



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

UIBM

DOMANDA NUMERO	102000900875210
Data Deposito	19/09/2000
Data Pubblicazione	19/03/2002

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	41	J		

Titolo

CIRCUITO ELETTRONICO PER IL PILOTAGGIO AD ALTA EFFICIENZA DI CARICHI PIEZO-ELETTRICI CON CABLAGGIO INDUTTIVO-RESISTIVO.



Domanda di brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"Circuito elettronico per il pilotaggio ad alta efficienza di carichi piezo-elettrici con cablaggio induttivo-resistivo"

a nome: **STMicroelectronics S.r.l.**

MI 2000 A002043

5 con sede in: **Agrate Brianza (Milano)**

DESCRIZIONE

Campo di applicazione

La presente invenzione fa riferimento ad un circuito elettronico per il pilotaggio ad alta efficienza di carichi piezo-elettrici, del
10 tipo comprendente una porzione circuitale di pilotaggio collegata ad almeno un capo del carico tramite un cablaggio induttivo-resistivo e sul quale viene applicata una forma d'onda di tensione.

L'invenzione riguarda anche un metodo di pilotaggio di un carico piezoelettrico con cablaggio induttivo-resistivo.

15 L'invenzione riguarda in particolare, ma non esclusivamente, un circuito di pilotaggio per seguire il profilo di corrente richiesto da una testina piezoelettrica per stampante di tipo connessa al circuito di pilotaggio attraverso un cavo induttivo e resistivo detto flat cable e assimilabile ad una resistenza e ad una induttanza in serie. La
20 descrizione che segue è fatta con riferimento a questo campo di applicazione con il solo scopo di semplificarne l'esposizione.

Com'è ben noto in questo specifico settore tecnico, esiste una ampia categoria di trasduttori, ad esempio quelli descritti nel brevetto US n° 5,895,998, la cui caratteristica elettrica è assimilabile ad un
25 carico piezo-elettrico. Tra questi trasduttori possiamo annoverare anche

alcuni tipi di testine per stampanti.

Il pilotaggio delle testine avviene applicando forme d'onda in tensione costituite generalmente da una successione di rampe aventi un predeterminato slew-rate. Un esempio di questo genere di applicazione è
5 descritto nel brevetto US n° 4,767,959 a nome Nippondenso Co.

La particolare precisione con cui viene richiesto di applicare la suddetta forma d'onda di tensione ai capi del carico, unitamente all'elevata frequenza del segnale di pilotaggio, porta ad utilizzare circuiti di pilotaggio a funzionamento lineare e ciò comporta un'elevata
10 dissipazione di potenza.

Inoltre, la presenza dell'induttanza parassita del flat cable di collegamento al carico, e quindi in serie al carico capacitivo vero e proprio, determina un effetto di filtraggio sulla corrente richiesta dal carico. Il profilo di questa corrente si discosta da quello rettangolare ed
15 assume un andamento smussato con sovra e sottoelongazioni, come evidenziato nella figura 1 qui allegata.

Pertanto, rispetto ad un caso ideale di carico puramente capacitivo, occorre gestire opportunamente uno slew-rate di corrente ad inizio rampa ed una coda di corrente a fine rampa. Le caratteristiche di
20 questi fronti dipendono dai parametri parassiti introdotti dal flat cable.

Arte nota

La struttura tipicamente utilizzata per applicare una forma d'onda di tensione ad un carico piezoelettrico con cablaggio induttivo-resistivo è rappresentata nella figura 1, che illustra un esempio di
25 pilotaggio lineare.

In pratica, il circuito di pilotaggio di figura 1 è costituito da un amplificatore operativo incorporante uno stadio di uscita di potenza sufficiente per pilotare il carico.

Il carico piezoelettrico è sostanzialmente un carico capacitivo non dissipativo e tutta la potenza elettrica viene dissipata sui transistori che sono incorporati nello stadio di pilotaggio lineare.

La soluzione di pilotaggio lineare non è particolarmente efficiente a causa dell'elevata dissipazione di potenza elettrica.

Il problema tecnico che sta alla base della presente invenzione è quello di escogitare un circuito di pilotaggio, in particolare per carichi piezoelettrici, il quale abbia caratteristiche strutturali e funzionali tali da consentire di pilotare il carico con un'elevata efficienza e senza perdere la qualità della forma d'onda generata ai capi del carico.

Sommario dell'invenzione

L'idea di soluzione che sta alla base della presente invenzione è quella di realizzare il circuito di pilotaggio con porzioni di pilotaggio aggiuntive rispetto a quelle lineari dell'arte nota, ciascuna porzione essendo responsabile della fornitura della maggiore quantità possibile di corrente sia durante la fase di transitorio, sia durante la fase di regime. Allo stadio di pilotaggio lineare viene lasciato il compito di fornire una residua porzione di corrente necessaria per seguire fedelmente il segnale di riferimento.

In questo modo, si può fornire la maggior quantità possibile di corrente richiesta dal carico evitando allo stesso tempo commutazioni troppo frequenti che sarebbero necessarie qualora il pilotaggio avvenisse

puramente in modalità switching.

Sulla base di questa idea di soluzione il problema tecnico è stato risolto da un circuito di pilotaggio del tipo precedentemente indicato e caratterizzato dal fatto di comprendere rispettive porzioni circuitali aggiuntive, strutturalmente indipendenti, collegate a loro volta a detto cablaggio tramite rispettive induttanze per fornire una consistente frazione della corrente totale richiesta dal carico in fase di transitorio e a regime, rispettivamente.

L'invenzione riguarda anche un metodo di pilotaggio di un carico piezoelettrico con cablaggio induttivo-resistivo in cui è previsto almeno un pilotaggio lineare di detto carico tramite un circuito di pilotaggio dotato di una porzione circuitale lineare collegata al carico tramite detto cablaggio, caratterizzato dal fatto di prevedere due ulteriori e distinte modalità di pilotaggio, in transitorio e a regime, in cui rispettive porzioni circuitali aggiuntive, strutturalmente indipendenti e collegate a loro volta a detto cablaggio tramite rispettive induttanze, forniscono una consistente frazione della corrente totale richiesta dal carico.

Le caratteristiche ed i vantaggi del circuito e del metodo secondo l'invenzione risulteranno dalla descrizione, fatta qui di seguito, di un esempio di realizzazione dato a titolo indicativo e non limitativo con riferimento ai disegni allegati.

