

**7 I MOTORI PASSO-PASSO****Generalità**

pag 45  
 possibili modi di  
 funzionamento

Si tratta di particolari tipi di motori, *capaci di convertire una sequenza di impulsi elettrici in rotazioni angolari*. È quindi possibile ottenere, tramite una sequenza finita di impulsi, un *angolo di rotazione ben definito* o, mantenendo la sequenza di impulsi in modo continuativo, una *rotazione continua del motore*.

Presentano come **vantaggi** la possibilità di ottenere ben definite rotazioni angolari, *senza necessità di controlli ad anello chiuso*, e l'elevata robustezza, grazie all'assenza di contatti striscianti.

**Per contro**, rispetto ai motori in continua, presentano una maggiore complessità dei circuiti di azionamento e un *più elevato volume a parità di potenza*.

Indicativamente, questi motori sono disponibili per potenze fino a 1000 W.

Tra i principali **settori di applicazione**, si ricordano le unità periferiche degli elaboratori (stampanti, plotter ecc.), i robot e le macchine a controllo numerico.

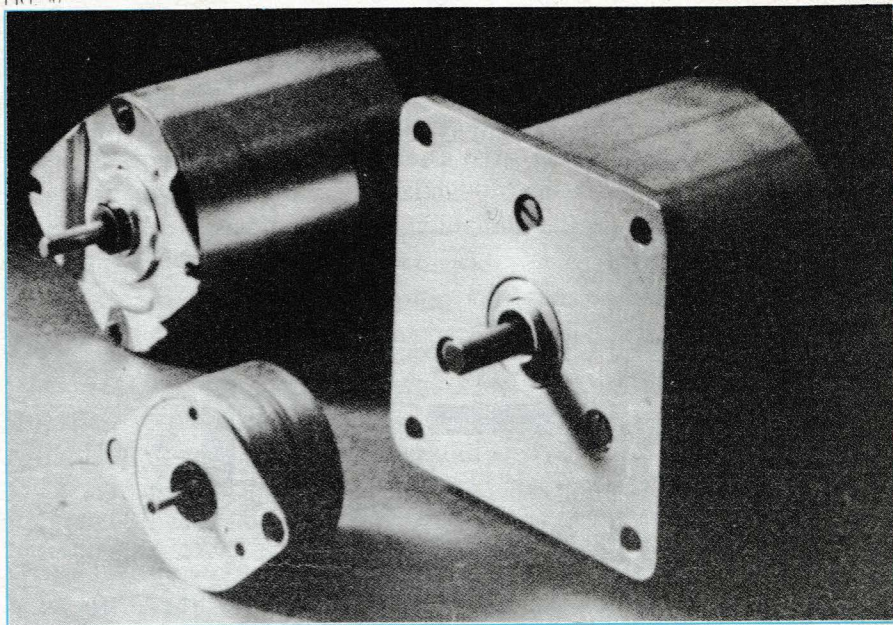
A scopo informativo, in fig. 30 si riportano alcuni esempi di motori passo-passo (*stepper motors*).

**Tipi di motori**

In relazione alle caratteristiche dei rotori si considerano due categorie principali di motori passo-passo:

- motori a **magnete permanente**;
- motori a **riluttanza variabile**.

FIG. 30





## Motori a magnete permanente

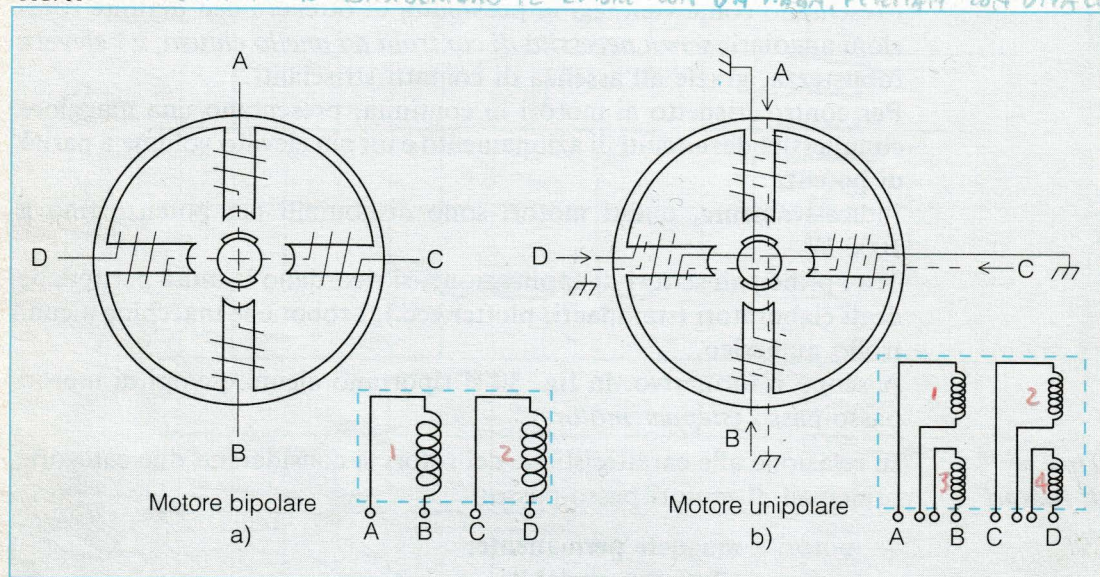
COME SONO FATTI

Sono il tipo più diffuso. In questi motori il **rotore** è formato da un **magnete permanente** con una o più coppie polari. Gli avvolgimenti sono posizionati su opportune espansioni polari del rotore. **Stator**

La fig. 31a si riferisce al caso **bipolare**, la fig. 31b al caso **unipolare**.

FIG. 31

X SEMPLICITÀ CONSIDERIAMO IL ROTORE CON UN MAGN. PERMAN. CON UNA COPPIA POLI.



