

Fotocopiato in proprio, distribuito gratuitamente, è gradita la collaborazione dei lettori - Il N. 20 è stato inviato a 20 lettori
Redazione: Ezio Mognaschi, v.le Gorizia, 63 - 27100 Pavia PV, tel. 0382 539522, posta elettronica: mognaschi@fisicavolta.unipv.it

Hanno collaborato a questo numero: L. Cobisi, F. Giannetti, M. Mellere, S. Meloni, E. Mognaschi, P. Pensa, D. Pieracci, ed altri.

Sommario: □ Notizie p. 1, □ Demodulazione, p. 1-5; □ Esempio pratico di rettificatore di precisione, p. 6.

Notizie: * Si noti la variazione dell'indirizzo di posta elettronica, dovuta al cambiamento di *server*.

* Il 27 e 28 gennaio 2001 a Novegro (MI), vicino all'aeroporto di Linate, 19ª edizione di Radiant, rassegna del radiantismo: apparati e componenti per telecomunicazioni, ricetrasmittenti, elettronica, computer, corredi kit per autocostruzioni, apparati radio e telefonici, antenne, valvole, surplus, strumentazioni elettroniche.

* P. Pensa segnala i siti <http://www.qsl.net/vk2zto> e <http://www.zeta.org.au/~ollaneg>, di Steve Olney, VK2ZTO, che trattano di correnti telluriche, ELF, VLF, ULF.

* L'appello sul monitoraggio della stazione OM di San Remo, contenuto nel precedente numero di *Radioonde*, è stato raccolto da diversi radioappassionati. M. Mellere comunica di aver ricevuto conferma dalla sede RAI di Genova che l'antenna CFA di San Remo è attualmente in funzione. L. Cobisi ha ricevuto la stazione da Prato tra le 11.00 e le 11.20 ora italiana del 6.12.00 (SINPO 35343), ha inoltre interessato al monitoraggio diversi amici toscani, ecco cosa hanno riferito. Di giorno e quando, sulla stessa frequenza, non è attiva né RFE, né VoA dall'Ungheria, San Remo è stata ricevuta da F. Giannetti con segnale comprensibile a Forte dei Marmi (distanza ~ 200 km sul mare), così pure D. Pieracci, a Pontedera (con ~ 30 km di percorso su terra, oltre a ~ 200 km su mare). S. Meloni ha ricevuto il 10.12.00 alle 12.15 il GR regionale della Liguria, su 1188 kHz, a S. Croce sull'Arno con segnale debole, ma comprensibile e senza disturbi.

Demodulazione

di E. Mognaschi

2b. Circuiti di demodulazione (continua dal N. 20)

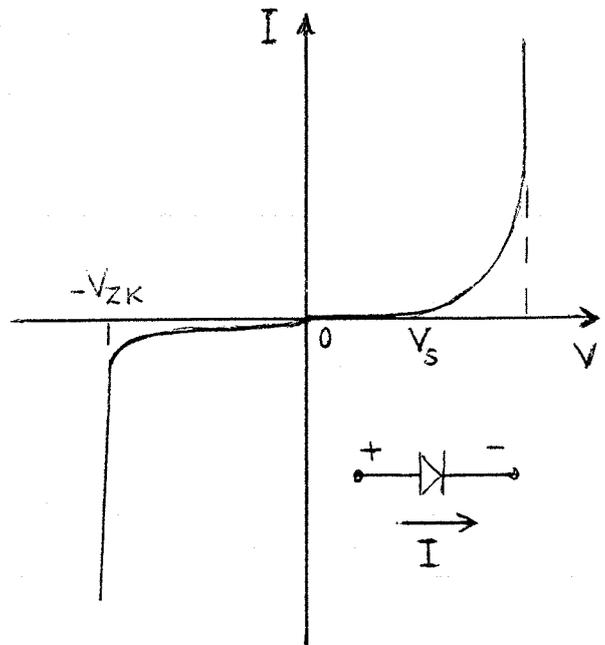
Nei diodi a giunzione la curva caratteristica (non lineare) della corrente I in funzione della differenza di potenziale applicata V ($V > 0$ polarizzazione diretta, $V < 0$ polarizzazione inversa) è ottenibile da un preciso modello fisico e pertanto, invece di ricorrere al generico sviluppo in serie (8) (v. *Radioonde* N. 20), si può scrivere l'espressione analitica della curva caratteristica che, nel caso considerato, ha la forma:

$$I = I_s [\exp(eV/k_b T) - 1] \quad (8)$$

ove I_s è una costante che dipende dai parametri costruttivi del diodo e contiene sia il contributo della corrente dovuta agli elettroni, sia quello dovuto alle buche, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C è la carica elettrica dei portatori, $k_b = 1.39 \times 10^{-23}$ JK⁻¹ è la costante di Boltzmann e T la temperatura assoluta del dispositivo (T in K = 273.15 + temperatura in °C).