In tali disegni:

Breve descrizione dei disegni

- la figura 1 mostra una vista schematica di un circuito di pilotaggio di

un carico piezoelettrico realizzato secondo l'arte nota;

- la figura 2 mostra una vista schematica di un circuito di pilotaggio di un carico piezoelettrico realizzato secondo la presente invenzione;

- le figure 3, 4 e 5 mostrano rispettive viste schematiche del circuito di

5 figura 2 in tre diverse fasi di funzionamento;

- la figura 6 mostra un diagramma comparativo tra la forma d'onda della corrente assorbita dal carico e la tensione applicata ai capi del carico;

10 - la figura 7 mostra un diagramma corrente-tempo per segnali in corrente presenti nel circuito di figura 2;

- la figura 8 mostra una vista schematica di una variante di realizzazione del circuito di figura 2;

15 - le figure 9, 10, 11 e 12 mostrano rispettivi diagrammi corrente-tempo che riportano alcuni intervalli di tempo nei quali il circuito secondo l'invenzione viene attivato in accordo con il metodo di pilotaggio secondo l'invenzione;

- le figure 13 e 14 mostrano rispettive viste schematiche di porzioni circuitali a corredo del circuito secondo l'invenzione.

Descrizione dettagliata

20 Con riferimento a tali figure, ed in particolare all'esempio di figura 2, con 1 è globalmente e schematicamente indicato un circuito di pilotaggio realizzato secondo la presente invenzione per il pilotaggio di un carico piezoelettrico 2.

25 Il circuito 1 secondo l'invenzione comprende un amplificatore operativo 3 avente uscita connessa in retroazione al proprio ingresso

invertente (-) e collegata inoltre ad un capo del carico 2, in un nodo X, per fornire una corrente I_{AMP} . L'altro ingresso, non invertente (+), dell'amplificatore 3 riceve un segnale di riferimento da un terminale IN di ingresso del circuito 1. Tale amplificatore 3 può essere considerato il
5 cuore della porzione lineare del circuito 1.

Vantaggiosamente, il circuito 1 secondo l'invenzione comprende almeno una porzione circuitale a semiponte, includente almeno un dispositivo di commutazione, collegata al nodo X tramite un'induttanza. Più in particolare, il circuito 1 comprende rispettive
10 porzioni circuitali 4 e 5 a semiponte, ciascuna collegata al nodo X tramite una relativa induttanza L1, L2. Le porzioni 4 e 5 sono tra loro strutturalmente indipendenti. Le induttanze L1 ed L2 hanno valore preferibilmente valore diverso tra loro, nulla vieta però di utilizzare induttanze di pari valore. Alla porzione circuitale 4 a semiponte,
15 indicata anche con la sigla LF, è associata l'induttanza L1 di valore più elevato.

Viceversa, alla porzione circuitale 5 a semiponte, indicata anche con la sigla HF, è associata l'induttanza L2 di minor valore.

Un blocco 7 di controllo è previsto per il pilotaggio delle
20 porzioni circuitali 4 e 5 a semiponte.

In sostanza, l'invenzione prevede uno schema circuitale che mira a fornire la maggior quantità possibile di corrente richiesta dal carico 2 tramite i due semiponti 4 e 5 ma, allo stesso tempo, evitando commutazioni troppo frequenti.

25 La parte lineare 3 dovrà quindi fornire la differenza di corrente

I_{AMP} necessaria per seguire fedelmente il segnale in tensione di riferimento, costituito nel caso specifico da una successione di rampe con slew-rate predeterminato. Vantaggiosamente, il compito delle porzioni circuitali 4 e 5 a semiponte è dunque quello di fornire con elevata efficienza, in fase di transitorio e a regime, rispettivamente, una buona frazione della corrente totale richiesta dal carico 2, mentre la porzione circuitale 3 lineare garantisce la precisione della forma d'onda in tensione fornendo solo la differenza di corrente I_{AMP} , con notevole risparmio energetico.

10 Come già detto, per soddisfare alle richieste di corrente da parte del carico 2, la porzione a semiponte LF comprende almeno un dispositivo di commutazione. Più in particolare, una coppia di transistori M1, M2 sono interconnessi tra loro in un nodo X1. Il semiponte LF è alimentato tra un primo riferimento di tensione V_{ALIM}
15 di alimentazione ed un secondo riferimento di massa GND. L'induttanza L1 è inserita tra i nodi X1 ed X.

Nella forma preferita di realizzazione qui descritta a titolo indicativo e non limitativo il semiponte LF è formato da transistori MOS di potenza. Nulla vieta però di utilizzare un ponte di transistori bipolari.

20 I terminali di comando dei transistori M1 e M2 del semiponte LF sono tutti collegati al blocco di controllo 7. Il blocco di controllo 7 agisce sui transistori M1 ed M2 in modo da ottenere un profilo di corrente il più possibile prossimo a quello richiesto. Per questo motivo il blocco di controllo 7 necessita di informazioni riguardanti la durata, lo
25 slew-rate della rampa e il valore del carico C_{LOAD} .

In modo del tutto analogo e simmetrico, il semiponte HF comprende una coppia di transistori M3, M4 interconnessi tra loro in un nodo X2.

Il semiponte HF è alimentato a sua volta tra il primo riferimento di tensione V_{ALIM} di alimentazione ed il secondo riferimento di massa GND. L'induttanza L2 è inserita tra i nodi X2 ed X.

I terminali di comando dei transistori M3 e M4 del semiponte HF sono tutti collegati ad una rispettiva uscita del blocco di controllo 7.

L'utilizzo di due semiponti 4 e 5 permette, attraverso una opportuna strategia di chiusura degli interruttori a transistore in essi incorporati, di ben approssimare il profilo del segnale in tensione applicato al carico.

L'induttanza L2 di valore inferiore è dimensionata in modo da riuscire a seguire il transitorio iniziale e la coda finale della corrente. Il semiponte 4 con induttanza L1 di valore più elevato ha la funzione di seguire la forma d'onda fornendo il valore di corrente di regime senza la necessità di commutazioni troppo frequenti, che verrebbero richieste qualora si facesse lavorare l'altro semiponte 5 durante questa fase.

La strategia di controllo ha molta importanza in quanto da questa dipende l'efficienza ottenibile in termini di potenza dissipata, oltre che la frequenza con cui gli interruttori dei semiponti commutano.

Il metodo di controllo secondo l'invenzione si basa sulla misura della corrente I_{AMP} uscente dall'operazionale 3 e viene attuato dividendo il periodo di carica del carico piezoelettrico in tre fasi. Vediamo ora queste tre fasi del metodo con l'aiuto delle figure

schematiche 3, 4 e 5:

Lo schema del circuito 1 illustrato in queste figure 3, 4 e 5 è stato modificato per utilizzare come variabile la corrente I_{AMP} , uscente dalla porzione lineare 3.

5 Un sensore 8 viene situato a valle della porzione 3, a monte del nodo X, e collegato al blocco di controllo 7 per rilevare il valore della corrente I_{AMP} .

Il blocco di controllo 7 comprende essenzialmente una interfaccia logica accoppiata al sensore 8 di corrente, una rete logica in
10 tecnologia digitale avente stadi di uscita analogici collegati ai terminali di comando dei transistori del semiponti 4 e 5.

