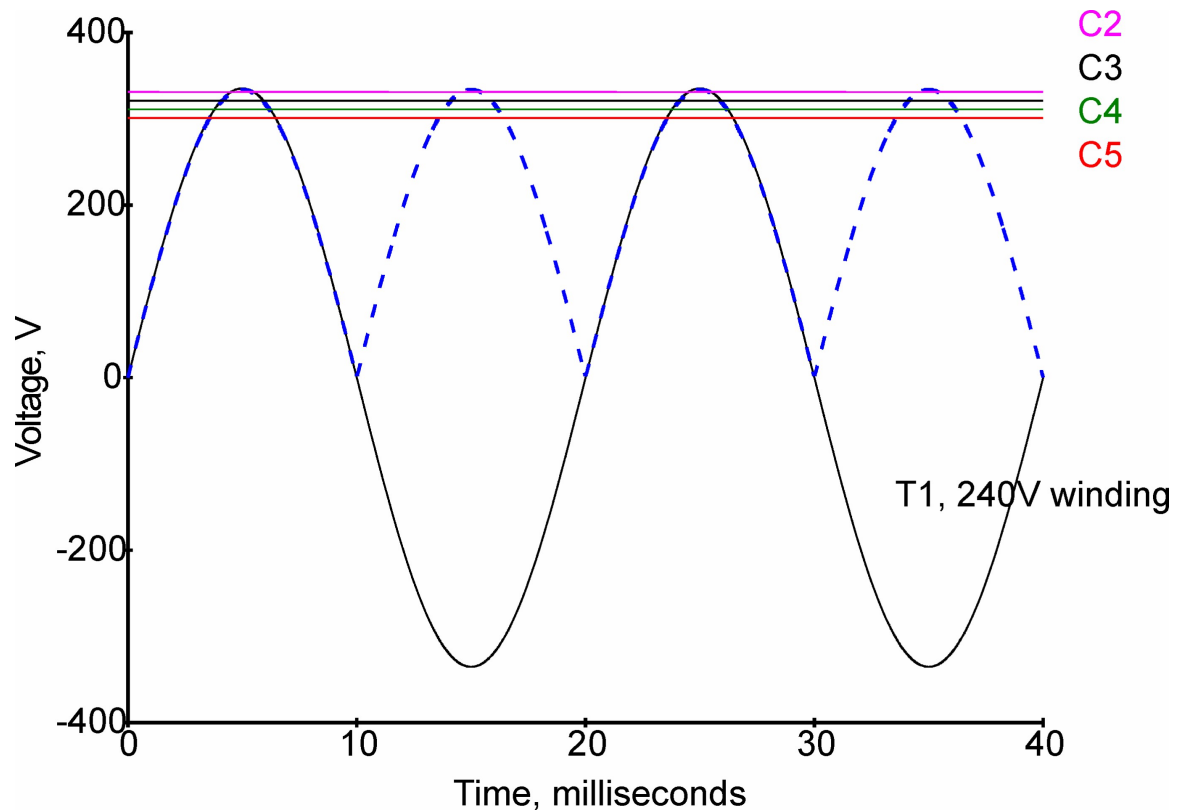


Figura 2. Forma d'onda delle tensioni presenti all'interno dell'alimentatore anodico. Uscita del secondario del trasformatore (curva nera continua), uscita del secondario del trasformatore, dopo raddrizzamento a doppia semionda senza condensatori di filtro (blu, tratteggiata), ai capi del primo, secondo, terzo e quarto condensatore di filtro (magenta, nera, verde, rosso, rispettivamente)