Con riferimento alla caratteristica del diodo nella regione di polarizzazione diretta, si osserva che la corrente è trascurabile per valori di tensione minori di circa 0.5 V, per i diodi al germanio e di circa 0.7 V per quelli al silicio. Questo valore è indicato come "tensione di soglia" V_s . Una vera e propria soglia nella caratteristica non esiste, è semplicemente conseguenza dell'andamento esponenziale della curva caratteristica, cioè la corrente è praticamente trascurabile, ma non nulla, sino a circa V_s , ed il diodo, praticamente, non conduce. La corrente aumenta poi molto rapidamente all'aumentare di V al di sopra di V_s .

Inoltre, per $V < 0$ (polarizzazione inversa) la corrente è praticamente trascurabile sino alla tensione di breakdown V_{zk} ($ZK = Zener\ knee$) ed aumenta fortemente per $V < V_{zk}$.



Curva caratteristica di un diodo a stato solido.

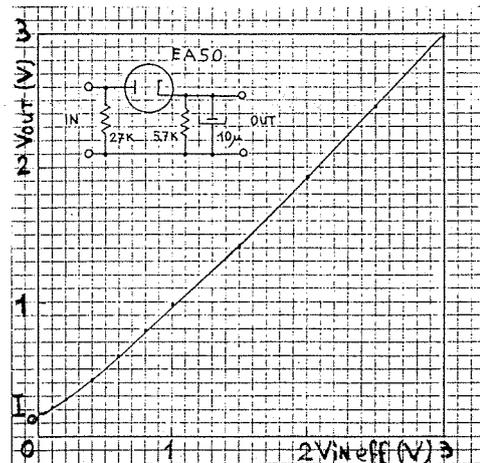
Come conseguenza del fatto che la corrente è praticamente trascurabile sino a circa 0.5 V, si ha che un diodo, inserito in un circuito e polarizzato direttamente, presenta una caduta di potenziale di circa 0.5 V ai suoi capi, indipendentemente dalla corrente che lo attraversa. Questo fatto non è pregiudizievole per il funzionamento dei rettificatori che, usualmente, lavorano con differenze di potenziale di parecchi volt, ma non è così nel caso della rivelazione di piccoli segnali, minori di 0.5 V.

Esistono diverse possibilità per superare questo ostacolo: innanzi tutto, come già visto, è spesso possibile amplificare il segnale prima della rivelazione, in modo da disporre di segnali maggiori della tensione di soglia; quando ciò non sia possibile, o desiderato, si può sommare al piccolo segnale da rivelare una differenza di potenziale costante di circa 1 V, in modo da far lavorare il diodo al di sopra della tensione di soglia. Questa soluzione comporta, tra l'altro, l'inconveniente di sommare al segnale da rivelare (ed al suo rumore) il rumore della sorgente di ddp costante, il che, per piccoli segnali, potrebbe non sempre essere opportuno. Un'altra possibilità è offerta dall'uso di diodi di tipo Shottky, detti "zero bias" o "low threshold", ossia a bassa soglia o che non richiedono polarizzazione. Purtroppo questi diodi sono molto costosi e difficilmente reperibili. Vengono impiegati solamente nelle sonde a larga banda per la misura dell'intensità di campi elettromagnetici. In questo caso, essendo anche l'amplificazione costosa, è preferibile rivelare il segnale con un diodo Shottky, piuttosto che amplificarlo prima della rivelazione con un diodo normale.

Nei demodulatori a tubo termoionico la curva caratteristica (non lineare) della corrente I in funzione della ddp applicata V , nella regione di carica spaziale, cioè per tensioni applicate non troppo grandi e $V > 0$, è

$$I = I_0 + k \sqrt{(2e/m)} V^{3/2} \quad (9)$$

La (9) rappresenta la *legge di Langmuir-Childs* o *legge dei tre mezzi* e può essere ottenuta con semplici considerazioni elettrostatiche. I_0 rappresenta la corrente, non trascurabile, presente anche in assenza di ddp tra catodo ed anodo, dovuta all'energia cinetica non nulla degli elettroni che escono dal catodo; mentre k è una costante caratteristica della geometria della valvola, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C ed $m = 9.110 \times 10^{-31}$ kg è la massa dell'elettrone. Per $V < 0$ la corrente è trascurabile. Al contrario del diodo a stato solido, non solo non esiste una "soglia" per il segnale applicato, ma addirittura esiste una corrente anche in assenza di segnale.



