

Lo schema di fig. 4.19a illustra il metodo più semplice per comandare un motore. Il BJT viene fatto lavorare come interruttore; nello stato ON sul motore viene applicata una tensione di armatura pari a  $V_a = V_{CC} - V_{CE(sat)}$ , che ne provoca la rotazione, mentre nello stato OFF la corrente viene interrotta ed il motore cessa di essere alimentato. Il diodo di libera circolazione posto in antiparallelo al motore evita pericolose sovratensioni ai capi del BJT, provocate nella commutazione ON-OFF dalla componente induttiva  $L_a$  del motore.

Un semplice schema di amplificatore in funzionamento lineare adatto a controllare la velocità di un motore è quello illustrato in fig. 4.19b. La configurazione è quella di un inseguitore di emettitore: la tensione di ingresso  $V_i$  viene trasferita, a meno della  $V_{BE}$  del BJT, sull'armatura del motore, controllandone così la velocità. L'ingresso deve solo fornire la corrente di base, mentre la corrente di armatura viene erogata attraverso il BJT dall'alimentazione. Per ridurre il valore della corrente di base, spesso al semplice BJT si sostituisce una configurazione Darlington.

In fig. 4.20 è illustrato un altro esempio di controllo di velocità con amplificatore funzionante in regime lineare. Viene utilizzato l'amplificatore operazionale di potenza L165

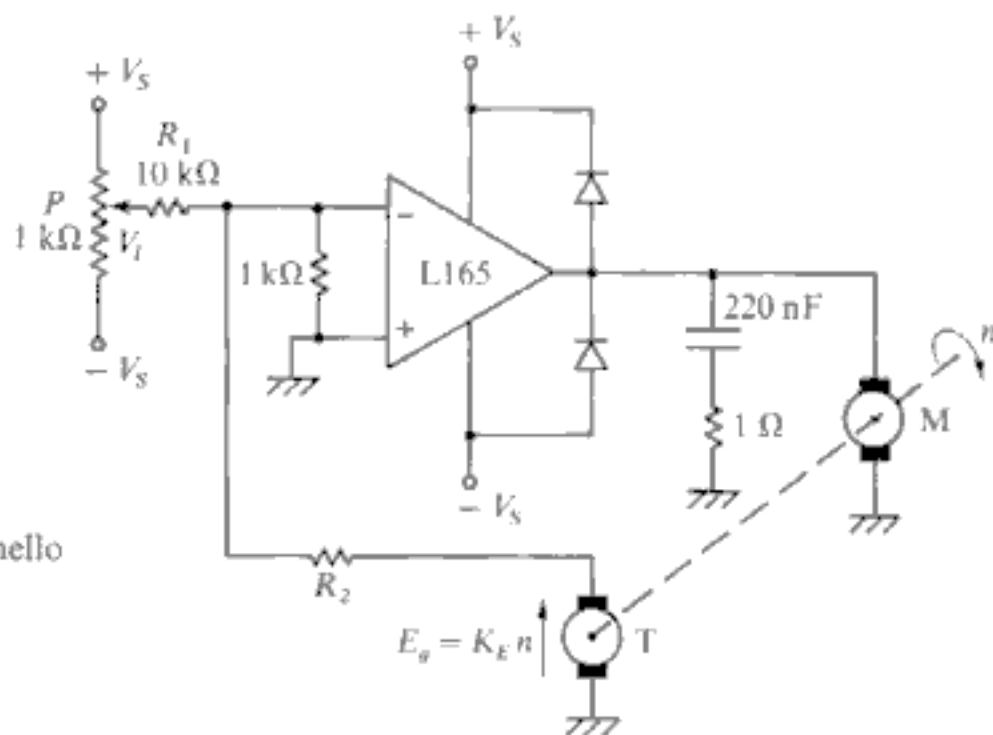


Fig. 4.20 - Controllo lineare con anello di reazione.

della SGS, in grado di erogare una corrente massima di 3 A. Il motore, ai cui morsetti è applicata la tensione fornita dall'amplificatore, ruotando mette in moto un *trasduttore tachimetrico* (vedi NA6-1), che a sua volta genera una tensione  $E_g$  proporzionale al numero dei giri secondo la costante  $K_E$ . L'anello di reazione viene chiuso portando  $E_g$  in un nodo di confronto all'ingresso dell'amplificatore. Poiché l'ingresso invertente si trova a massa virtuale, vale la relazione

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{E_g}{R_2} = -\frac{K_E n}{R_2} \quad [4.30]$$

da cui segue

$$n = -\frac{R_2}{K_E R_1} V_i \quad [4.31]$$

Pertanto la tensione d'ingresso o di riferimento  $V_i$  prelevata dal partitore viene a controllare la velocità e il verso di rotazione del motore.