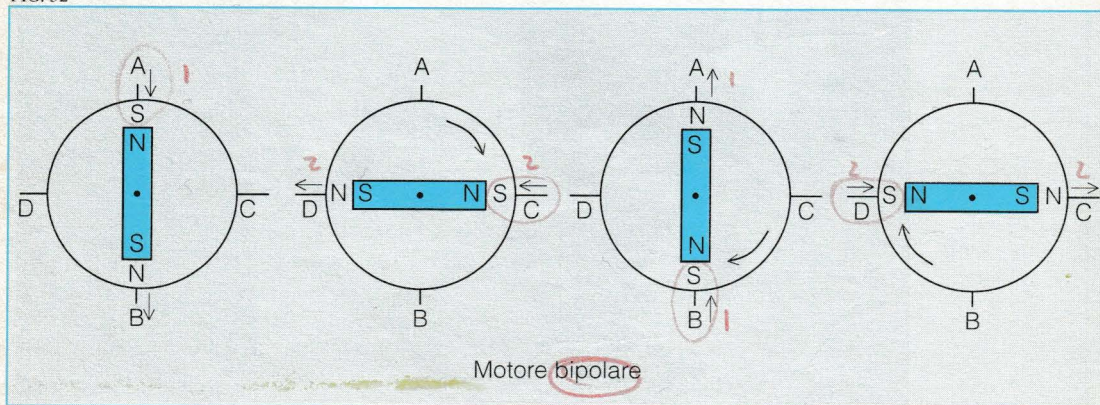
### Motori bipolari e unipolari

Nel caso **bipolare** sono presenti **due avvolgimenti**, che possono essere attraversati dalla corrente in entrambi i sensi.

Nel caso **unipolare** si hanno **quattro avvolgimenti** distribuiti, due a due, sulla stessa coppia di espansioni polari. In questo caso, però, è previsto, per ogni avvolgimento, un solo possibile verso di percorrenza della corrente.

FUNZIONAMENTO

FIG. 32

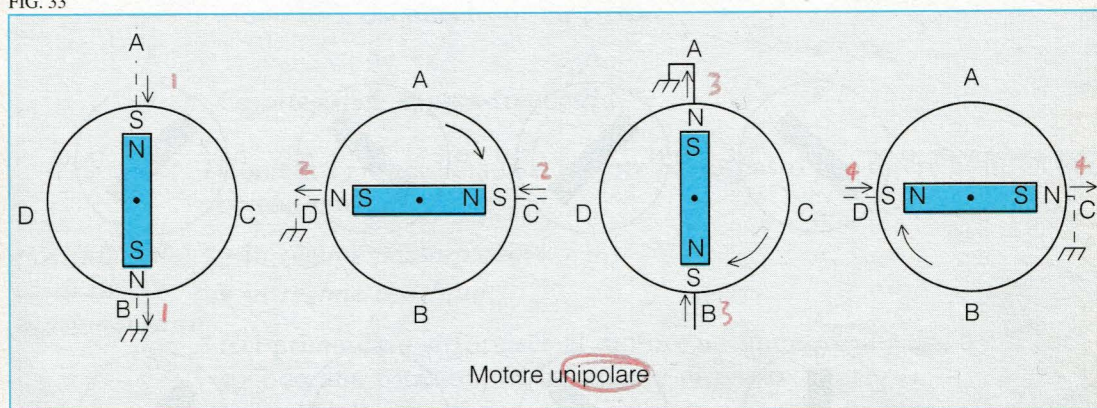




La fig. 32 riporta, in relazione alle quattro combinazioni possibili dei versi di percorrenza delle correnti nei singoli avvolgimenti del motore bipolare, le possibili coppie magnetiche statoriche e le conseguenti posizioni dei rotori.

La fig. 33 riporta, invece, la stessa situazione riferita al motore unipolare, in relazione all'avvolgimento alimentato.

FIG. 33



### Modi d'uso dei motori passo-passo

Come si vede, entrambi i motori presentano la stessa situazione. È quindi possibile uniformare il comportamento di entrambi, tenendo presente che le differenze saranno nei circuiti di alimentazione degli avvolgimenti. La fig. 34 schematizza *i tre modi possibili d'uso dei motori passo-passo*.

- Se si aziona **una fase alla volta** (*one-phase-on* o *wave drive mode*) ci si trova nella situazione già vista nelle figg. 32 e 33: se si applicano uno o più impulsi di tensione agli avvolgimenti in successione corretta, per ogni impulso si ottiene uno spostamento angolare, detto passo, di  $90^\circ$ .
- Se si azionano **due fasi alla volta** (*two-phase-on* o *normal drive mode*) si ottengono ancora dei passi di  $90^\circ$ , ma con una coppia meccanica maggiore, perché ottenuta dal contributo di due fasi.
- Se si opera combinando i due metodi precedenti si ottiene un funzionamento a mezzo passo alla volta (*half step mode*). In questo caso si ottengono però coppie meccaniche alternativamente diverse.