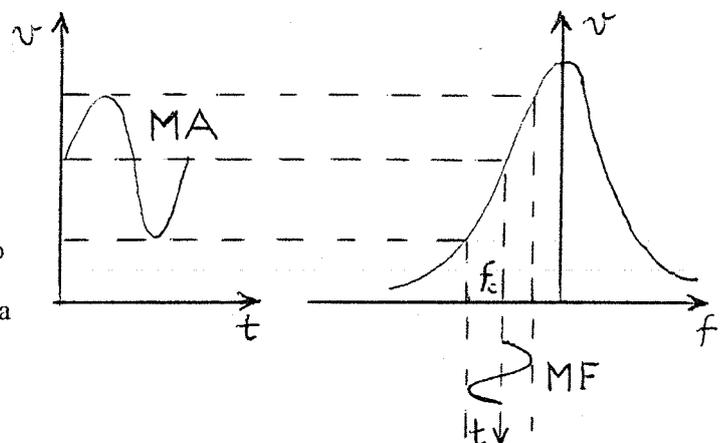
Caratteristica di trasferimento di un rettificatore con diodo a vuoto EA50.

Sia nel caso dei diodi a stato solido, sia nei diodi termoionici la caratteristica non lineare che interessa per la demodulazione (ed anche per la rettificazione) è la brusca variazione di pendenza della curva caratteristica nei pressi dell'origine, mentre la non linearità della restante parte della curva caratteristica, presente nel primo quadrante, produce una indesiderata distorsione del segnale.

Dopo aver visto le principali caratteristiche di alcuni circuiti di demodulazione per segnali modulati in ampiezza, (v. *Radioonde* N. 20) passiamo a considerare la demodulazione dei segnali modulati in frequenza.

Per demodulare un segnale in MF, il metodo generalmente usato è di convertire dapprima dalla modulazione di frequenza a quella di ampiezza e poi di demodulare il segnale, modulato in ampiezza, con i metodi visti precedentemente. Il circuito usato per effettuare la conversione è detto *discriminatore*. Esistono diversi tipi di circuiti discriminatori. Ne considereremo qualcuno in dettaglio.

Il più semplice circuito discriminatore è formato da un normale circuito risonante sintonizzato ad una frequenza f_0 poco differente dalla frequenza media f_c della portante del segnale modulato in frequenza. Un'analisi esatta del funzionamento di questo circuito è piuttosto complicata, ma, se la larghezza di banda del circuito risonante è grande rispetto al più grande spostamento in frequenza della portante, si può fare un'analisi grafica. Con riferimento alla figura si può osservare che, al variare



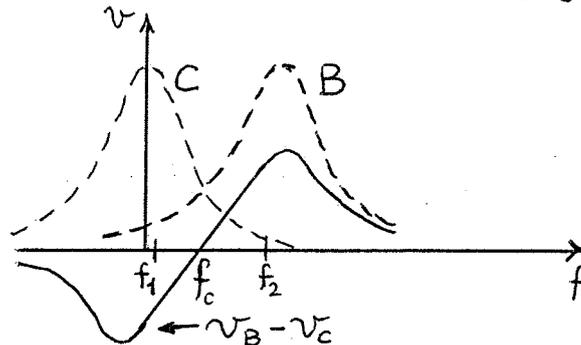
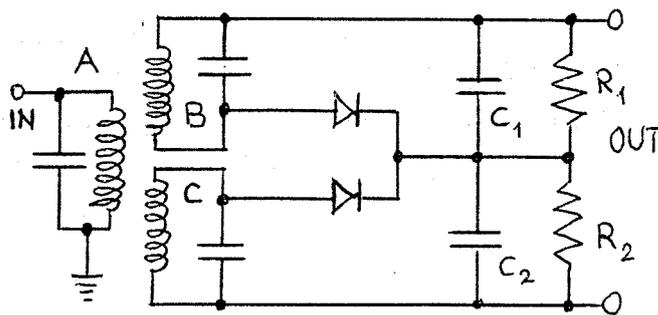
Un semplice circuito risonante usato come discriminatore.