In base al valore di tale corrente I_{AMP} vengono commutati i dispositivi a semiponte secondo opportune strategie di controllo qui di seguito descritte.

15 Transitorio a regime, T1: Durante questa fase l'interruttore M1 del semiponte LF viene chiuso per il tempo necessario affinché la corrente sull'induttanza L1 raggiunga il valore I_o richiesto a regime dal carico 2. In questa fase l'interruttore M3 del semiponte HF viene opportunamente commutato in modo che la corrente iniettata dal
20 sistema sul carico approssimi al meglio quella richiesta, con lo scopo ancora una volta di minimizzare la quantità di corrente fornita dalla parte lineare 3.

Il flusso di controllo è rappresentato dalla linea punteggiata 9.

Fase di regime, T2: una volta che il valore della corrente
25 sull'induttanza L1 ha raggiunto il valore I_o di regime, il semiponte HF

viene disattivato ovvero viene aperto l'interruttore M3 mentre il semiponte LF, attraverso il comando dell'interruttore M1, provvede a mantenere una corrente in uscita prossima a quella richiesta.

Il flusso di controllo è rappresentato dalla linea punteggiata

5 11.

Fase di discesa, T3: durante questa fase si rende necessario inibire il semiponte LF in modo tale che l'induttanza L1 non resti carica ad un valore di corrente diverso da zero nel momento in cui la corrente non è più richiesta dal carico 2, corrente che altrimenti verrebbe ad essere assorbita dallo stadio lineare in modo dissipativo. Durante
10 questa fase è attivato il semiponte HF che, per il dimensionamento dei suoi componenti, meglio riesce a seguire segnali velocemente variabili avendo transitori di carica e scarica più rapidi.

Il flusso di controllo è rappresentato dalla linea punteggiata

15 12.

Il sistema scompone sostanzialmente la corrente da generare in tre diversi contributi:

- due picchi di corrente forniti dal semiponte HF in occasione dei fronti I_{LOAD} ;
- 20 - la maggior parte della corrente nella zona centrale, a regime, fornita dal semiponte LF;
- una corrente di correzione che viene fornita dalla parte lineare 3.

Nella figura 6 sono mostrati gli andamenti delle correnti iniettate dai due semiponti, I_{LF} per il ponte LF e I_{HF} per il ponte HF,
25 della corrente I_{AMP} fornita dall'operazionale e di I_{LOAD} richiesta dal

carico 2.

Per l'attuazione del metodo di controllo secondo l'invenzione vengo sostanzialmente utilizzate due procedure: una di tipo feedback e l'altra di tipo feedforward.

5 I tempi T1 e T3 sono stati ricavati analiticamente, e quindi la loro stima può essere effettuata in modalità feedforward una volta noti: il valore dell'induttanza L1, la tensione di alimentazione V_{ALIM} , il valore del carico CLOAD, lo slew-rate e la tensione iniziale e finale della rampa.

La variabile di feedback utilizzata nello schema è invece
10 rappresentata dalla corrente I_{AMP} , uscente dallo stadio lineare; in base al valore di tale corrente I_{AMP} viene commutato lo stadio LF durante la fase T2 e lo stadio HF durante le fasi T1 e T3, secondo i criteri illustrati qui di seguito.

Il controllo sulla variabile di retroazione I_{AMP} può essere
15 effettuato in diversi modi.

Ad esempio, è possibile chiudere il transistor M1 in istanti prefissati e riaprirlo in corrispondenza dell'attraversamento di una prefissata soglia da parte della corrente I_{AMP} .

Un diverso controllo può prevedere l'adozione di un'isteresi; ad
20 esempio, quando la corrente uscente dalla porzione 3 lineare supera una opportuna soglia I_{HIGH} , l'interruttore M1 o M3 del semiponte LF o HF connesso all'alimentazione viene chiuso, di conseguenza la corrente uscente dalla parte non lineare aumenta mentre diminuisce quella I_{AMP} della parte lineare fino a quando quest'ultima raggiunge una
25 soglia inferiore I_{LOW} che determina l'apertura del medesimo

interruttore M1 o M3, così il ciclo si ripete.

In questo modo si realizza un controllo con isteresi del tipo:

$$I_{HYST} = I_{HIGH} - I_{LOW}.$$

Il risultato di questo controllo e le forme d'onda corrispondenti
5 sono mostrate nella figura 7 in corrispondenza di un periodo di tempo
denominato T2 durante il quale la variabile di feedback agisce sul
semiponte LF. Durante i tempi indicati con T* l'interruttore M1 viene
chiuso in quanto la corrente dell'operazionale 3 scende sotto al valore
I_{LOW}. Questo interruttore M1 rimane chiuso finche la soglia I_{HIGH} non
10 viene raggiunta.

La scelta del valore di I_{HYST} si basa su un compromesso. Un
valore piccolo comporta una alta velocità di commutazione dei
semiponti mentre un valore elevato determina una maggiore
dissipazione della parte lineare.

15 Le precedenti considerazioni si basano sull'utilizzo di una sola
variabile di feedback, che agisce sui due semiponti LF e HL in fasi
temporalmente distinte. Nella figura 8 è mostrata schematicamente una
variante di realizzazione che illustra la possibilità di misurare una
seconda grandezza, oltre alla corrente I_{AMP} della parte lineare.

20 Per questo scopo è previsto ad esempio un secondo sensore di
corrente 9 inserito tra l'induttanza L2 ed il nodo X.

Qualora dunque fosse misurabile un'altra grandezza, grazie al
secondo sensore 9, questa grandezza potrebbe essere utilizzata in
maniera tale da avere sotto controllo in ogni istante entrambi i
25 semiponti. Conoscendo per esempio la corrente uscente dal semiponte

HF; si potrebbe utilizzare I_{AMP} come variabile per controllare le commutazioni del semiponte HF durante tutto il periodo ed utilizzare la somma $I_{AMP} + I_{HF}$ (pari a $I_{LOAD} - I_{LF}$) per pilotare lo stadio LF.

Vediamo ora come possono essere determinati i tre tempi T1, T2, T3 in modo analitico. Le formule che vedremo qui di seguito, ottenute in maniera analitica, consentono di effettuare un calcolo in tempo reale dei suddetti tempi durante la fase di controllo del carico 2.

Un metodo alternativo consiste nel formulare in maniera discreta l'equazione differenziale che regola l'andamento temporale della corrente nell'induttanza. si ottiene così un'equazione alla differenze finite dove il valore della corrente in un determinato istante è dato dalla somma del valore all'istante precedente più un incremento che dipende dalla tensione attuale ai capi dell'induttanza.