### Necessità di più coppie magnetiche

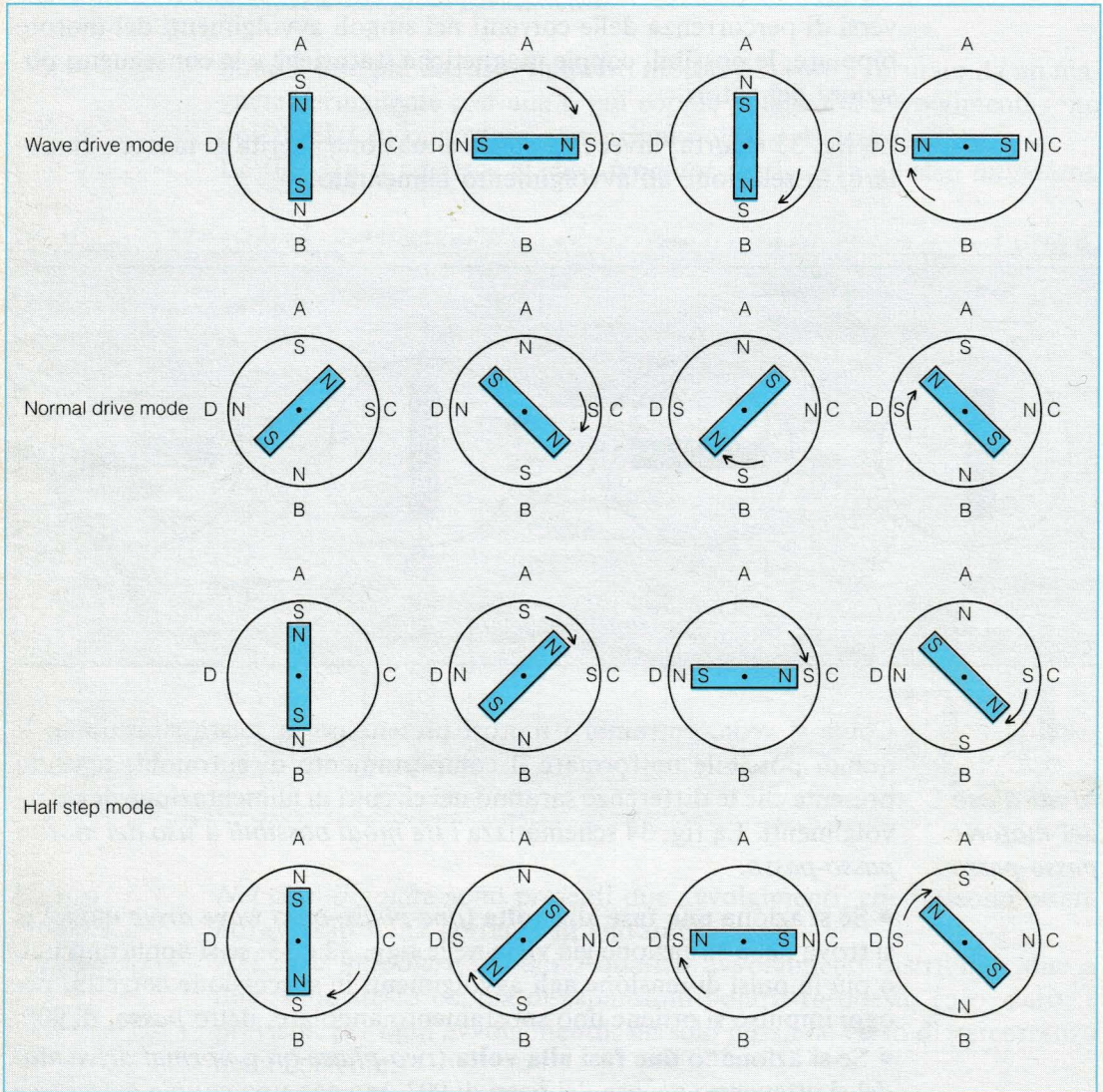
Nelle realtà le coppie magnetiche rotoriche sono più di due, in modo da ottenere passi di valore piccolo.

Gli angoli di passo (*step angle*) più diffusi sono  $1,8^\circ$  -  $3,75^\circ$  -  $7,5^\circ$  -  $9^\circ$  e  $15^\circ$ , a cui corrispondono i seguenti passi per giro (*step per revolution*): 200 - 96 - 48 - 40 e 24.

Tra il motore bipolare e quello unipolare non esistono sostanziali differenze nelle prestazioni, ma quello unipolare permette una maggiore



FIG. 34



*semplicità nella realizzazione del circuito di azionamento di potenza.* Attualmente, però, sono disponibili appositi integrati che semplificano il problema e, in conseguenza, *risultano preferibili quelli bipolari, che non richiedendo un doppio avvolgimento* per espansione polare, si possono realizzare con fili di sezione maggiore e pertanto con maggiore potenza a parità di dimensioni.

### **Motori a riluttanza variabile**

*Sono più veloci*

Nei motori a magnete permanente non è possibile ottenere elevate velocità a causa del campo magnetico rotorico. Si ricorre allora ai motori



a riluttanza variabile, che *risultano più veloci*, ma presentano una *minore coppia* e un *maggior costo*.

In questi motori il rotore, a più espansioni polari, risulta di materiale ferromagnetico anziché a magneti permanenti.

La distribuzione degli avvolgimenti risulta sostanzialmente la stessa degli altri motori passo-passo: in relazione alla fase attivata, secondo i criteri già esposti, *il rotore soggetto al campo magnetico si orienta secondo la direzione a minima riluttanza magnetica*, producendo in tal modo lo spostamento di un passo. ←

### Caratteristica coppia-frequenza

Come si è già accennato, il motore passo-passo può essere usato in due diversi modi:

**Possibili  
modi di  
funzionamento**

- in *regime passo-passo*;
- in *regime continuo*.

Nel primo caso si fornisce al motore un *impulso singolo*, a cui corrisponde una rotazione di *un angolo di passo*. ←

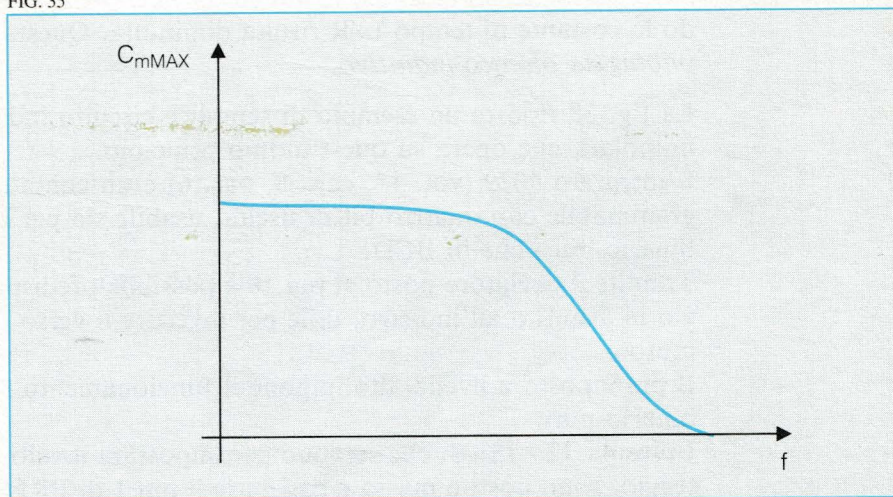
Nel secondo caso si forniscono una *sequenza di impulsi* agli avvolgimenti, in modo da ottenere una *rotazione continua*.

