



Theremino

UN LIMITATORE DI CORRENTE CON FOLDBACK

22 December 2016

Descrizione

Questo articolo descrive un limitatore di corrente progettato per proteggere dispositivi connessi alle porte USB dei computer. Il limitatore non serve, come alcuni potrebbero pensare, per proteggere il computer (*Nota 1*), ma per proteggere i circuiti alimentati che, in caso di errori o difetti, potrebbero scaldare molto e in alcuni casi anche prendere fuoco. Questo pericolo era già presente con le USB2 (500 mA) e si è aggravato di molto con l'introduzione delle USB3 che forniscono fino a 3 Ampere.

Inoltre non tutti i dispositivi necessitano di tutta la corrente disponibile ed è bene limitarli con una corrente più bassa per non rischiare di far intervenire la protezione della porta USB. Se interviene la limitazione del PC la comunicazione USB si interrompe e un eventuale micro ad essa collegato si reinizializza. Abbiamo quindi preparato cinque versioni del limitatore con componenti ottimizzati per i livelli di corrente più comuni. I primi tre con componenti tradizionali e gli altri due con componenti a montaggio superficiale.

(Nota 1) Tutte le porte USB sono autoprotette, dispongono di un misuratore di corrente e si disabilitano quando si supera la corrente massima.

Soluzioni circuitali

Una comune e banale soluzione è quella adottata da Arduino e cloni: un fusibile ripristinabile "PolySwitch". Questo nome altisonante non è altro che un grezzo PTC.

Perché grezzo? Un PTC non fa il suo dovere di "fusibile ripristinante"?

Se quello che si desidera è di scrivere nelle caratteristiche del prodotto che c'è il limitatore di corrente allora un PolySwitch va benissimo. Si va sulla tabella si individua il modello con la corrente desiderata e la progettazione è finita. Ma se si indaga più a fondo si scopre che il PolySwitch (come qualunque altro PTC) lavora "per temperatura". Cioè si scalda a causa della caduta di tensione ai suoi capi, moltiplicata per la corrente che lo attraversa, e arrivato a una certa temperatura sale di resistenza e quindi limita la corrente.



PolySwitch_RGEF500.jpg

Questo è un funzionamento molto rozzo, per vari motivi:

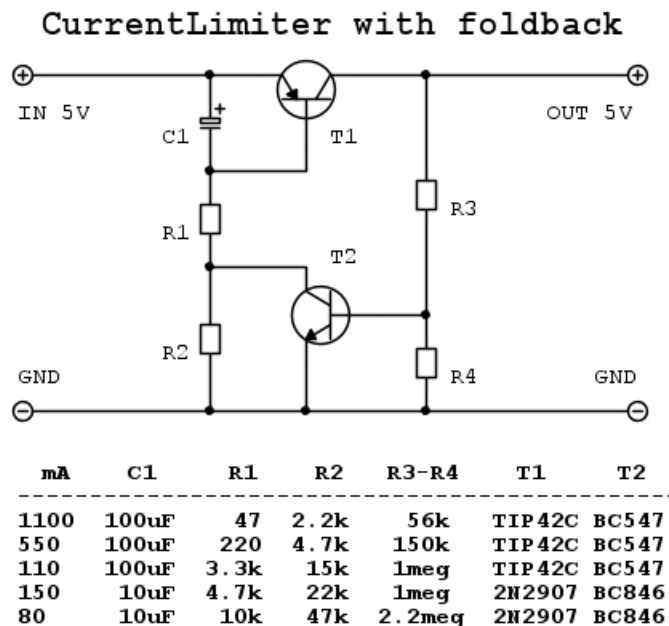
- C'è un progressivo aumento della caduta di tensione e in prossimità della corrente massima la caduta di tensione arriva ad alcuni Volt. Questo effetto è inevitabile perché è necessario per produrre dissipazione e quindi un innalzamento di temperatura, la quale alla fine farà alzare la resistenza del componente.
- La limitazione di corrente è ritardata in modo intollerabile. Per alcuni secondi, nell'attesa che il componente si scaldi, non c'è limitazione e in questo tempo i componenti attivi dei circuiti che seguono hanno tempo di distruggersi. Per molti di loro bastano pochi millisecondi. Ad esempio un RKEF050 da 500 mA (corrente classica per la USB2) lascia passare oltre 5 Ampere per un secondo prima di interrompere il circuito.
- Quando la corrente è in prossimità della corrente massima, o la supera, i PolySwitch scaldano molto e alla lunga cuociono il PCB e abbreviano la vita di eventuali elettrolitici che si trovano nelle vicinanze.