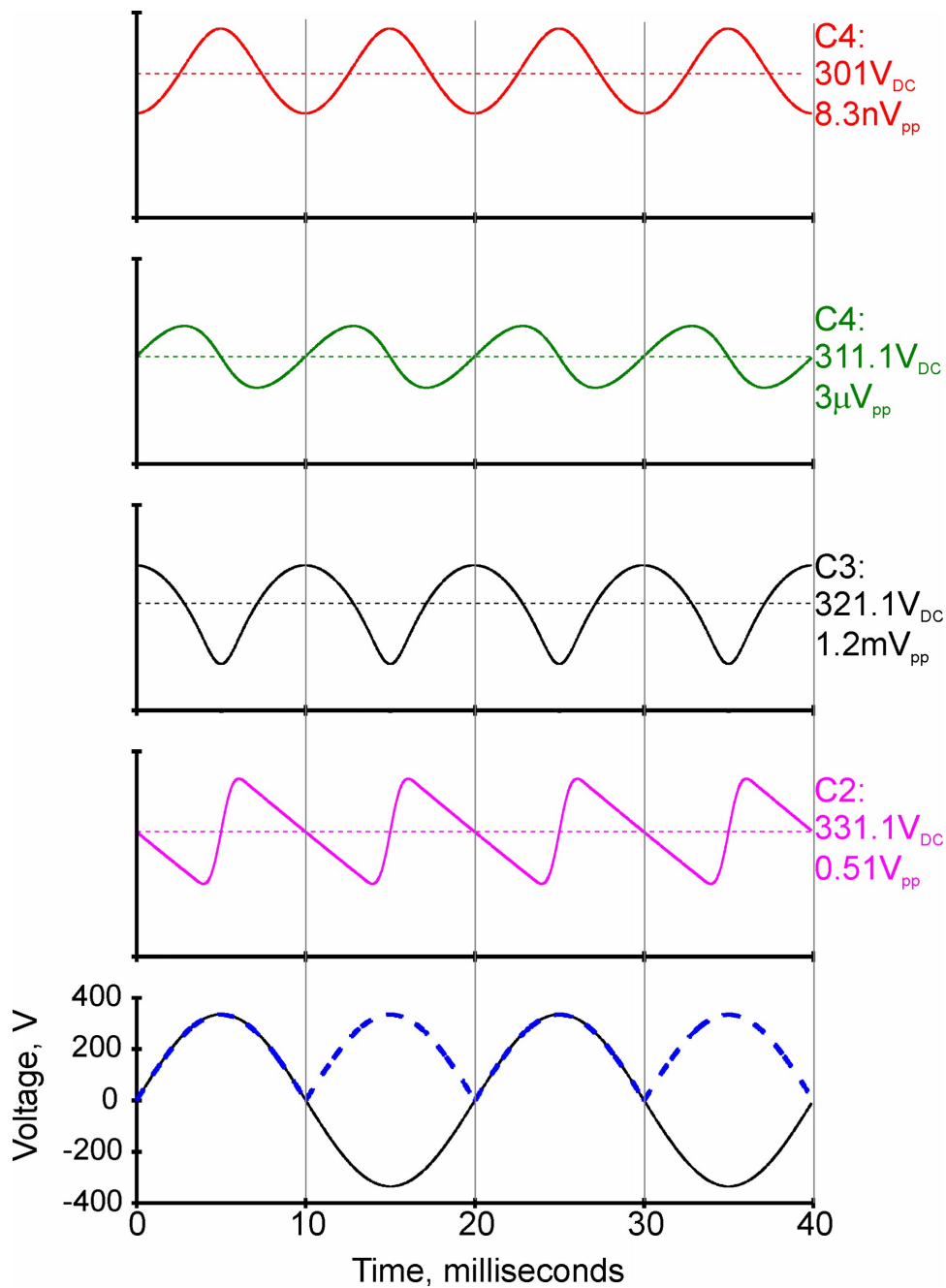


Figura 3. Forma d'onda delle tensioni presenti all'interno dell'alimentatore anodico: dettaglio sulle tensioni ai capi dei condensatori di filtro. Accanto a ciascuna di queste è riportato il valor medio e quello picco-picco dell'ondulazione presente. La scala sull'asse y di ciascuno dei 5 grafici sovrapposti è alterata per rendere visibile l'ondulazione sulle curve rappresentate. Uscita del secondario del trasformatore (curva nera continua), uscita del secondario del trasformatore, dopo raddrizzamento a doppia semionda senza condensatori di filtro (blu, tratteggiata), ai capi del primo, secondo, terzo e quarto condensatore di filtro (magenta, nera, verde, rosso, rispettivamente)

Sezione filamenti

Il trasformatore è del tipo usato per alimentare i filamenti in alternata, come testimonia la presenza di un avvolgimento secondario a 6.3V.

La soluzione adottata prevede invece il raddrizzamento a doppia semionda (ponte raddrizzatore D5), filtro capacitivo di ingresso (C6), filtro RC aggiuntivo (R5, R6, C7) e stabilizzazione con diodo zener (D7) con la possibile aggiunta di un ulteriore diodo in serie (D6). L'alimentazione dei filamenti in continua è preferita alla più semplice, in alternata, per 3 motivi

I. Minore possibilità di introdurre disturbi a frequenza di rete nel circuito attivo. Per quanto riferita a massa e bilanciata rispetto a questa, una tensione alternata di 6.3V efficaci, portata ai piedini delle valvole rischia sempre di accoppiarsi in qualche modo al segnale audio. Si genererebbe in tal modo un disturbo a frequenza di rete: 50Hz e armoniche, queste ultime particolarmente udibili e fastidiose.