**Limite  
massimo  
della velocità  
di rotazione**

In questo secondo caso è necessario che, in relazione alla coppia resistente, la frequenza di successione degli impulsi non superi un certo valore, per evitare che il motore “perda il passo”, arrivando anche a bloccarsi.  $f < f_c$

La fig. 35 indica l'andamento tipico della coppia massima applicabile a regime in funzione della frequenza di passo; *all'avviamento*, ovviamente, *la massima coppia è più limitata a causa dell'inerzia meccanica*.

FIG. 35





## 8 CIRCUITI PER IL PILOTAGGIO DEI MOTORI PASSO-PASSO

### *Pilotaggio in tensione*

Nel caso di *motori unipolari* il circuito base è riportato in fig. 36, e rappresenta un *classico pilotaggio in tensione*.

In questo circuito sono riportate anche le tabelle della successione degli stati ON-OFF dei BJT nei tre modi di possibile funzionamento del motore. In queste tabelle sono riportati anche i diagrammi di stato delle variabili ABCD, che convenzionalmente presentano il livello logico 1 in corrispondenza dell'attivazione del rispettivo avvolgimento; nella numerazione degli stati, lo stato iniziale 1 (ABCD = 0101) è stato scelto convenzionalmente.

Per i *motori bipolari* si deve invece ricorrere a una *struttura a ponte*, come riportato in fig. 37, che, *tramite la conduzione di due BJT alla volta*, permette l'inversione del verso della corrente nei singoli avvolgimenti.

In questo caso le variabili convenzionali ABCD sono a 1 quando il corrispondente avvolgimento è attraversato dalla corrente con il verso indicato in figura.

Un *inconveniente* che si incontra nell'uso di questi schemi consiste nel fatto che la costante di tempo elettrica del singolo avvolgimento  $\tau_e = L/R$  determina un tempo pari a circa  $5\tau_e$  *per portare nell'avvolgimento la corrente di piena conduzione*, da quando entra in conduzione il corrispondente BJT, limitando quindi la velocità di funzionamento del motore.

### *Pilotaggio R-L*

Una *semplice soluzione* al problema consiste nel porre in serie alla singola fase una resistenza di alcuni ohm e di alimentare il tutto con una tensione più elevata: la resistenza deve essere dimensionata in modo che a regime la corrente assuma il valore corretto; però, in questo modo la costante di tempo  $L/R$  risulta diminuita. Questa tecnica è detta *pilotaggio ohmico-induttivo*.

La fig. 38 riporta un esempio di semplice circuito, adatto per motori unipolari, che opera su quest'ultimo principio.

L'integrato 4029 (vol. 1°, cap. 8, par. 6) è un contatore up/dw programmabile con quattro bit di uscita, usabile sia per un conteggio in binario puro che in BCD.

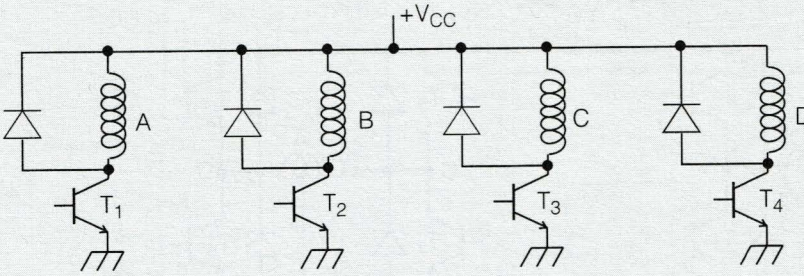
Tramite il deviatore posto al pin 10 è possibile predisporre un conteggio in avanti o all'indietro, utile per invertire il verso di rotazione del motore.

Il pin 9 posto a livello alto impone il funzionamento del contatore in binario puro.

I pins 4 - 12 - 13 - 3, che servono per impostare il valore di inizio conteggio, sono posti a massa e così pure il pin 1 di PRESET ENABLE.



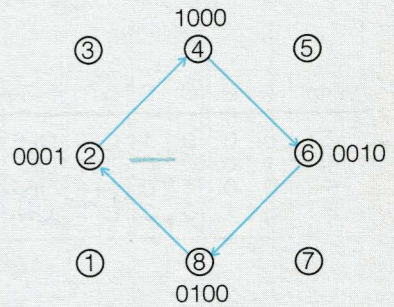
FIG. 36



stato	A	B	C	D	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
2	0	0	0	1	OFF	OFF	OFF	ON
4	1	0	0	0	ON	OFF	OFF	OFF
6	0	0	1	0	OFF	OFF	ON	OFF
8	0	1	0	0	OFF	ON	OFF	OFF

UNA FASE ALLA VOLTA

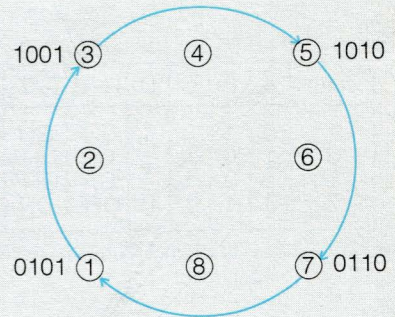
Wave drive mode



stato	A	B	C	D	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
3	1	0	0	1	ON	OFF	OFF	ON
5	1	0	1	0	ON	OFF	ON	OFF
7	0	1	1	0	OFF	ON	ON	OFF
1	0	1	0	1	OFF	ON	OFF	ON