E infine, un PolySwitch da 500 mA su un Arduino da collegare a una USB2 che è già di per se protetta a 500 mA è del tutto inutile. Può servire a livello di marketing per dare l'idea di "prodotto sicuro" ma non protegge niente e non è buona progettazione.

Una alternativa più efficiente

Questo circuito è inedito, non se ne trovano altri con caratteristiche paragonabili. Meriterebbe un nome suo come lo hanno il "Colpitts oscillator" o il "Trigger di Schmitt", e forse col tempo comincerà a girare con il nome "Theremino Limiter". Già ora cercando su Google "limitatore di corrente" lo si trova tra le prime immagini.

Esistono altri schemi di limitatori, ma sono più complessi e hanno caratteristiche inferiori. Praticamente nessuno degli schemi "classici" ha il funzionamento a "foldback" (*Nota 1*) per cui quando iniziano a limitare scaldano in modo esagerato e richiedono un enorme dissipatore. Leggere ad esempio queste ["disavventure di ludzinc"](#).



PCB, schemi e simulazioni nelle pagine:

<http://www.theremino.com/hardware/adapters#limiter>

<http://www.theremino.com/hardware/adapters#limitersmd>

Particolari benefici di questa configurazione circuitale:

- Bassa caduta di tensione anche in prossimità della massima corrente.
- Punto di scatto poco influenzato dalla temperatura e dai parametri dei componenti (*Nota 2*).
- Funzionamento a "foldback" (*Nota 1*).
- Bassa dissipazione a causa della bassa caduta di tensione.
- Bassa dissipazione anche nella zona di protezione (*Nota 1*).
- Topologia senza incroci che permette una facile disposizione dei componenti e una costruzione "planare" su singolo strato (*Nota 3*).

(*Nota 1*) "Foldback" significa che superata una certa corrente la tensione di uscita si abbassa quasi a zero e che quando si rimuove il carico eccessivo la tensione di uscita si ripristina automaticamente. Il "foldback" è in pratica una zona di resistenza negativa. Un circuito con buone caratteristiche di foldback ha una bassa caduta di tensione in tutta la zona utile, una bassa corrente nella zona di protezione e un punto di transizione ben definito.

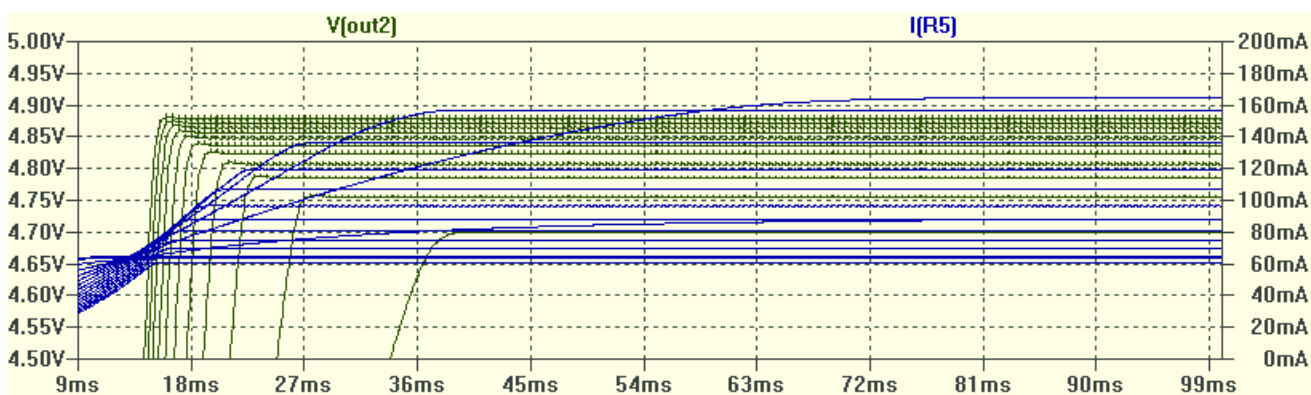
(*Nota 2*) Il punto di scatto dipende sia dalla temperatura che dal beta dei transistor. Quindi è bene utilizzare BC547B e BC846B che hanno un ristretto campo di variazione del parametro beta (il guadagno in corrente). Comunque questo circuito è stato ottimizzato in modo da ridurre l'influenza del beta sul punto di scatto. Le sue variazioni sono adeguate allo scopo di questi circuiti che è di sostituire un PolySwitch.

(Nota 3) Per vedere cosa intendiamo con "costruzione planare" e per farsi una idea di come utilizziamo questo circuito nel sistema theremino è bene leggere le [pagine da 20 a 24 di questo file PDF](#).