Tramite semplici blocchi circuitali sommatori ed accumulatori è possibile calcolare la corrente presente nell'induttanza e stimare (come numero di colpi di clock) il tempo necessario affinché essa raggiunga il valore di regime I_o , ottenendo in questo modo T1. Analogamente, è possibile calcolare T3 mediante l'accorgimento di invertire la scala temporale: se l'induttanza parte da un valore di corrente nullo e raggiunge il valore di regime I_o , utilizzando un segnale di tensione invertito nel tempo rispetto a quello richiesto si può ottenere un transitorio la cui durata è uguale a quello di scarica T3; anche in questo caso sono sufficienti semplici blocchi circuitali sommatori ed accumulatori per effettuare la stima.

Nelle figure 13 e 14 sono mostrati rispettivi esempi di

realizzazione di reti circuitali composte da blocchi sommatori ed accumulatori che possono essere utilizzate per i suddetti scopi.

Nella figura 13 è illustrato un circuito per il calcolo del tempo T_1 . Il valore della corrente I_n viene confrontato con quello della corrente I_o , nel momento in cui tali valori coincidono si è raggiunto il tempo T_1 .

Nella figura 14 è illustrato un circuito per il calcolo del tempo T_3 . Il valore della corrente I_n viene confrontato con quello della corrente I_o , nel momento in cui tali valori coincidono si è raggiunto il tempo T_3 .

Dal punto di vista del controllo si possono verificare quattro diverse situazioni presentate nelle figure 9, 10, 11 e 12.

I casi illustrati nelle figure 10 e 11 richiedono un controllo particolare. Nel caso di figura 10, il tempo T_3 è noto in ritardo rispetto al momento in cui dovrebbe essere utilizzato per interdire il semiponte LF. Ciò avviene poiché l'algoritmo non genera i risultati voluti nell'istante in cui devono essere applicati. Nel caso di figura 11 la corrente è così elevata che la somma dei tempi T_1 e T_3 è superiore alla durata della rampa e quindi la loro stima non è utile ai fini del controllo.

In questi due casi è utile la conoscenza di un tempo T_x definito come istante in cui avviene l'intersezione tra le correnti di carica e scarica dell'induttanza L_1 : tale tempo T_x permette di interrompere la carica dell'induttanza L_1 di modo che non rimanga in essa corrente residua al termine della rampa, corrente che altrimenti verrebbe recuperata dallo stadio lineare comportando una dannosa dissipazione di potenza.

Tempo di salita a regime per l'induttanza L_1 , ossia tempo necessario per L_1 per raggiungere il valore teorico ($SR \cdot C$) di corrente:

rampa di salita:
$$t_1 = \frac{V_{ALIM} - V_O}{SR} \sqrt{\left(\frac{V_{ALIM} - V_O}{SR}\right)^2 - 2LC}$$

rampa di discesa:
$$t_1 = \frac{V_O}{SR} \sqrt{\left(\frac{V_O}{SR}\right)^2 - 2LC}$$

Tempo di scarica necessario per avere l'induttanza L_1 con corrente nulla alla fine della rampa:

rampa di salita:
$$t_3 = \frac{V_D + V_F}{SR} \sqrt{\left(\frac{V_D + V_F}{SR}\right)^2 - 2LC}$$

rampa di discesa:
$$t_3 = \frac{V_D + V_{ALIM} - V_F}{SR} \sqrt{\left(\frac{V_D + V_{ALIM} - V_F}{SR}\right)^2 - 2LC}$$

dove:

V_D = tensione in diretta sul diodo di ricircolo;

V_F = tensione finale;

V_O = tensione iniziale;

L = induttanza L_1 ;

C = capacita' totale del carico;

SR = slew rate della rampa di tensione;

V_{ALIM} = tensione di alimentazione.

CALCOLO DEL TEMPO T1: ai capi dell'induttanza L (con L si indicherà il valore dell'induttanza L₁) vale la seguente equazione differenziale:

$$V_L = V_{ALIM} - V_C = L \cdot \frac{di}{dt}$$

discretizzando si ottiene:

$$\frac{\Delta i}{T_{CL}} = \frac{V_{ALIM} - V_C}{L}$$

discretizzando anche la tensione ai capi del carico capacitivo:

$$V_C = SR \cdot t + V_0$$

$$V_C = SR \cdot n \cdot T_{CL} + V_0$$

dove $SR = \frac{V_F - V_0}{T_{ON}}$

$$SR = \frac{V_F - V_0}{n_{ON} \cdot T_{CL}}$$

con $\overline{SR} = \frac{V_F - V_0}{n_{ON}}$ e

$$SR = \frac{\overline{SR}}{T_{CL}} \text{ ottengo}$$

$$V_{Cn} = \overline{SR} \cdot n + V_0 \text{ quindi:}$$

$$V_{Cn+1} = V_{Cn} + \overline{SR} \quad \text{con} \quad V_{C0} = V_0$$

$$i_{n+1} = i_n + \frac{V_{ALIM} - V_o - \overline{SR} \cdot n}{L} T_{CL}$$

tramite la variabile temporanea: $\tilde{i}_n = i_n \cdot \frac{L}{T_{CL}}$

$$\tilde{i}_{n+1} = \tilde{i}_n + V_{ALIM} - V_o - \overline{SR} \cdot n$$

CALCOLO DEL TEMPO T3: per calcolare il tempo di scarica, in cui l'induttanza passa da una corrente I_0 ad una corrente nulla al termine esatto della rampa di tensione, supponiamo di porci in quest'ultimo istante e di andare indietro nel tempo fino all'istante T3 in cui l'induttanza e' percorsa proprio dalla corrente I_0 , ci si rende conto (applicando la sostituzione di variabile $t = -\tau$) che il sistema e' analogo ad un'altro che va avanti nel tempo, ma in cui la rampa di tensione e' negativa, in formule:

$$L \cdot \frac{di}{dt} = -V_D - V_C(t) \quad \text{con} \quad V_C(t) = V_F + SR \cdot t$$

l'equazione precedente con t negativo e' equivalente alla seguente con t positivo:

$$L \cdot \frac{di}{dt} = V_D + V_C(t) \quad \text{con} \quad V_C(t) = V_F - SR \cdot t$$

discretizzando quest'ultima si ottiene:

$$\frac{\Delta i}{T_{CL}} = \frac{V_D - V_C}{L}$$

discretizzo la tensione ai capi del carico capacitivo:

$$V_C = SR \cdot t + V_o$$

$$V_C = V_F - SR \cdot n \cdot T_{CL}$$

$$\text{dove } SR = \frac{V_F - V_O}{T_{ON}}$$

$$SR = \frac{V_F - V_O}{n_{ON} \cdot T_{CL}}$$

$$\text{con } \overline{SR} = \frac{V_F - V_O}{n_{ON}} \text{ e}$$

$$SR = \frac{\overline{SR}}{T_{CL}} \text{ ottengo}$$

$$V_{Cn} = V_F - \overline{SR} \cdot n \text{ quindi:}$$

$$V_{Cn+1} = V_{Cn} - \overline{SR} \quad \text{con} \quad V_{C0} = V_F$$

$$i_{n+1} = i_n + \frac{V_D + V_F - \overline{SR} \cdot n}{L} T_{CL}$$

$$\text{tramite la variabile temporanea: } \tilde{i}_n = i_n \cdot \frac{L}{T_{CL}}$$