2 FASI ALLA VOLTA

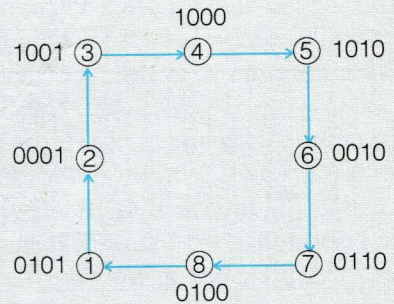
Normal drive mode



stato	A	B	C	D	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>
1	0	1	0	1	OFF	ON	OFF	ON
2	0	0	0	1	OFF	OFF	OFF	ON
3	1	0	0	1	ON	OFF	OFF	ON
4	1	0	0	0	ON	OFF	OFF	OFF
5	1	0	1	0	ON	OFF	ON	OFF
6	0	0	1	0	OFF	OFF	ON	OFF
7	0	1	1	0	OFF	ON	ON	OFF
8	0	1	0	0	OFF	ON	OFF	OFF

MEZZO PASSO ALLA VOLTA

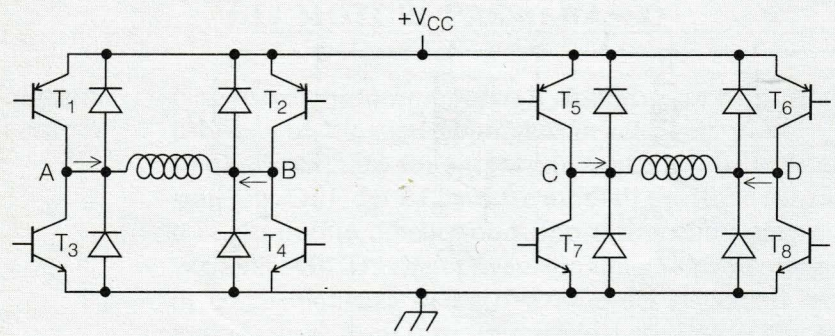
Half step mode



Pilotaggio dei motori unipolari



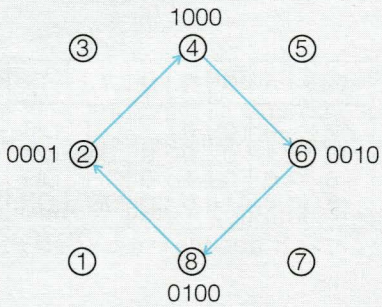
FIG. 37



stato	A	B	C	D	T <sub>1</sub> -T <sub>4</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub> -T <sub>8</sub>	T <sub>6</sub> -T <sub>7</sub>
2	0	0	0	1	OFF	OFF	OFF	ON
4	1	0	0	0	ON	OFF	OFF	OFF
6	0	0	1	0	OFF	OFF	ON	OFF
8	0	1	0	0	OFF	ON	OFF	OFF

UNA FASE ALLA VOLTA

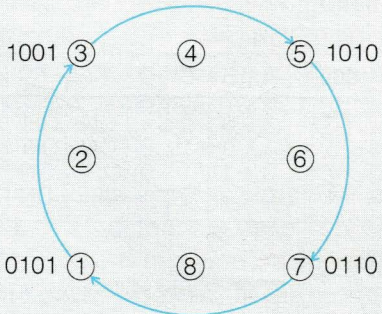
Wave drive mode



stato	A	B	C	D	T <sub>1</sub> -T <sub>4</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub> -T <sub>8</sub>	T <sub>6</sub> -T <sub>7</sub>
1	0	1	0	1	OFF	ON	OFF	ON
3	1	0	0	1	ON	OFF	OFF	ON
5	1	0	1	0	ON	OFF	ON	OFF
7	0	1	1	0	OFF	ON	ON	OFF

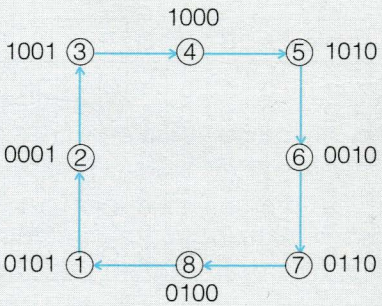
2 FASI ALLA VOLTA

Normal drive mode



stato	A	B	C	D	T <sub>1</sub> -T <sub>4</sub>	T <sub>2</sub> -T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub> -T <sub>8</sub>	T <sub>6</sub> -T <sub>7</sub>
1	0	1	0	1	OFF	ON	OFF	ON
2	0	0	0	1	OFF	OFF	OFF	ON
3	1	0	0	1	ON	OFF	OFF	ON
4	1	0	0	0	ON	OFF	OFF	OFF
5	1	0	1	0	ON	OFF	ON	OFF
6	0	0	1	0	OFF	OFF	ON	OFF
7	0	1	1	0	OFF	ON	ON	OFF
8	0	1	0	0	OFF	ON	OFF	OFF