della frequenza della portante, varia la corrente nel circuito risonante desintonizzato, la corrente aumenta quando la frequenza si avvicina a quella di risonanza e diminuisce quando si allontana. L'uscita di questo circuito è modulata in ampiezza, ma poiché la curva caratteristica del circuito risonante non è lineare, l'uscita, modulata in ampiezza è distorta. Una seconda caratteristica di questo semplice discriminatore è che esso non provvede alla reiezione dell'eventuale modulazione d'ampiezza presente all'ingresso. Cioè, se il segnale applicato viene raddoppiato, la corrente viene pure raddoppiata. Questo significa che qualsiasi modulazione d'ampiezza, per esempio dovuta a disturbi impulsivi, presente in ingresso influenzerà l'uscita. Per non avere modulazione d'ampiezza in uscita occorre allora far precedere questo circuito da un ottimo limitatore. A causa dei diversi inconvenienti presentati da questo circuito esso non è usato. È stato presentato solamente per illustrare il principio di funzionamento dei demodulatori per FM.

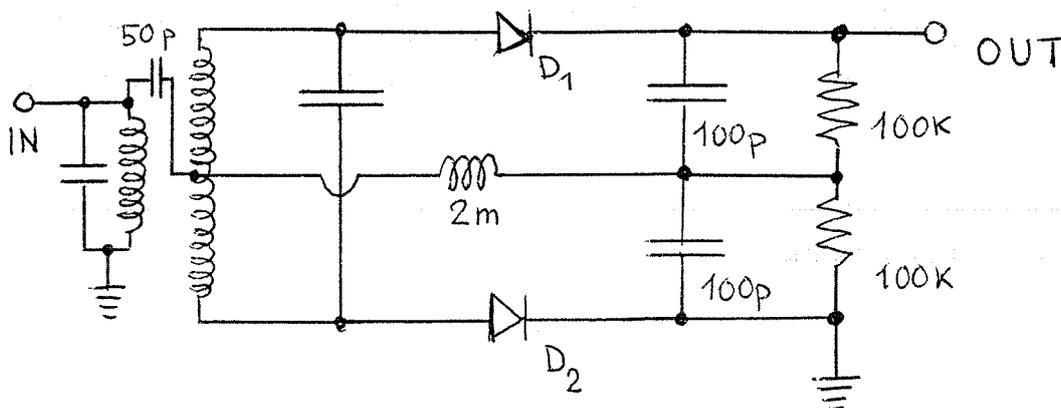
La linearità può essere notevolmente migliorata usando due circuiti risonanti desintonizzati ed a sintonia sfalsata, invece di uno solo e poi scegliere la differenza tra le due uscite. In questo discriminatore, mostrato in figura, il segnale di ingresso A è presente ai capi del primario, sintonizzato alla frequenza della portante f_c , mentre il secondario C è sintonizzato ad una frequenza f_1 poco inferiore ad f_c ed il secondario B è sintonizzato ad una frequenza f_2 poco superiore ad f_c . L'uscita di questo circuito è senza apprezzabile distorsione data la buona linearità della risposta attorno ad f_c come si vede in figura.

Un inconveniente è rappresentato dal fatto che la ricezione è possibile in tre punti: oltre che nel tratto lineare centrale, anche nelle porzioni esterne delle curve di risonanza che non sono lineari. Come si vede dallo schema, l'uscita di ciascun circuito è seguita da un rivelatore a diodo. Le capacità C_1 e C_2 sono tra loro uguali e presentano piccola reattanza alla frequenza f_c . Le resistenze R_1 ed R_2 sono tra loro uguali e piuttosto grandi. L'uscita è la differenza tra B e C e, se le escursioni di frequenza sono comprese tra f_1 ed f_2 , il segnale d'uscita è una funzione approssimativamente lineare della frequenza d'ingresso.

Un altro tipo di discriminatore, molto usato, è quello descritto da D. F. Foster ed S. W. Seeley nel 1937 in *Proceedings IRE*, 25, pag. 289 e rappresentato qui sotto. Il funzionamento è analogo a quello del circuito precedente.