$$\tilde{i}_{n+1} = \tilde{i}_n + V_D + V_F - \overline{SR} \cdot n$$

CALCOLO DEL TEMPO Tx: tramite semplici conti si ottiene la seguente formula:

$$T_x = T_{ON} \cdot \frac{V_D + \frac{V_F + V_O}{2}}{V_D + V_{DD}}$$

RIVENDICAZIONI

1. Circuito di pilotaggio (1) ad alta efficienza per carichi (2) piezoelettrici, del tipo comprendente una porzione circuitale (3) di pilotaggio lineare collegata al carico (2) tramite un cablaggio induttivo-resistivo sul quale viene applicata una forma d'onda di tensione, caratterizzato dal fatto di comprendere almeno una porzione circuitale (4, 5) aggiuntiva collegata a sua volta a detto cablaggio tramite un'induttanza (L1, L2) per fornire una consistente frazione della corrente totale richiesta dal carico (2) in fase di transitorio e a regime, rispettivamente.
2. Circuito secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di comprendere rispettive porzioni circuitali (4, 5) collegate in modo strutturalmente indipendente a detto cablaggio tramite rispettive induttanze (L1, L2)
3. Circuito secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di comprendere un unico blocco (7) di controllo per il pilotaggio di dette porzioni circuitali (4, 5).
4. Circuito secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che ciascuna di dette porzioni circuitali (4, 5) comprende un circuito a semiponte (LF, HF) includente almeno un dispositivo di commutazione alimentato tra un primo riferimento di tensione (VALIM) di alimentazione ed un secondo riferimento di massa (GND).
5. Circuito secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che dette induttanze (L1, L2) sono di diverso valore.
6. Circuito secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che

ciascun circuito a semiponte (LF, HF) comprende una coppia di transistori (M1, M2; M3, M4) ed è accoppiato al carico (2) tramite una di dette induttanze (L1, L2).

7. Circuito secondo la rivendicazione 6, caratterizzato dal fatto di che i
5 terminali di comando dei transistori del circuito a semiponte (LF, HF) sono tutti collegati ad uscite del blocco di controllo (7).

8. Circuito secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto di di comprendere un sensore (8) di corrente collegato a valle di detta porzione lineare (3) e a detto blocco di controllo (7).

10 9. Metodo di pilotaggio di un carico (2) piezoelettrico con cablaggio induttivo-resistivo in cui è previsto almeno un pilotaggio lineare di detto carico (2) tramite un circuito (1) di pilotaggio dotato di una porzione circuitale (3) lineare collegata al carico (2) tramite detto cablaggio, caratterizzato dal fatto di prevedere due ulteriori e distinte modalità di
15 pilotaggio, in transitorio e a regime, in cui rispettive porzioni circuitali (4, 5) aggiuntive, strutturalmente indipendenti e collegate a loro volta a detto cablaggio tramite rispettive induttanze (L1, L2), forniscono una consistente frazione della corrente totale richiesta dal carico (2).

10. Metodo secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal
20 fatto che ciascuna di dette porzioni aggiuntive (4, 5) è attivata sulla base del valore di una corrente (I_{AMP}) uscente da detta porzione lineare (3).

11. Metodo secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che ciascuna di dette porzioni aggiuntive (4, 5) comprende un circuito a semiponte (LF, HF) di transistori alimentato tra un primo
25 riferimento di tensione (V_{ALIM}) di alimentazione ed un secondo

riferimento di massa (GND) accoppiato al carico (2) tramite una di dette induttanze (L1, L2) che sono di diverso valore.

Ing. Mario BOTTI
N. Iscriz. ALBO 493 BM
Mario Botti



Fig. 13

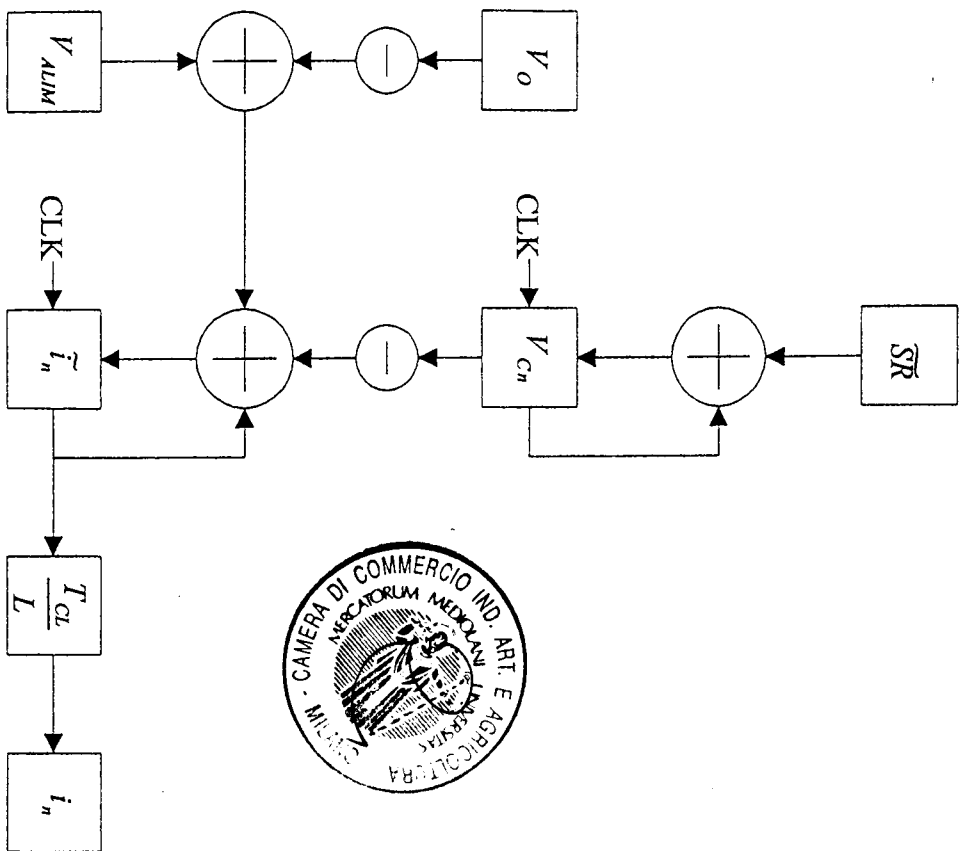
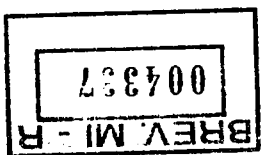
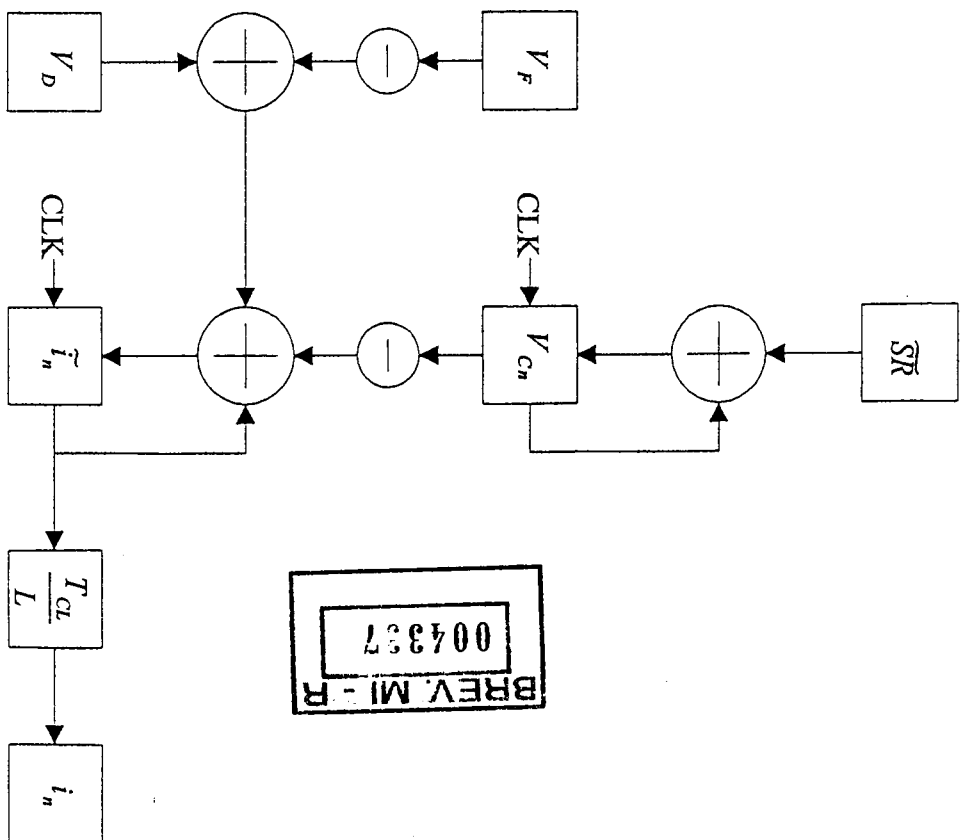