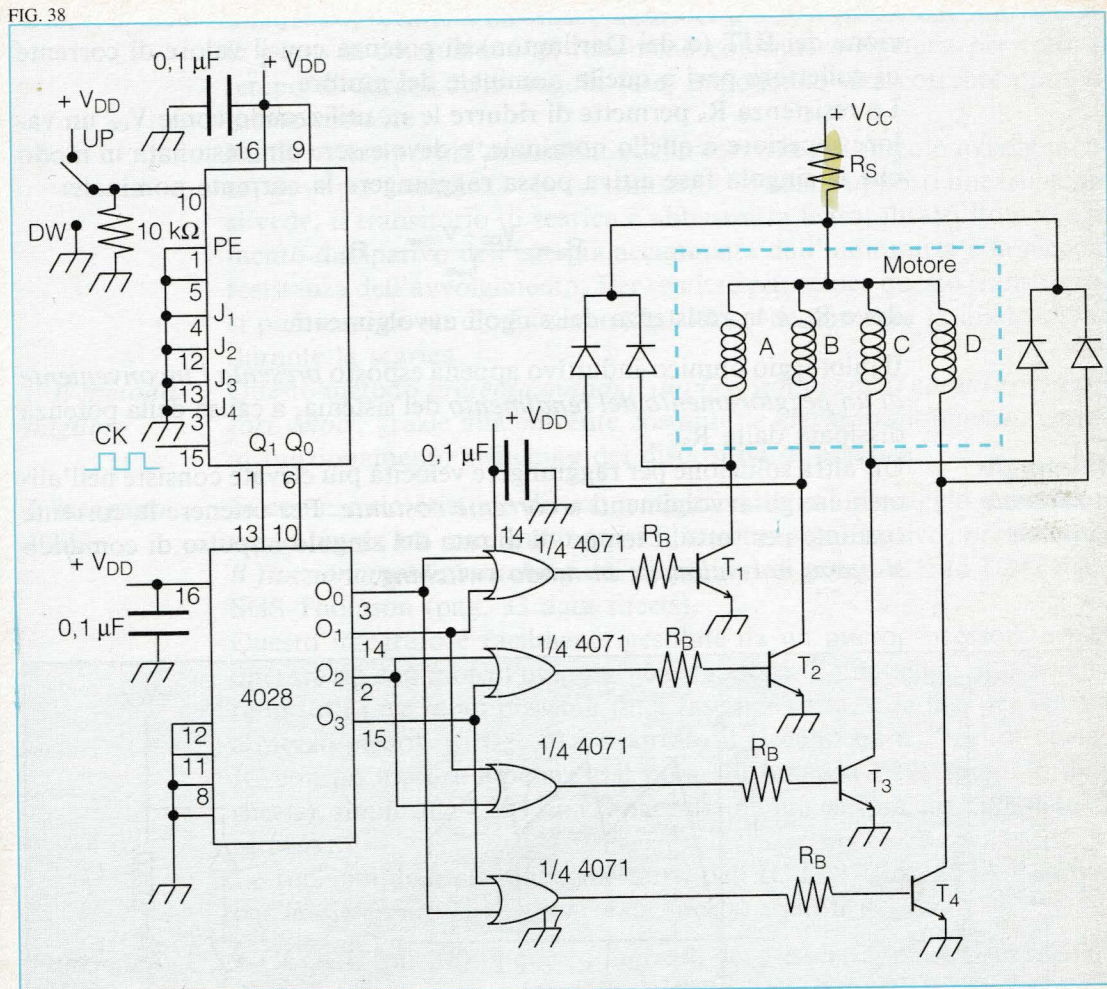
Half step mode



Pilotaggio dei motori bipolari



FIG. 38



Non essendo quindi previsto un particolare stato iniziale del contatore, l'inizio del conteggio all'accensione avviene casualmente. Questo, essendo richiesto un funzionamento ciclico, non crea comunque alcun problema.

Poiché in questo contatore vengono usate solo le due uscite meno significative, si comporta come fosse un modulo quattro. Queste uscite sono collegate a un decoder da 4 a 10 (da BCD a decimale), con uscite attive alte che, presentando i due pins di ingresso corrispondenti ai bit più significativi a livello zero, si comporta da decoder da 2 a 4.

Se le uscite dal decoder venissero direttamente collegate, secondo una sequenza corretta, alle resistenze in serie alle basi dei BJT di potenza si otterrebbe il funzionamento del motore con una fase alla volta (one-phase-on); interponendo invece i quattro OR, si ottiene il funzionamento con due fasi alla volta (two-phase-on).



Le resistenze di base devono essere dimensionate per ottenere la saturazione dei BJT (o dei Darlington) di potenza con il valore di corrente di collettore pari a quella nominale del motore.

La resistenza  $R_s$  permette di ridurre le  $\tau_e$ , utilizzando come  $V_{CC}$  un valore superiore a quello nominale, e deve essere dimensionata in modo che la singola fase attiva possa raggiungere la corrente nominale:

$$R_s = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{I_{nom}} - R_m$$

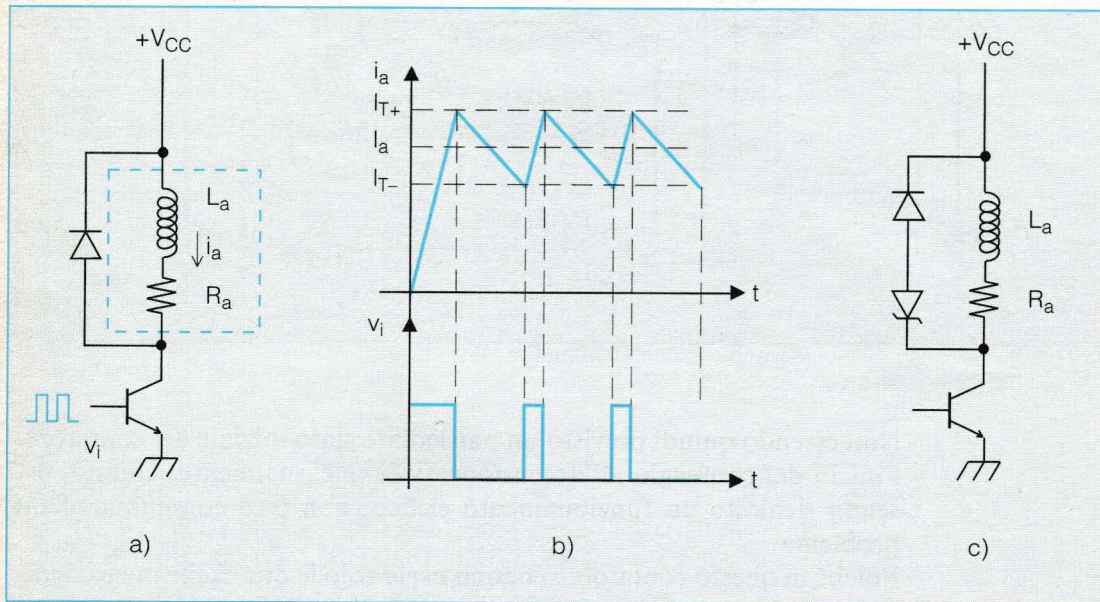
dove  $R_m$  è la resistenza dei singoli avvolgimenti.