I sistemi di regolazione ad anello chiuso come questo, essendo sistemi reazionati negativamente, stabilizzano la velocità nei confronti delle variazioni del carico e delle fluttuazioni dell'alimentazione. I due diodi di ricircolazione vengono inseriti per proteggere l'uscita dell'amplificatore dalle sovratensioni provocate dalla componente induttiva del motore. Il gruppo  $RC$  in uscita compensa, come si è già visto negli amplificatori audio, la componente induttiva del carico, impedendo l'innescio di oscillazioni alle alte frequenze. La resistenza di basso valore posta fra gli ingressi dell'operazionale è consigliata dal costruttore.

Nel controllo dei motori vengono usate anche configurazioni a ponte analoghe a quelle viste per gli amplificatori audio.

## Controllo in PWM

Il controllo in funzionamento lineare presenta però alcuni inconvenienti: innanzi tutto gli amplificatori devono essere in grado di dissipare una notevole potenza; inoltre il rendimento, inteso come rapporto fra la potenza fornita al motore e la potenza erogata dall'alimentazione, scende a valori molto bassi quando il motore gira a bassa velocità. Questi inconvenienti vengono viceversa superati nel tipo di funzionamento impulsivo o in commutazione. Infatti la dissipazione di potenza è di molto inferiore, poiché si verifica o nella fase in cui il componente attivo è in saturazione, e quindi con bassa tensione ai suoi capi, o nella fase di commutazione, normalmente breve.

La tecnica di commutazione PWM consente inoltre un efficace controllo della velocità del motore. Quest'ultimo viene alimentato con una tensione di armatura che, anziché continua, ha andamento rettangolare o impulsivo, con periodo  $T$  costante e ciclo di utilizzo (duty cycle)  $\delta$  variabile. In fig. 4.21 è rappresentata la tensione di armatura per un duty cycle rispettivamente del 50% (a), 75% (b) e 25% (c). La frequenza della tensione di alimentazione viene scelta da qualche kHz in su, fino ai 20 kHz o più, onde evitare la generazione e la diffusione, attraverso i conduttori di alimentazione e la carcassa del motore, di rumore nella gamma delle frequenze udibili.

Tenendo presente che il polo dominante e quindi la frequenza di taglio della funzione di trasferimento del motore dipendono sostanzialmente dalla costante di tempo meccanica