Fig. 14



Ing. Barbara FERRARI
N. iscriz. ALBO 822 B

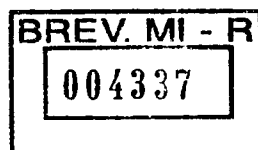
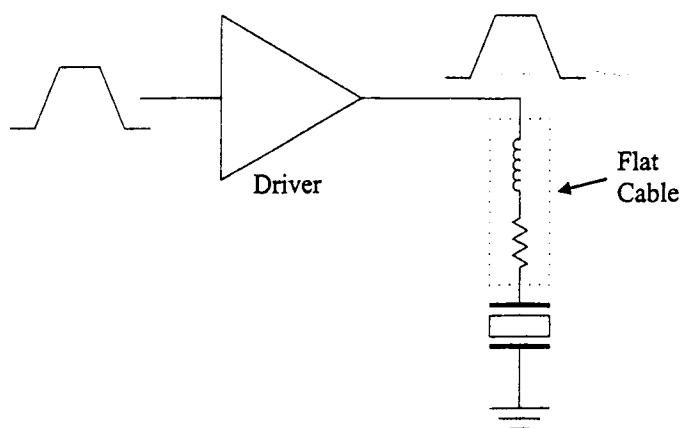


Fig. 1

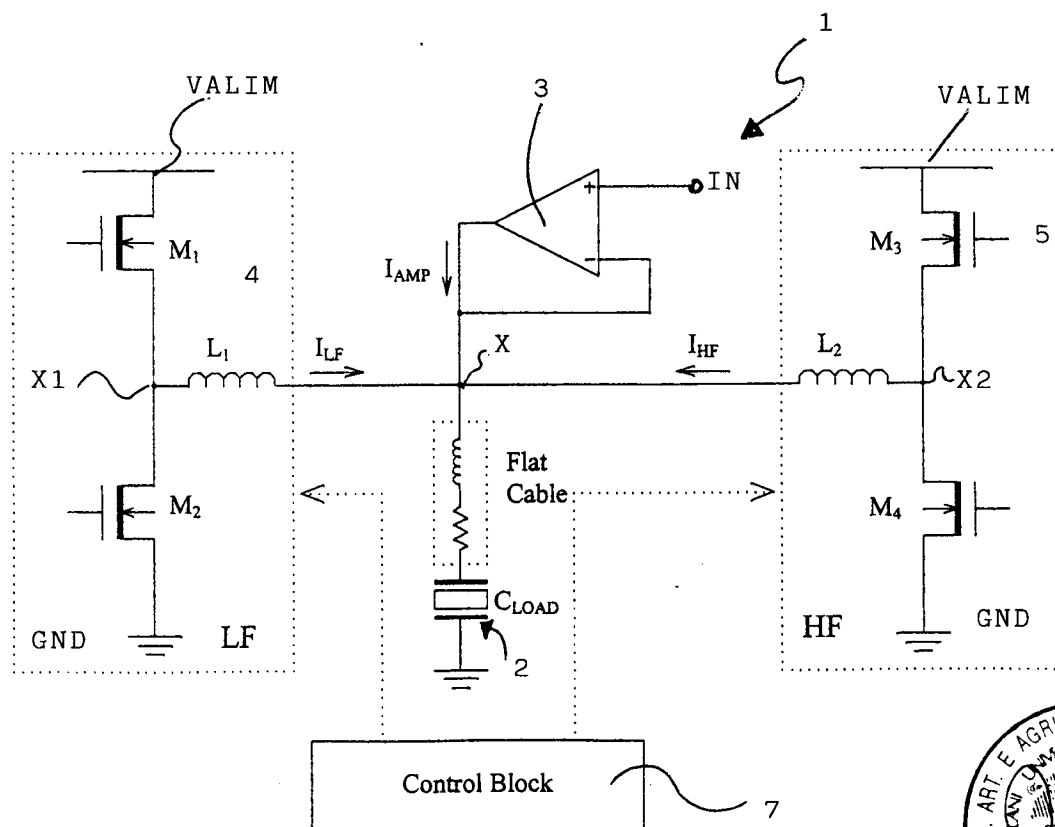


Fig. 2



Ing. Barbara FERRARI
N. Iscriz. ALBO/822 B

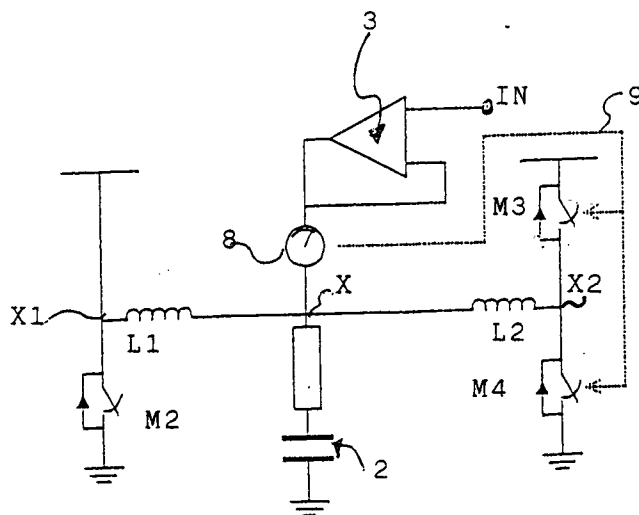


Fig. 3