Il pilotaggio ohmico-induttivo appena esposto *presenta l'inconveniente di un peggioramento del rendimento del sistema*, a causa della potenza dissipata dalla  $R_s$ .

### Pilotaggio a corrente costante

Un'altra soluzione per raggiungere velocità più elevate consiste nell'alimentare gli avvolgimenti a *corrente costante*. Per ottenere la corrente costante per tutto il tempo di durata del singolo impulso di comando si *opera normalmente in modo switching*.

FIG. 39



La fig. 39a sintetizza, per un singolo avvolgimento, il principio base di questo metodo.

La tensione di alimentazione  $V_{CC}$  assume un valore *superiore a quello nominale* e, quindi, la corrente tende ad assumere anch'essa un valore superiore a quello nominale: appena viene superato un certo valore di soglia superiore  $I_{T+}$ , il BJT viene interdetto e, di conseguenza, l'induttanza si inizia a scaricare attraverso il diodo; appena la corrente, di-



minuendo, scende a un valore inferiore a  $I_{T-}$ , il BJT viene nuovamente posto in conduzione. Il fenomeno continua a ripetersi per tutto il tempo di durata della singola fase, imponendo una corrente praticamente costante.

La fig. 39b riporta l'andamento della corrente nel singolo avvolgimento, dove per semplicità i brevi transistori si sono supposti lineari: come si vede, il transitorio di scarica è abbastanza lento, infatti l'unico elemento dissipativo dell'energia accumulata dall'induttanza è la piccola resistenza dell'avvolgimento. Per rendere più veloce questo transitorio, si può inserire un diodo zener (fig. 39c), che aumenta la dissipazione durante la scarica.

*È il metodo migliore*

Questo metodo presenta quindi il duplice vantaggio di garantire transistori veloci, grazie alla corrente costante, e elevato rendimento, grazie al funzionamento switching dei dispositivi di potenza.

*L'integrato L297*

In commercio esistono diversi integrati adatti al pilotaggio dei motori passo-passo; tra questi uno particolarmente significativo, previsto per il funzionamento switching dei dispositivi di potenza, è lo L297 della SGS-Thomson (pag. 33 data sheets).

Questo integrato è facilmente gestibile da un microprocessore e può operare sia con motori unipolari che bipolari. Il pilotaggio può avvenire in tutti i tre modi possibili (una fase per volta, due fasi per volta e a mezzo passo). In fig. 40 è riportato il circuito base d'uso di questo IC con un motore bipolare e il ponte di potenza L298 (pag. 40 data sheets), simile allo L293, ma capace di una più elevata corrente di uscita (4 A).

Le funzioni dei pins più significativi dell'IC L297 (lo L297A è simile, per le differenze si rinvia ai data sheets) sono le seguenti:

*Funzione dei pins*

- $\overline{\text{CLOCK}}$  (pin 18): a questo ingresso deve essere applicato un segnale di clock, si tratta di un ingresso attivo basso (è il livello basso che incrementa la successione degli stati).
- $\text{CW}/\overline{\text{CCW}}$  (pin 17): permette l'inversione del verso di rotazione.
- $\text{HALF}/\overline{\text{FULL}}$  (pin 19): permette di scegliere tra il funzionamento a mezzo passo (half step) e a passo intero (full step). Se si sceglie il passo intero (pin 19 a livello basso) la selezione tra una fase alla volta o due fasi alla volta avviene in modo automatico, in relazione allo stato del sistema al momento della messa a zero del pin 19 (facendo riferimento alla fig. 36 o alla fig. 37, se lo stato è dispari (1 - 3 - 5 o 7) si ottiene il funzionamento a due fasi alla volta, se lo stato è pari (2 - 4 - 6 o 8) si ottiene il funzionamento a una fase per volta).
- $\overline{\text{RESET}}$  (pin 20): tramite questo ingresso è possibile fissare lo stato iniziale 1 (ABCD = 0101).
- $\text{ENABLE}$  (pin 10): se posto alto attiva l'integrato (se basso, le uscite A - B - C - D - INH1 - INH2 sono anch'esse fisse basse).
- $\text{CONTROL}$  (pin 11) - INH1 (pin 5) e INH2 (pin 8) -  $V_{\text{ref}}$  (pin 15) -



**SENSE1 (pin 14) e SENSE 2 (pin 13):** l'ingresso di CONTROL permette di scegliere tra due modi di funzionamento in commutazione: se posto a livello basso agisce sulle uscite INH1 e INH2; se posto alto agisce sulle uscite ABCD.