II. Maggiore facilità di controllo del valore di tensione applicato ai filamenti. La tensione alternata di rete è quasi mai sinusoidale. La maggior parte dei voltmetri a disposizione dei dilettanti misura il valore medio efficace ($2/\pi$ volte il valore di picco), scalando il risultato per il fattore $2 \cdot \sqrt{2}/\pi$. Se - e solo se - la tensione misurata è sinusoidale, il valore visualizzato è quello efficace ($1/\sqrt{2}$ di quello di picco) che interessa. La tensione continua è - ovviamente - molto più facilmente e precisamente misurata e dunque, controllata.

III. Limitazione della sovrapotenza all'accensione. Con l'alimentazione in continua e soprattutto con la cella di filtro aggiuntiva (R5, R6, C7) è più facile ridurre l'eccesso di potenza assorbito dai filamenti (freddi) all'accensione. Un aiuto ulteriore a questo proposito è fornito dalla carica del condensatore C6 (come anche C2 dell'alimentatore anodico). Alla frequenza di 50Hz, C6 ha una reattanza $1/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_6) = 1/(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 39 \times 10^{-3}) \cong 0.082 \Omega$, quasi un cortocircuito. La corrente che il trasformatore dovrebbe fornire è solo limitata dalla resistenza serie del secondario in serie con quella dei diodi del ponte raddrizzatore D5: probabilmente meno di 1Ω . Occorrerebbero $V/R \cong 6A$ efficaci, pari a circa 8.5 A di picco. Il trasformatore non è in grado di fornire questa corrente: si "siede" per così dire, il nucleo raggiunge la saturazione e fornisce la corrente che può; cioè assai di meno. Per conseguenza, la tensione ai capi di C6 sale più lentamente di quanto farebbe collegando il secondario del trasformatore direttamente ai filamenti. A questo va aggiunto il fatto che C7 deve caricarsi attraverso R5, R6 che, a questo riguardo, operano come se fossero in serie. La costante di tempo di questo filtro RC è $\tau = (R_5 + R_6) \cdot C_7 = (1+1) \cdot 39 \times 10^{-3} \cong 0.078$ secondi. Ricordiamo che servono 1, 2, 3 costanti di tempo per raggiungere il 63.2, 86.5, 95% del valore finale, assumendo che la tensione su C5 salga

repentinamente all'accensione: il che, come si è appena visto, non è. La figura 4 mostra la potenza dissipata ($V \times I$) complessivamente dai filamenti delle due valvole dei due stadi attivi e dal diodo zener D7. Il picco vale 5.7W, solo 7.4% più del valore a regime di 5.3W. Il valore nominale delle sole valvole è $2 \times V \times I = 2 \times 6.3 \times 0.3 = 3.78W$. Va detto che la saturazione del nucleo, sposta lo stress all'accensione (o parte di esso) dalle valvole al trasformatore, il quale è tuttavia più robusto.