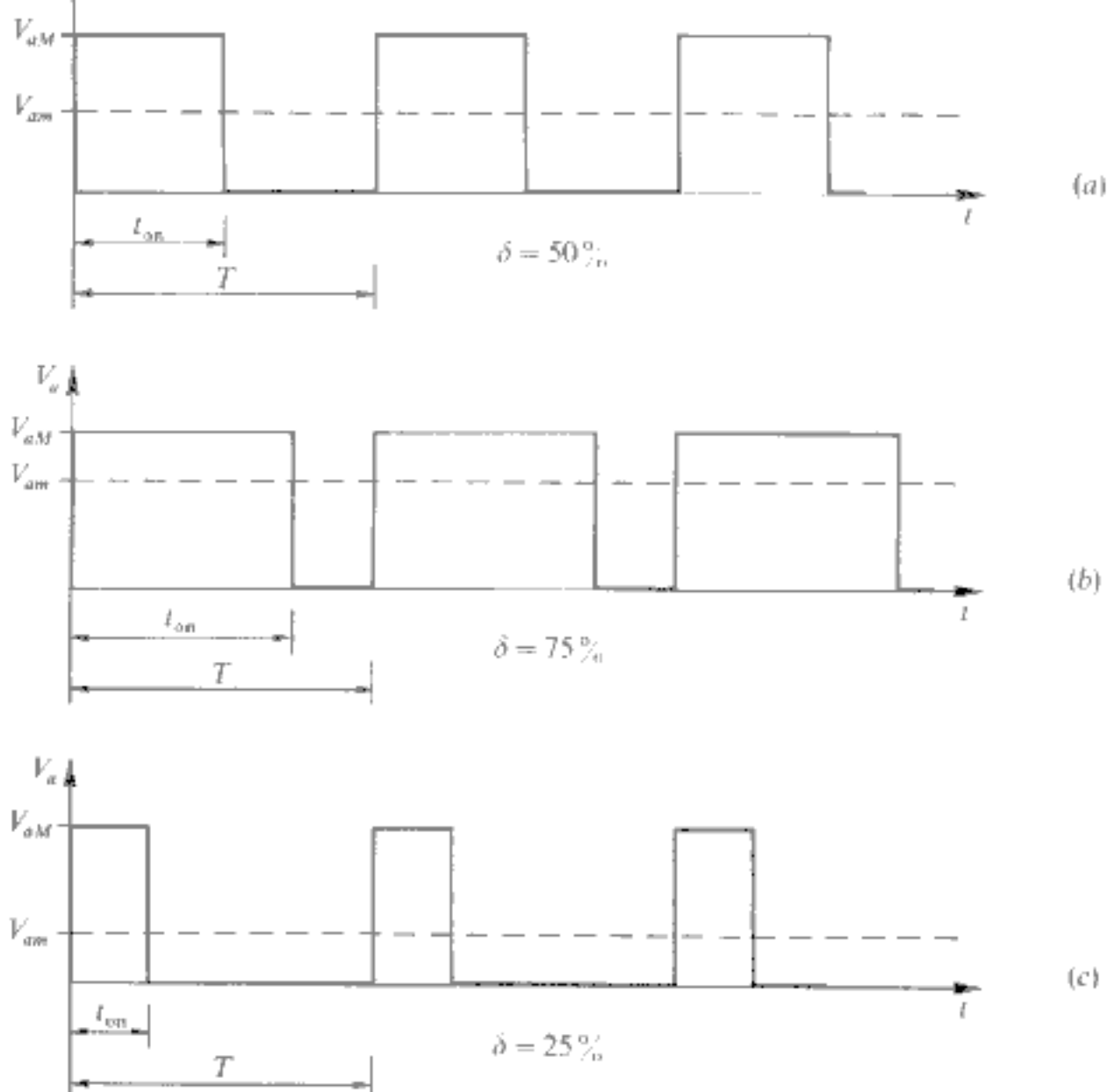


Fig. 4.21 - Tensione di armatura in un controllo a PWM.

( $|p| = 1/\tau_m$ ) e che la frequenza della tensione di armatura è normalmente di molto superiore alla frequenza di taglio, si comprende come soltanto la componente continua  $V_{am}$  produca effetto sul numero dei giri, mentre le armoniche vengano in pratica tagliate. Lo stesso discorso è ancora valido per la corrente di armatura, anche se in questo caso la frequenza di taglio dipende dalla costante elettrica  $\tau_e$  (si veda fig. 4.18a) ed è pertanto più elevata (in realtà la corrente presenta una certa ondulazione intorno al suo valore medio).

In altre parole il motore, sia per la velocità che per la coppia resa, *sente* sostanzialmente il valore medio  $V_{am}$  della tensione di armatura, che a sua volta dipende dal duty-cycle secondo la relazione

$$V_{am} = \frac{t_{on}}{T} V_{aM} = \delta V_{aM} \quad [4.32]$$

Pertanto, riferendosi alla fig. 4.21, è come se al motore venissero applicate rispettivamente tensioni pari a  $0,5 V_{aM}$ ,  $0,75 V_{aM}$  e  $0,25 V_{aM}$ .

In fig. 4.22a è illustrato lo schema di principio di un controllo di velocità PWM. Un amplificatore di errore sente la differenza fra una tensione di riferimento  $V_i$  e la tensione di reazione  $V_f$  generata da un tachimetro, producendo in uscita una *tensione di errore*  $V_e$ . Un