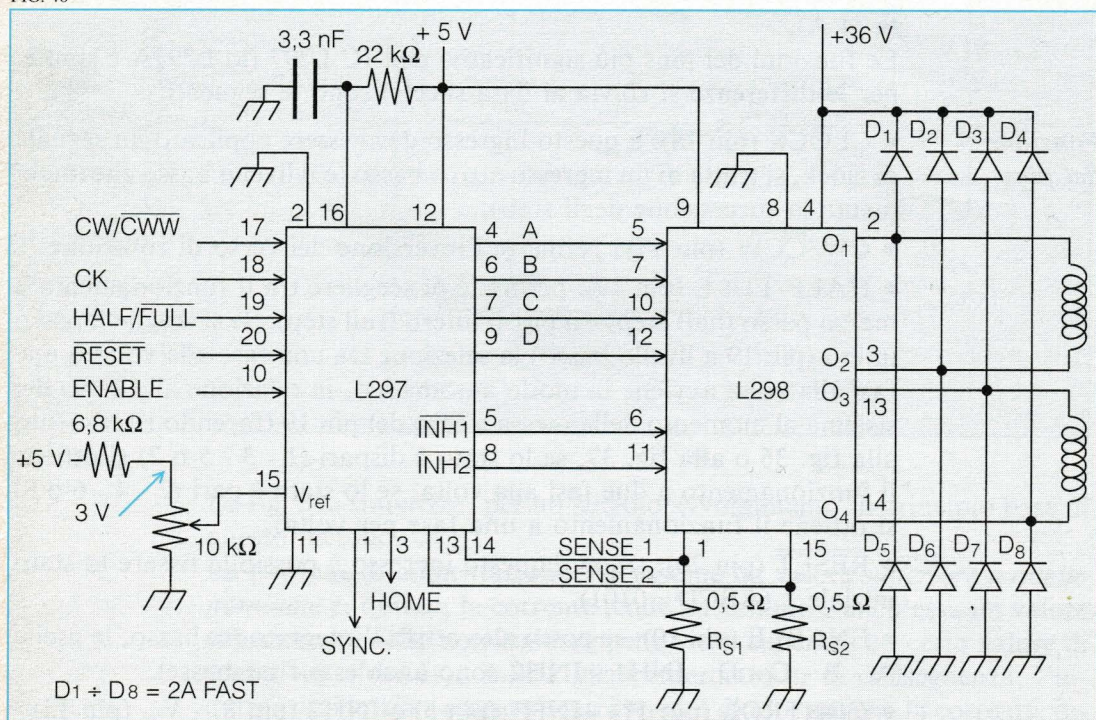
Nel primo modo d'uso si ha un abbinamento ottimale con il ponte L298: quando la tensione ai capi di  $R_{S1}$  (o  $R_{S2}$ ), che è attraversata dalla corrente della fase A o B (C o D), supera la tensione di riferimento al pin 15 dell'integrato L297 (valore massimo applicabile 3 V), l'uscita INH1 (o INH2) viene posta a livello basso, disattivando gli stadi di uscita dell'IC L298 delle fasi A e B (o C e D), fino al nuovo impulso dell'oscillatore interno dell'IC L297. In questo modo si ottiene un funzionamento a corrente costante (il valore di corrente è regolabile tramite il valore di  $V_{ref}$ ).

- **OSC (pin 16):** il gruppo RC facente capo a questo pin permette di determinare la frequenza dell'oscillatore switching interno:

$$f \approx \frac{1}{0.69 \cdot RC} \quad \text{con} \quad R > 10 \text{ k}\Omega$$

- **SYNC (pin 1):** fornisce il segnale dell'oscillatore interno e permette di collegare più L297 con lo stesso CK (ommettendo negli altri i gruppi RC), ottenendo quindi tra questi un perfetto sincronismo. Questo pin può essere usato anche per applicare all'IC un clock esterno.

FIG. 40





**LABORATORIO**

Volendo procedere a un'analisi sperimentale dei circuiti di pilotaggio dei motori passo-passo, è possibile fare riferimento a uno qualsiasi dei circuiti descritti in questo paragrafo. Si consiglia, per la facilità di reperimento dei componenti e la semplicità concettuale, di iniziare con il semplice circuito di fig. 38. In questo circuito, in particolare, i valori dei componenti incogniti può essere ricavato conoscendo i valori nominali della tensione e della corrente del motore. Mancando indicazioni, la corrente può essere ricavata indirettamente, nota la tensione, dal valore della resistenza dei singoli avvolgimenti, facilmente misurabile.

**Esempio**

Supposte la tensione nominale  $V_N = 9 \text{ V}$  e la resistenza dell'avvolgimento  $R_a = 4 \Omega$ , si ottiene una corrente nominale  $I_N = 2,25 \text{ A}$  e, quindi, supposto di porre  $V_{CC} = 12 \text{ V}$  si ottiene:

$$R_s \approx \frac{12}{2,25} - 4 = 1,3 \Omega$$

Si controlli, in particolare, che, togliendo  $R_s$  e portando al valore nominale la tensione, il limite massimo della velocità si riduce.

**9 MOTORI UNIVERSALI**

**Funzionano  
in dc e in ac**

Si tratta di motori molto diffusi nei *piccoli elettrodomestici* (frullatori, asciugacapelli ecc.) e nelle *piccole macchine utensili* (trapani, levigatrici ecc.) e *devono il loro nome al fatto di poter funzionare sia in dc che in ac*.

**Sono come  
i motori  
in dc con  
eccitazione  
seriale**

Costruttivamente sono realizzati come i *motori in corrente continua con eccitazione seriale* (il campo magnetico induttore è prodotto da un avvolgimento statorico, posto in serie a quello rotorico).

Il funzionamento in alternata è possibile grazie al fatto che la periodica inversione del campo induttore avviene in contemporanea all'inversione del verso di percorrenza della corrente nell'avvolgimento rotorico (gli avvolgimenti sono in serie) e, quindi, la coppia motrice mantiene sempre lo stesso verso.

**Ha un solo  
verso  
di rotazione**

In conseguenza di quanto detto, *non è possibile* in questi motori *ottenere l'inversione del verso di rotazione* invertendo le polarità dell'alimentazione.

**Utilità  
della struttura  
laminata**

Per garantire un funzionamento in alternata ottimale, la struttura magnetica è realizzata con *lamierini magnetici* tra loro isolati. La struttura laminata è tipica di tutte le macchine in ac e serve a ridurre le perdite nel materiale magnetico (le cosiddette *perdite nel ferro*) dovute alle *correnti parassite*: il flusso di induzione magnetica, che in ac è variabile,