La funzione del diodo zener D7 e del diodo (cortocircuitabile) Schottky D6 è di stabilizzare la tensione generata. Più che di stabilizzazione si dovrebbe parlare di ridotta dipendenza dalla tensione di rete e dalla corrente effettivamente assorbita dalle valvole: che possono variare nel tempo e di caso in caso. Comunque, la stabilizzazione ottenibile con un diodo zener non è certamente paragonabile a quella fornita da un regolatore lineare. Inoltre, la tensione di zener ha una tolleranza non troppo stretta e dipende dalla temperatura (riscaldandosi si abbassa). Così il diodo D6 è presente sul circuito: il ponticello di cortocircuito, normalmente previsto, è eliminato se la tensione di uscita è troppo bassa. L'eliminazione di detto cortocircuito aumenta la tensione di uscita di 0.2-0.3V. I diodi D6, D7 potrebbero essere eliminati dal circuito, aumentando il valore di R5, R6 fino ad ottenere - per caduta - la richiesta tensione di uscita di 6.3V. Se entrambe le valvole fossero presenti e funzionanti, tutto filerebbe liscio. Se invece una delle valvole venisse tolta (o si bruciasse), la corrente assorbita dimezzerebbe (circa, le due valvole non sono mai identiche), la caduta di tensione anche. Ne risulterebbe una tensione più alta del dovuto sulla valvola rimasta, che ne avrebbe a soffrire. Sul diodo zener D7, a regime, scorre una corrente misurata di 270mA. Se entrambe le valvole fossero rimosse, la corrente salirebbe a 870mA. Essendo la tensione nominale ai suoi capi di 6.3V, la potenza dissipata risulterebbe nei due casi di 1.701W e 5.481W. Per essere tranquilli sull'affidabilità serve una potenza nominale da due a quattro volte tanto. Esistono commercialmente diodi zener da 5W, 10W, 20W e 50W. Il primo è insufficiente, gli altri di difficile reperibilità, il secondo è inoltre marginale. Quando un diodo zener da 20W (o meglio ancora 50W, come usato in questo caso) non fosse reperibile lo si può sostituire con molti diodi) - di potenza inferiore, tutti nominalmente uguali - in parallelo; come illustrato in figura 5. La potenza totale è all'incirca equivalente alla somma di quelle dei singoli diodi. I resistori RX in serie a ciascun diodo della combinazione servono a equilibrare la corrente sui vari diodi. Senza RX, la corrente scorrerebbe quasi tutta sul diodo a tensione di zener più bassa, vanificando la presenza degli altri. Grazie alla caduta di tensione sul resistore corrispondente (detto di zavorra o di "ballast", in inglese) a maggiore corrente (dovuta a minore tensione di zener) corrisponde maggiore caduta di tensione e dunque minore tensione ai capi del singolo diodo zener. Ne risulta un freno all'aumento di corrente sui diodi a minore tensione di zener, che equilibra in qualche modo la ripartizione di

corrente. La resistenza dei resistori di zavorra dovrebbe essere di qualche decimo di Ohm.

I due resistori R7, R8 collegano ciascuno dei capi della tensione di filamento, non a massa, come descritto in e), ma a una tensione ottenuta da quella anodica e stabilizzata da un diodo zener al valore misurato di 56.6V (R4, C7, D4). La tensione dei filamenti è sollevata rispetto a massa del valore costante detto. Ora, il catodo¹ della prima (seconda) valvola dello stadio attivo è a +22.75V (+94.4V) rispetto a massa. Allora la tensione filamento catodo della prima (seconda) valvola è $56.6 - 22.75 = 33.85\text{V}$ ($56.6 - 94.4 = -37.8\text{V}$). Entrambi i valori sono molto al di sotto dei 180V considerati massimi nel foglio tecnico Philips del 1968, citato anche nella precedente puntata.