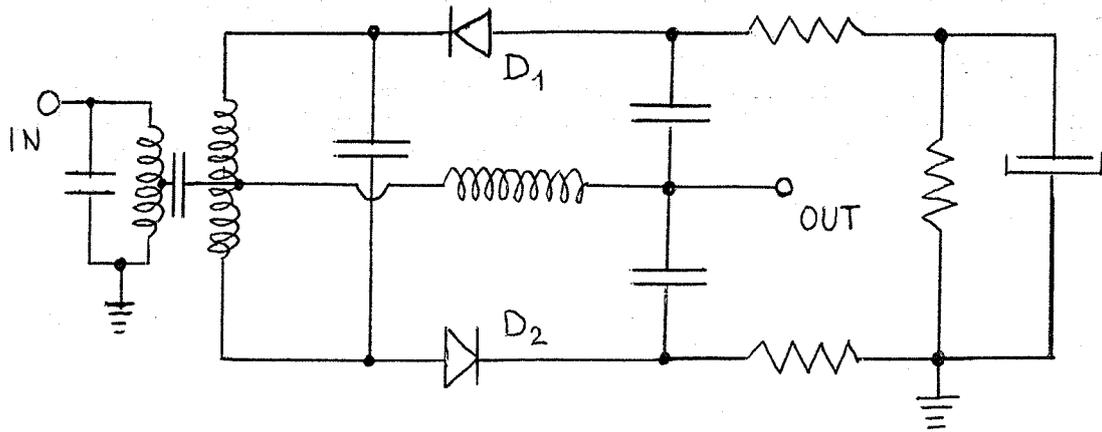
Discriminatore con due circuiti risonanti a sintonia sfalsata e suo funzionamento.



Circuito discriminatore di Foster-Seeley, con un solo condensatore di accordo sul secondario.

Nel 1947 S. W. Seeley e J. Avins hanno descritto in *RCA Review*, 8, pag. 201, un circuito rivelatore, derivato dal precedente, denominato *rivelatore a rapporto*, che ha trovato largo uso nei ricevitori per MF in quanto presenta ottime prestazioni quanto a rapporto segnale/rumore con pochi componenti ed inoltre non richiede circuiti limitatori. Il circuito è rappresentato qui sotto ed appare molto simile al circuito di Foster e Seeley, ma differisce da quest'ultimo per il

rovesciamento della polarità del diodo D_1 e per il punto ove viene prelevata l'uscita, questa risulta proporzionale solo al rapporto tra le ampiezze dei segnali applicati ai due diodi che, a sua volta, dipende dalla frequenza.



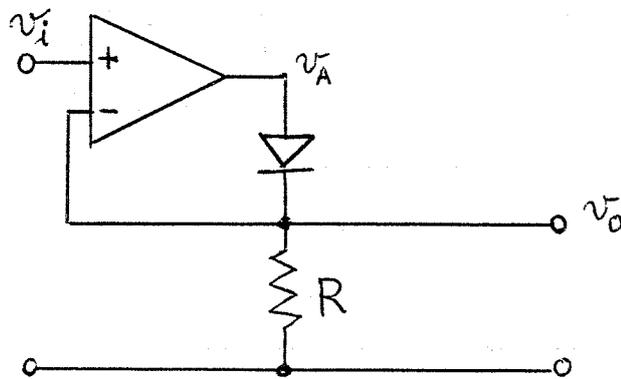
Circuito discriminatore a rapporto di Seeley-Avins; si noti, rispetto al circuito precedente, il rovesciamento del diodo D_1 .

2c. Il rettificatore di precisione

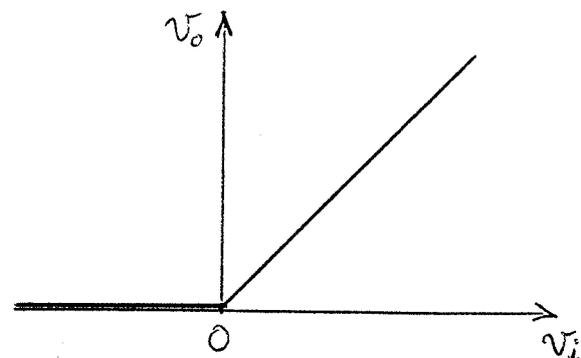
Una possibilità per rivelare piccoli segnali, cioè per segnali inferiori alla tensione di soglia V_s , è offerta dall'uso di un particolare circuito che comprende un diodo normale, posto in controreazione ad un amplificatore operazionale; questo circuito, denominato "rettificatore di precisione" o "superdiodo", trova applicazione nella strumentazione scientifica per la misura di piccoli segnali in alternata. Una sua applicazione in radiotecnica potrebbe aprire interessanti possibilità.