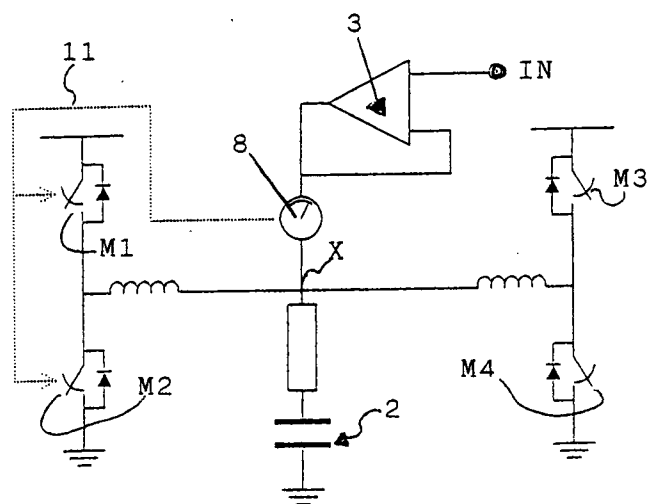
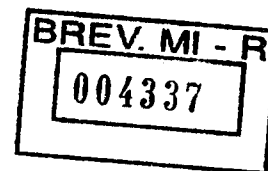


Fig. 4

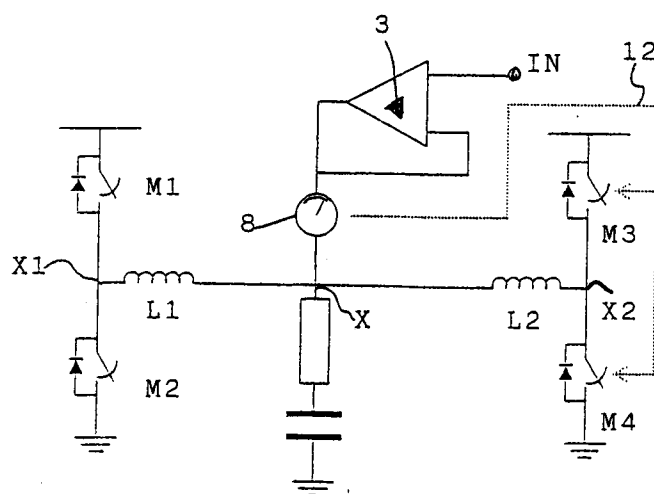
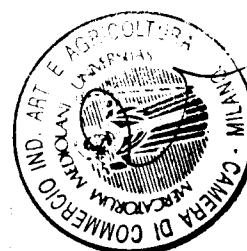


Fig. 5



Ing. Barbara FERRARI
N. Iscriz. ALBO 822 B

Barbara Ferrari

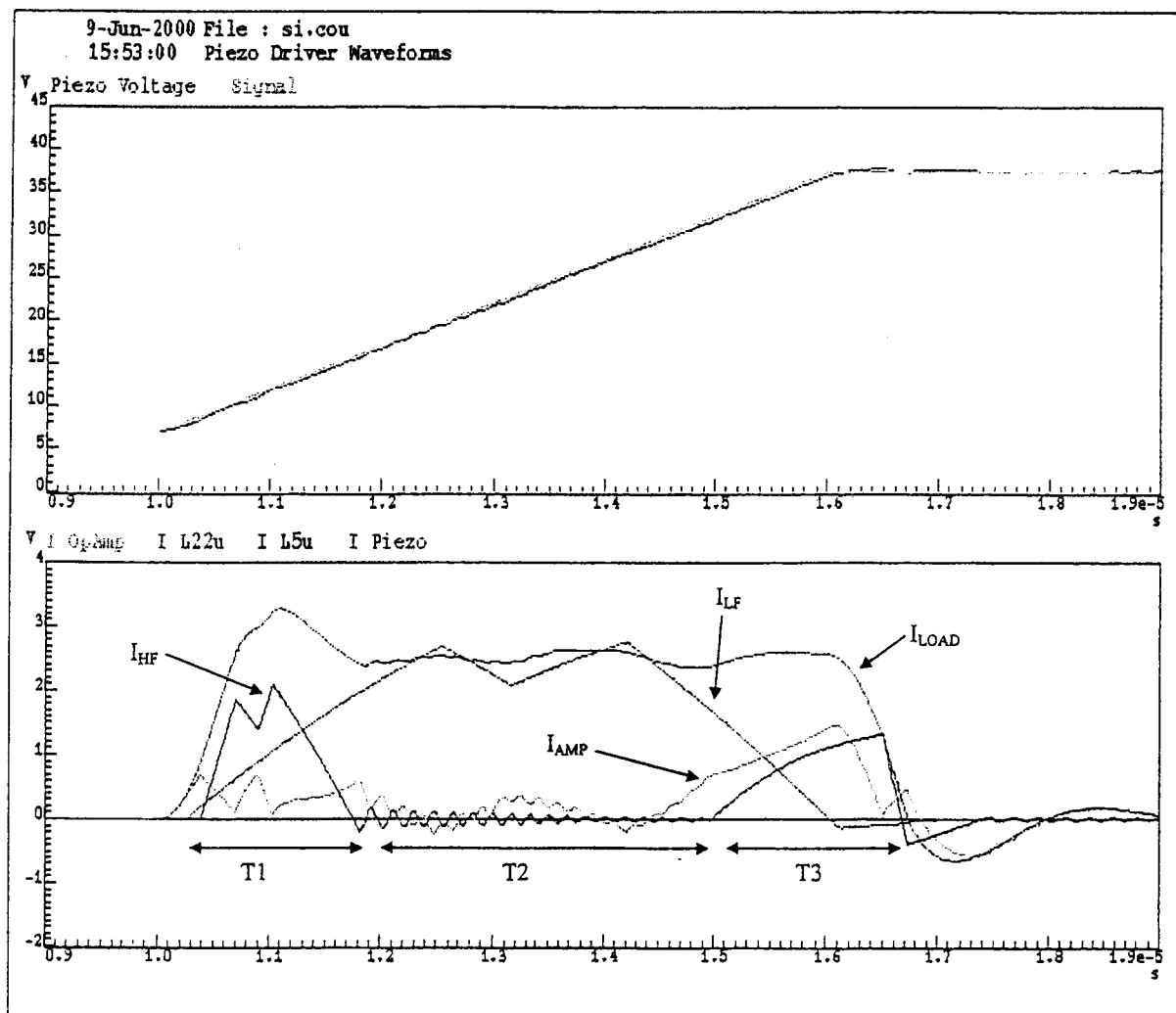
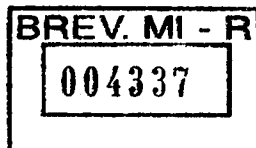