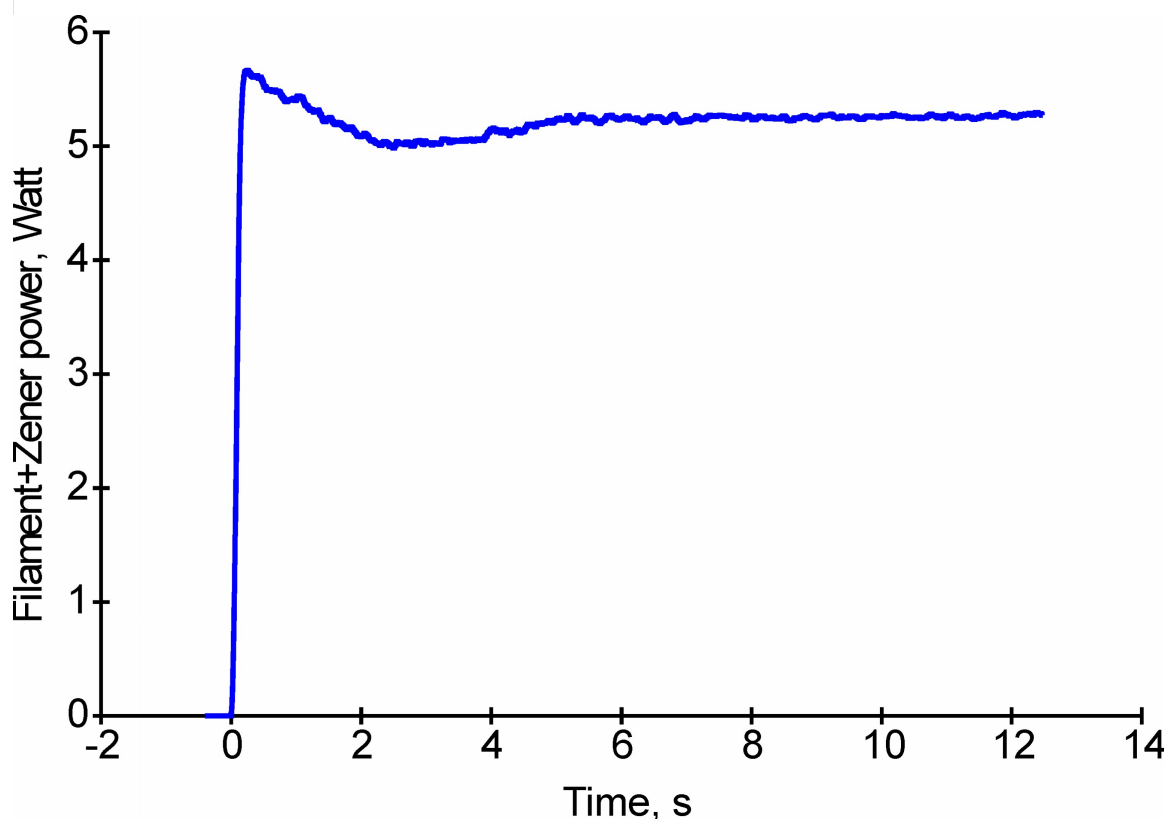


Figura 4. Transitorio di accensione: potenza dissipata complessivamente dai filamenti e dal diodo zener ad essi in parallelo in funzione del tempo.

¹ Valori medi tra quelli misurati per i due canali

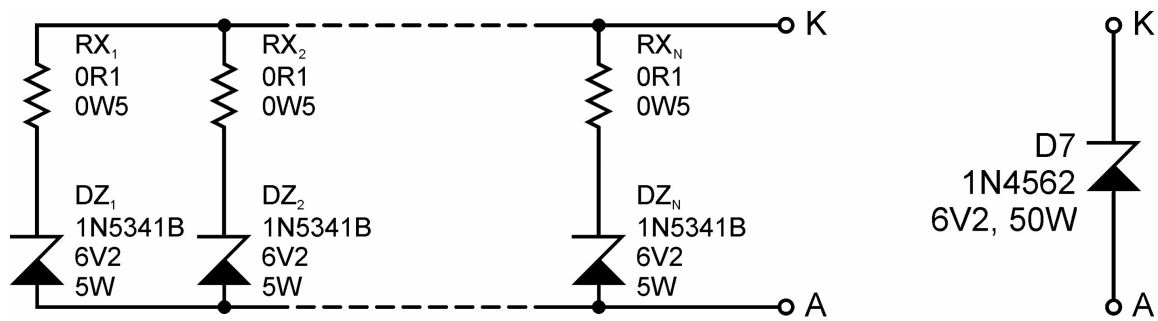


Figura 5. Possibile sostituzione di un diodo zener di elevata potenza (50W in questo caso) con più diodi di minore potenza (5W) in questo caso.

Soluzioni alternative

Si potrebbero fare altre scelte, come

- 1) Eliminare ogni forma di stabilizzazione. Rimuovere i diodi zener è possibile, sia nell'alimentatore anodico che in quello dei filamenti, come discusso nei rispettivi paragrafi. Pro e contra sono quelli detti.
- 2) Utilizzare circuiti attivi per la stabilizzazione. Tipicamente questo significa regolatori lineari di tipo serie. Si conseguirebbero due vantaggi: elevata precisione delle tensioni generate (2a) e possibilità di accensione graduale (soft start) per i filamenti, con minima complicazione aggiuntiva (2b). L'inconveniente principale deriva dal fatto che la tensione di ingresso del regolatore serie è più alta di quella di uscita. Se il transistor di potenza dovesse bruciarsi, si avrebbe eccesso di tensione all'uscita (2c). Questo sarebbe particolarmente pericoloso per i filamenti.
- 3) Utilizzare un diodo a valvola nell'alimentatore anodico. Si avrebbe maggior costo, maggiore complicazione e nessun vantaggio minimamente apprezzabile. Da scartare.
- 4) Utilizzare alimentatori a commutazione ("switching-mode"). All'estremo opposto rispetto a 3). Sarebbe una soluzione molto critica, per i segnali ad alta frequenza e ripidi fronti generati: quasi impossibile evitare accoppiamenti con il segnale di uscita e inquinamenti anche molto subdoli. Da scartare.