Caratteristiche

- Caduta di tensione minore di 150 mV fino alla corrente massima.
- Corrente di corto circuito intorno al 15-20% della corrente massima.
- Tempi di intervento e di ripristino nell'ordine delle decine di millisecondi.
- Dissipazione nella zona di foldback da circa 80 mW (versione da 80 mA) fino a circa 900 mW (versione da 1100 mA).

Ottimizzazione



LimiterStartupTime.png

Questa è una delle "famiglie di curve" che abbiamo utilizzato durante la progettazione. In questo caso la caduta di tensione è ancora alta (fino a 350 mV) ma nelle ultime versioni siamo riusciti a stare sempre sotto ai 150 mV.

Il processo di ottimizzazione di un circuito del genere non può essere eseguito risolvendo una formula analitica e generando un valore. Gli obiettivi da ottimizzare sono numerosi e migliorando uno di essi si peggiorano gli altri. Per cui solo l'intuito umano che lavora in simbiosi con un simulatore numerico può ottenere una buona ottimizzazione dei valori dei componenti.

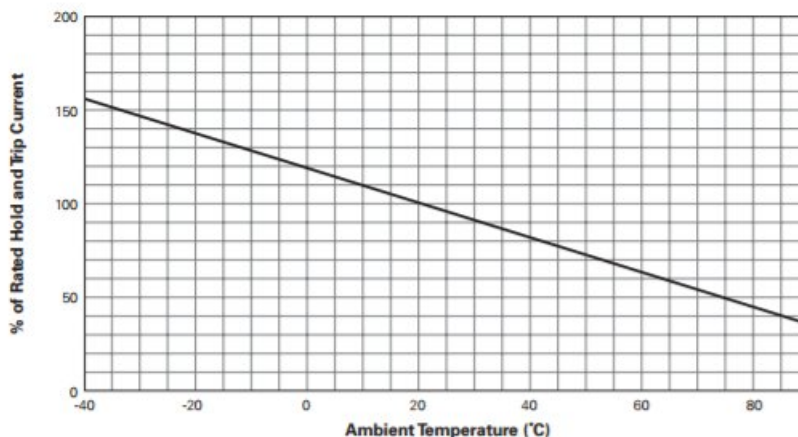
Stabilità delle caratteristiche

Questo circuito, come tutti i circuiti basati sui BJT usati in zona lineare, varia le sue caratteristiche di lavoro al variare delle caratteristiche dei transistor, principalmente il guadagno in corrente e la tensione base emettitore. Queste caratteristiche a loro volta cambiano da un transistor all'altro ed anche con la temperatura. Abbiamo quindi attentamente ottimizzato i valori dei resistori in modo da ottenere un bilanciamento tra le tendenze "a salire" e quelle "a scendere", sia per le variazioni di temperatura che di Beta. Ripetendo moltissime simulazioni con transistor di guadagno diverso e confrontando i risultati con i circuiti di test, abbiamo quindi ottenuto una stabilità sufficiente per gli usi a cui questo circuito è destinato e rispettando i limiti progettuali (mantenere il circuito semplice e facile da costruire anche per i Makers).

La versione meglio ottimizzata e testata è quella da 80 mA, della quale sono stati prodotti un gran numero di esemplari, perché è utilizzata per alimentare il [generatore di alta tensione](#) dei tubi foto-moltiplicatori per la [Spettrometria Gamma](#).

Quale è la stabilità che si richiede? Se si tratta solo di fare meglio dei PolySwitch allora basta niente, dato che essi arrivano a correnti anche **dieci volte maggiori** di quella nominale prima di interrompersi e che dipendono dalla temperatura in modo esagerato.

Nella immagine seguente si vede quanto cambia il punto di scatto dei PolySwitch al variare della temperatura.



PolySwitch - Trip point versus Temperature

Determinare limiti realistici

Per determinare la stabilità del punto di scatto che serve realmente si devono fare alcune considerazioni di contorno.