Un semplice circuito rettificatore di precisione è rappresentato in figura, insieme alla relativa curva caratteristica, detta anche caratteristica di trasferimento. È formato da un diodo posto in controreazione tra l'uscita e l'ingresso invertente di un amplificatore operazionale, la resistenza R rappresenta la resistenza di carico del rettificatore. Se il segnale di ingresso v_i è nullo, ovviamente anche quello di uscita sarà nullo, ma, all'aumentare del segnale di ingresso, l'uscita sarà Av_i , ove $A \gg 1$ (e, tipicamente, dell'ordine di 10^5) è il guadagno dell'amplificatore. Il diodo entra in conduzione e chiude il circuito di controreazione tra l'uscita e l'ingresso invertente. Questa controreazione negativa farà comparire un cortocircuito tra i terminali d'ingresso. La tensione sul terminale invertente, che è anche uguale alla tensione d'uscita v_o , risulta, entro pochi millivolt, uguale a quella sul terminale d'ingresso non invertente, che è proprio v_i : cioè $v_i = v_o$ per $v_i \geq 0$. Si noti che non è più presente la tensione di soglia, come nel normale circuito rivelatore. Perché inizi questo funzionamento del circuito operazionale è sufficiente un piccolo valore positivo di v_i , pari alla caduta sul diodo divisa per il guadagno ad anello aperto dell'amplificatore operazionale. Cioè la differenza $v_i - v_o$ è molto piccola e la curva caratteristica passa molto vicino all'origine degli assi. Questo fatto rende il circuito adatto per le applicazioni che trattano segnali molto piccoli.

Nel caso in cui v_i diventa negativa anche v_o tende a seguirla ed a diventare negativa, ma il diodo viene polarizzato inversamente ed attraverso R non scorre più alcuna corrente e v_o resta al



Schema di principio di un semplice rettificatore di precisione.



Curva caratteristica del rettificatore di precisione.

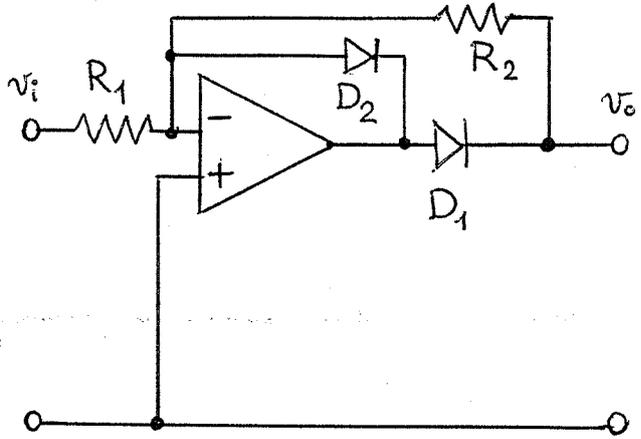
potenziale 0. Poiché, in questo caso, il diodo è interdetto l'amplificatore operazionale funziona ad anello aperto e l'uscita si trova al livello di saturazione negativo. La combinazione del diodo e dell'amplificatore operazionale riesce così ad eliminare, quasi completamente, la tensione di soglia.

Il circuito ora esaminato presenta però alcuni svantaggi: quando v_i diventa negativa e $v_o = 0$, tra i due terminali d'ingresso è presente l'intera tensione v_o . Se questa tensione è maggiore di qualche volt, l'operazionale può venire danneggiato, a meno che non sia protetto per le sovratensioni. Un altro svantaggio è dovuto al fatto che, quando v_i è negativa, l'amplificatore va in saturazione. Anche se ciò non danneggia il circuito, la saturazione dovrebbe comunque essere evitata, per evitare i ritardi necessari per far tornare il circuito nelle sue condizioni normali di funzionamento. - Questo ritardo rallenta il funzionamento del circuito e quindi limita la frequenza di funzionamento del rivelatore.

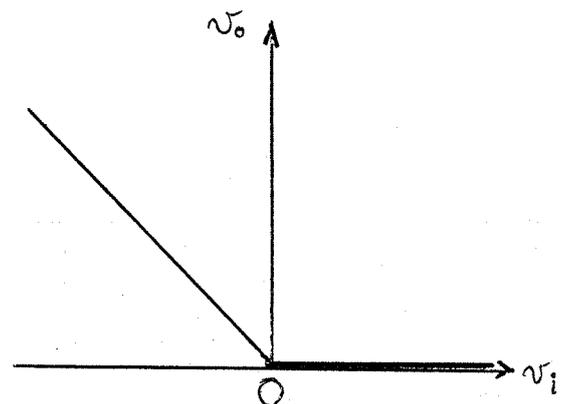
Nella figura accanto è mostrato un altro schema che non presenta gli svantaggi sopra elencati. Il funzionamento è il seguente. Per $v_i \geq 0$ il diodo D_2 entra in conduzione e chiude l'anello di controreazione negativa intorno all'amplificatore operazionale. Sul terminale d'ingresso invertente appare una massa virtuale e l'uscita dell'amplificatore operazionale risulta agganciata ad una tensione negativa pari alla caduta sul diodo. Questa tensione negativa mantiene interdetto il diodo D_1 , mentre nella resistenza di controreazione R_2 non scorre corrente. La tensione d'uscita del rettificatore è quindi nulla. Quando v_i diventa negativa, la tensione sul terminale d'ingresso invertente tende a diventare negativa, facendo diventare positiva la tensione d'uscita dell'amplificatore operazionale. Questo polarizza inversamente D_2 e quindi lo porta in interdizione. Il diodo D_2 , tuttavia, fa scorrere corrente in R_2 , stabilendo così un percorso di controreazione intorno all'amplificatore operazionale e facendo apparire una massa virtuale sul terminale invertente d'ingresso. La corrente che scorre in R_2 è uguale a quella che scorre in R_1 . Così, se $R_1 = R_2$, la tensione d'uscita v_o risulta pari a $-v_i$ per $v_i \leq 0$. La caratteristica di trasferimento del circuito è mostrata qui accanto per $R_1 = R_2$. Si noti che, a differenza del circuito precedente, la pendenza della caratteristica può essere fissata a piacere (e quindi anche pari ad uno) scegliendo opportuni valori di R_1 ed R_2 .