Fig. 6



Ing. Barbara FERRARI
N. Iscriz. ALBO 822 B

Barbara Ferrari

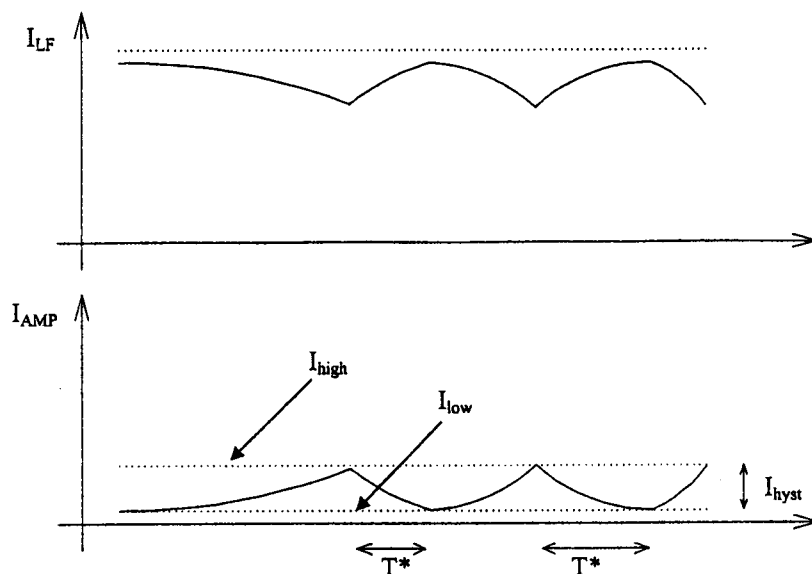
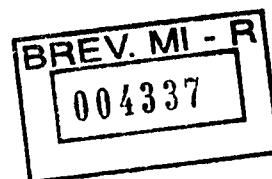


Fig. 7

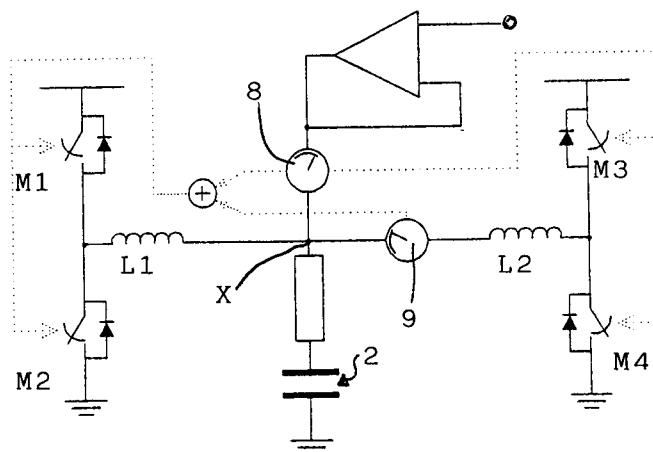


Fig. 8



Ing. Barbara FERRARI
N. Iscriz. ALBO 322 B

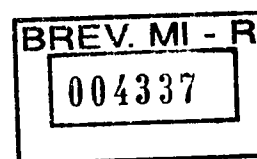


Fig. 9

Fig. 10

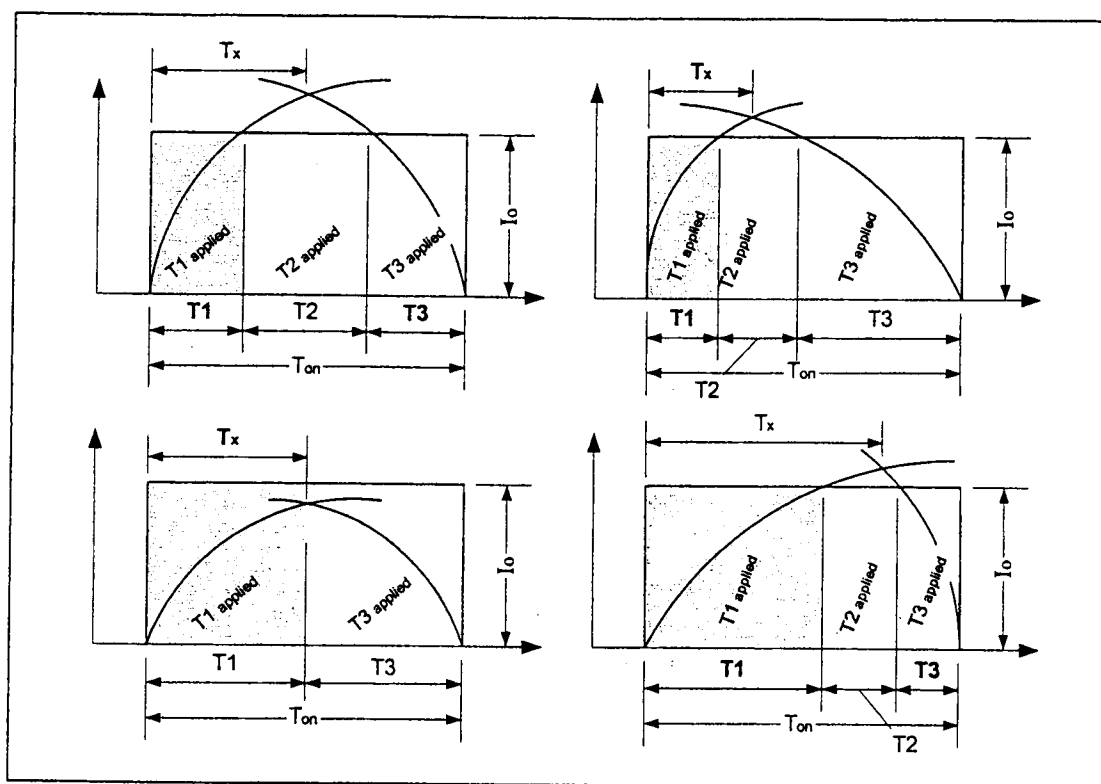


Fig. 11

Fig. 12



Ing. Barbara FERRARI
N. Iscriz. ALBO 822 B

[Handwritten signature]