- 1) Un limitatore va dimensionato per una corrente più grande di quella assorbita dai circuiti da proteggere nelle condizioni peggiori. Per stare sul sicuro è bene applicare una abbondante "costante dell'ingegnere" e dimensionarlo per una corrente doppia.
- 2) I circuiti che si realizzano vanno sempre provati. Lo si fa anche con quelli digitali che per loro natura non dipendono dal beta dei transistor, ma a maggior ragione lo si fa con circuiti lineari come questo.
- 3) Si deve stabilire un range di tolleranza per le caratteristiche importanti, in questo caso il punto di scatto, che potrebbe essere del $\pm 30\%$.
- 4) Si deve stabilire una percentuale di accettabilità per i circuiti difettosi. Normalmente nella produzione industriale una percentuale di scarti intorno all'uno per cento è già considerata molto buona.
- 5) Nella eventuale analisi della possibile difettosità (analisi di montecarlo o simili) si nota che i casi di caratteristiche estreme sono ai limiti della gaussiana e quindi sono percentualmente molto pochi.
- 6) Nei data sheet dei transistor (con estensione B) il massimo Beta è circa il doppio del minimo. Però nella realtà quasi tutti i transistor hanno un beta molto simile. Soprattutto se fanno tutti parte dello stesso lotto e se ne misurano alcuni prima di avviare la produzione.

In base alle precedenti considerazioni e alle statistiche della produzione, questo circuito è abbastanza stabile ed è realizzabile senza particolari accorgimenti (ad esempio selezionare i transistor). Noi del sistema Theremino non abbiamo rapporti commerciali con i produttori ma è naturale che, essendo i progettisti, ci facciano pervenire report e commenti (in cinese, ma ci si capisce lo stesso).

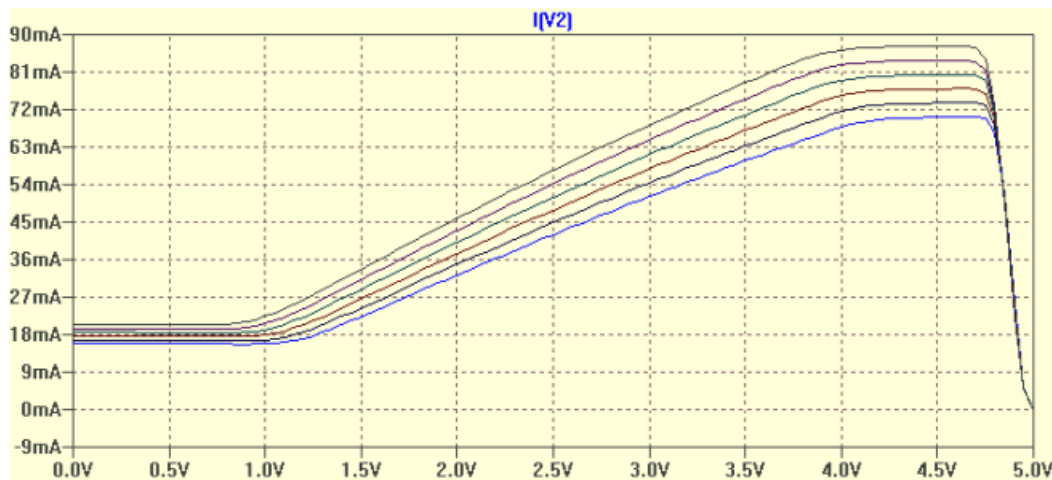
Stabilità nei casi reali

In questo capitolo parleremo solo della versione da 80 mA perché è la più interessante nel caso di piccoli circuiti di input output di cui il sistema theremino si occupa. Ad esempio preamplificatori per i sensori e altri piccoli adattatori che generalmente consumano meno di 10 mA o al massimo fino a 30 mA nei casi peggiori (alimentatore dell'alta tensione dei tubi fotomoltiplicatori).

Per vedere come lo utilizziamo è bene leggere le [pagine da 20 a 24 di questo file PDF](#).

Per ottenere un'ottima precisione e stabilità basta provare il circuito, applicando due resistori in uscita oppure un potenziometro. Nella gran parte dei casi la corrente di scatto dovrebbe essere giusta. Negli altri casi basta ritoccare R1 oppure cambiare il 2N2907 con uno che abbia il beta più vicino alla media.

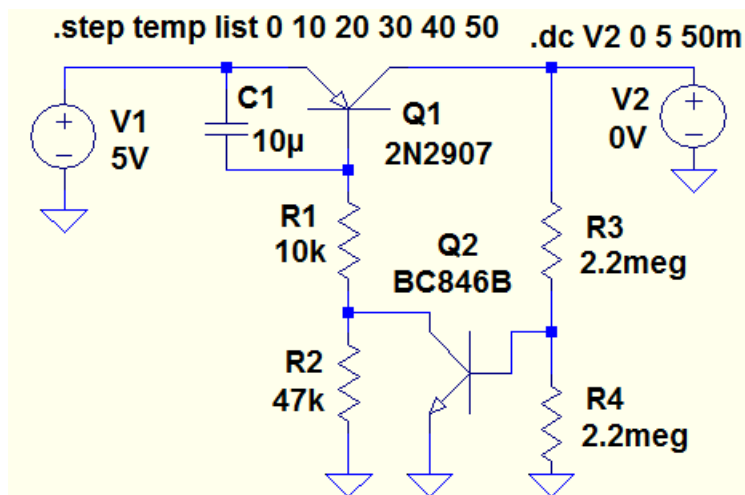
Il beta dei transistor non cambia nel tempo per cui una volta ottenuto il punto di scatto a 80 mA le uniche variazioni saranno dovute alla temperatura. E sono variazioni tollerabilissime, come visibile nella prossima immagine.