Il maggior vantaggio di questo circuito consiste nel fatto che l'anello di controreazione intorno all'amplificatore operazionale resta permanentemente chiuso. Perciò l'amplificatore resta nella sua regione di funzionamento lineare, evitando la saturazione ed il ritardo necessario per uscirne. Il diodo D_2 aggancia la tensione d'uscita appena diventa negativa e la fissa ad un valore negativo pari alla caduta sul diodo; per questo motivo D_2 prende il nome di "diodo d'aggancio".

Come si può osservare la curva caratteristica presenta una non linearità all'origine (per $V = 0$) e questo consente l'uso del circuito descritto sia come rettificatore, sia come demodulatore, ma la caratteristica nel primo quadrante è lineare, a differenza delle caratteristiche dei diodi considerati in precedenza. Questo fatto permette di non introdurre distorsione nel processo di rettificazione o di demodulazione. Come già detto, una opportuna scelta dei valori delle resistenze, cioè del guadagno del circuito integrato, consente inoltre di ottenere una pendenza pari ad uno della curva caratteristica in modo che il segnale in uscita sia esattamente pari al valore di picco del segnale di ingresso.



Versione perfezionata del rettificatore di precisione.



Curva caratteristica del rettificatore di precisione nella versione perfezionata.

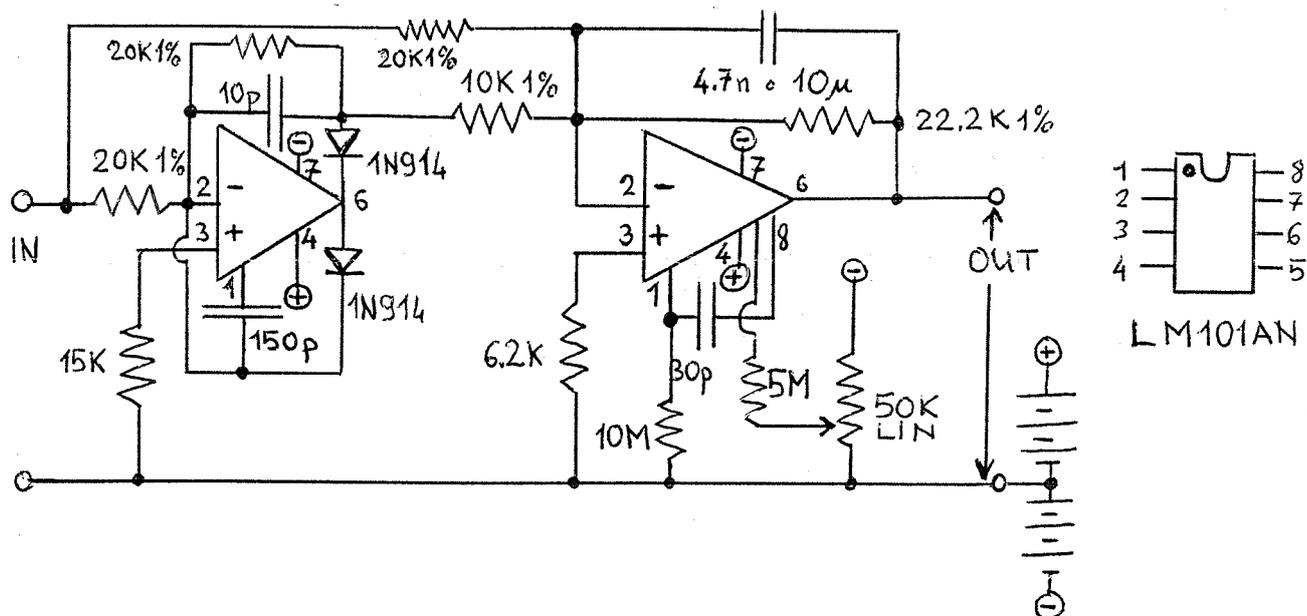
Per ricevere numeri arretrati di Radioonde si prega inviare come contributo spese di spedizione francobolli di piccolo taglio (inferiore o pari a L. 450) secondo la seguente tabella:

	Per città capoluogo di provincia	Per altri luoghi
Un numero arretrato	L. 450	L. 650
Due o tre numeri arretrati	L. 550	L. 750
Cinque numeri arretrati	L. 1500	L. 2000

Esempio pratico di rettificatore di precisione

di Ezio Mognaschi

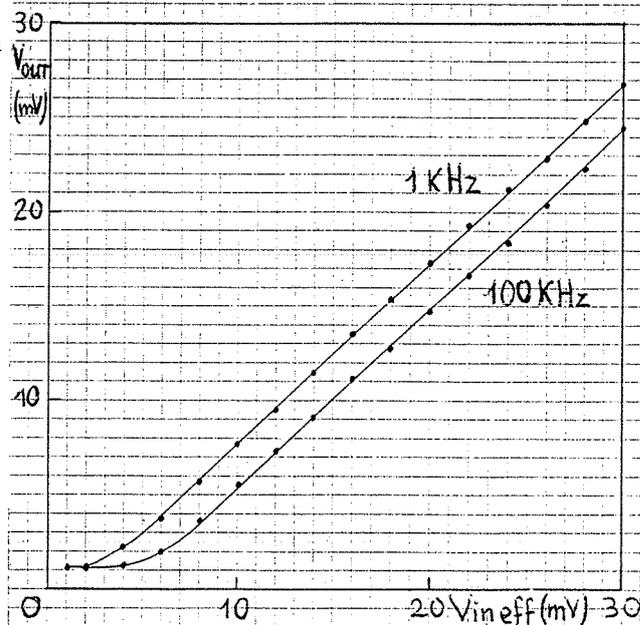
Con l'uso di due amplificatori operazionali facilmente reperibili, di due diodi e di pochi altri componenti esterni è possibile realizzare un circuito rettificatore di precisione a doppia semionda che funziona bene anche come demodulatore dalle frequenze più basse sino a circa 500 kHz. A frequenze superiori il segnale d'uscita decresce molto rapidamente all'aumentare della frequenza. L'impedenza d'ingresso del circuito è, purtroppo, piuttosto bassa ed equivale ad una resistenza di circa 10 k Ω , in parallelo a circa 10 pF. Gli operazionali utilizzati (LM101AN) sono la versione commerciale, con custodia di plastica, degli operazionali militari LM301 non reperibili nei normali circuiti commerciali. Le resistenze



Schema elettrico di un rettificatore di precisione con circuito di compensazione dell'offset in uscita.

impiegate sono da 1/4 W, precisione 1%, ove indicato nello schema. I condensatori sono ceramici, tranne quello sull'uscita che sarà un ceramico da 4700 pF per realizzare il demodulatore e da 1 a 10 μ F al tantalio nel caso si voglia realizzare un rettificatore di precisione, il quale richiede una maggiore costante di tempo di integrazione. L'alimentazione doppia può essere realizzata con due batterie uguali con tensioni da ± 6 V sino a ± 22 V. Il valore delle tensioni di alimentazione limita, ovviamente, l'ampiezza del segnale applicabile all'ingresso. Il trimmer lineare da 50 k Ω , dieci giri, fa parte del circuito di bilanciamento di offset dell'uscita, cioè permette, entro certi limiti, di rendere esattamente zero la componente in continua dell'uscita per determinati valori del segnale d'ingresso. Il circuito è *fool proof*, cioè a prova di errore: non soffre per corti circuiti nell'uscita. La realizzazione è stata eseguita su piastra millefori delle dimensioni di 5 \times 7 cm²; il costo di realizzazione, esclusa la scatola e le pile non supera diecimila lire.

Nelle figure sono rappresentati, rispettivamente, lo schema del circuito e la caratteristica a 1 kHz ed a 100 kHz. Si noti la buona linearità della caratteristica anche per piccoli segnali, cioè sino a qualche mV.



Caratteristica di trasferimento del rettificatore di precisione.