Limiter_80mA - Variazioni dovute alla temperatura da 0 a 50 gradi

Il punto di scatto varia da 71 mA a 88 mA per una variazione di temperatura da 0 a 50 gradi centigradi. Si tratta solo di circa il 10% in più o in meno rispetto agli 80 mA nominali. Questo non è un errore delle simulazioni, la abbiamo verificato in pratica misurandola nella zona da 20 a 50 gradi, come si fa? Prima si misura a temperatura ambiente, poi si mette tutto in una scatola con un termometro e si scalda con un phon.

Nella immagine seguente si vede lo schema da cui abbiamo ricavato la curva di variazione.



Limiter_80mA_Schematics_TempOnly.png

Alternative possibili

Nel thread [Analisi del limitatore di corrente Theremino](#), il grande [IsidoroKZ](#) ha presentato una lucida analisi sui difetti di questo limitatore. Tra i pregi del suo lavoro c'è la simulazione LTspice che si avvale di un generatore di tensione variabile e semplifica notevolmente le simulazioni (noi usavamo un metodo più ruspante che richiedeva molto più tempo e molte noiose operazioni manuali).

La sinergia creata dai post di IsidoroKZ ha prima prodotto idee irrealizzabili, troppo complesse (usare operazionali) o non funzionanti (aggiungere un resistore), ma alla fine è saltata fuori un'ottima soluzione (proposta da [Area51](#) nel post 24), utilizzare integrati monolitici progettati appositamente per fare da limitatore. Il secondo e il terzo non vanno bene (correnti troppo alte) ma il primo (RT9728A) assolve egregiamente il suo compito.

Non elimineremo lo stesso la nostra versione a componenti discreti che ha comunque i suoi vantaggi:

- Costruibile in pochi minuti con quello che si ha nei cassetti.
- Ritoccando R1 negli esemplari fuori caratteristiche poi il punto di scatto è altrettanto e anche più preciso di quello dello RT9728A. Infatti si legge a pagina 9 del suo data-sheet che quando lo si predispose per 75 mA la sua effettiva corrente può cambiare da 50 a 100 mA a meno di tarare individualmente i circuiti uno per uno.
- Facile reperibilità dei componenti per chi deve comprarli. Purtroppo questi integrati non si trovano da RS e nemmeno da Mouser (che di solito ha sempre tutto) e neanche su eBay. Li si trovano da Farnell ma possono comprarli solo le ditte con partita IVA.

Per cui i nostri lettori, che in gran parte sono appassionati di elettronica fai da te, non potrebbero acquistarli. Infine da Farnell un pezzo costa circa dieci euro (0.4 Euro + IVA + Spedizione) non è una gran cifra ma la gran parte dei nostri lettori preferirebbero farselo su un pezzetto di millefori con quello che hanno già (vedere le [pagine da 20 a 24 di questo file PDF](#)). E lo avrebbero subito, senza aspettare il corriere.

- Saldabilità più facile per i makers fai da te. Lo RT9728A è troppo piccolo per saldarlo su un millefori.
- Possibilità di ottenere una efficiente azione di filtraggio sulla tensione della USB che su alcuni computer è molto rumorosa. Come fa questo circuito a fare anche da filtro? I disturbi della USB sono spesso dei "buchi di tensione" e quindi basta avere un elettrolitico un po' grande dopo al limitatore che i buchi li assorbe lui. Il tutto va molto meglio degli induttori perché quando la tensione manca il transistor PNP tende ad aprirsi e non scarica il condensatore verso il PC. Per ottenere la stessa attenuazione del rumore di alimentazione ci vorrebbero induttori troppo grandi per stare nel piccolo spazio disponibile. Per capire meglio è bene leggere le solite [pagine da 20 a 24 del file PDF](#).

Lo RT9728A è sicuramente superiore in alcuni casi. Vedremo di parlarne con i cinesi che, se possibile, li metteranno su thereminostore, dove poi si potrebbero acquistare per circa un Euro, spedizione compresa.

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Theremino:un-limitatore-di-corrente-con-foldback>"