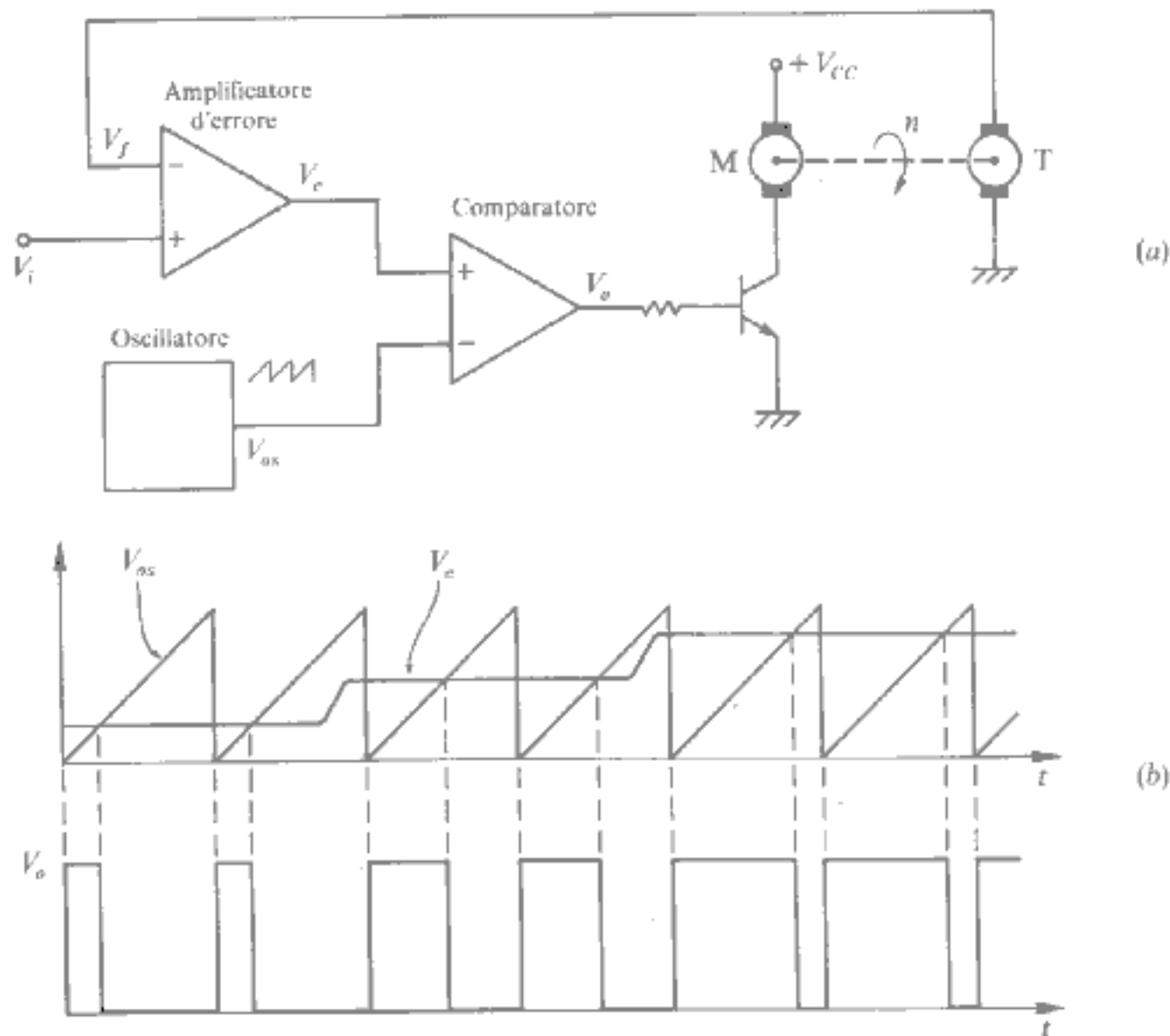


Fig. 4.22 - (a) Schema di controllo in PWM. (b) Forme d'onda significative.

comparatore confronta  $V_e$  con una tensione a dente di sega (o triangolare) di frequenza costante, generata da un oscillatore. L'uscita del comparatore  $V_o$  è un'onda rettangolare, di frequenza costante e duty-cycle variabile con il livello di  $V_e$ , che va a pilotare in commutazione un BJT. Se, per un aumento della coppia di carico applicata al motore o una diminuzione della tensione di alimentazione, diminuisce la velocità del motore, cala anche la tensione prodotta dal tachimetro, cresce di conseguenza  $V_e$  e quindi aumenta il duty cycle all'uscita del comparatore, come illustrato in fig. 4.22b. L'aumento conseguente del valor medio della tensione di armatura contrasta così la diminuzione iniziale di velocità. L'inverso succede se la velocità del motore tende ad aumentare.

# Regolatore di velocità per motori in c.c. a tensione proporzionale senza dinamo tachimetrica

A. Candore

Via Scereé - 21020 Bodio (VA)

È noto che un motore in c.c., sia esso a magneti permanenti che a statore avvolto, diminuisce la propria velocità di rotazione col diminuire della tensione applicata agli avvolgimenti rotorici.

Un motore sottoalimentato, però, avendo a disposizione minor tensione di alimentazione, non può richiedere al circuito di alimentazione più della corrente ad essa proporzionale, che a rotore bloccato è pari a:

$$\frac{V \text{ alimentazione}}{R. \text{ avvolg. rotorici}}$$

Ne consegue che un motore in c.c., sottoalimentato, riduce sia la propria velocità angolare che la coppia da esso stesso fornibile, di modo che, applicando al suo albero una coppia resistente, la sua velocità cala in maniera drastica fino ad arrivare al completo stallo.

Per poter quindi utilizzare un motore in c.c. a velocità ridotta, ma nella sua piena caratteristica di coppia di targa, occorre far sì che all'aumentare della coppia resistente, esso possa richiamare maggior corrente dal circuito di alimentazione, senza però variare in modo sensibile la propria velocità

angolare.

Per ottenere queste prestazioni, nella maggior parte dei casi, si caletta sull'albero del motore una dinamo che funge da tachimetro, reazionando negativamente la tensione da essa sviluppata, in modo che il circuito di alimentazione del motore, ad un calo di numero di giri, aumenti la tensione di alimentazione al rotore nella misura in cui, circolando più corrente negli avvolgimenti rotorici, l'equilibrio:

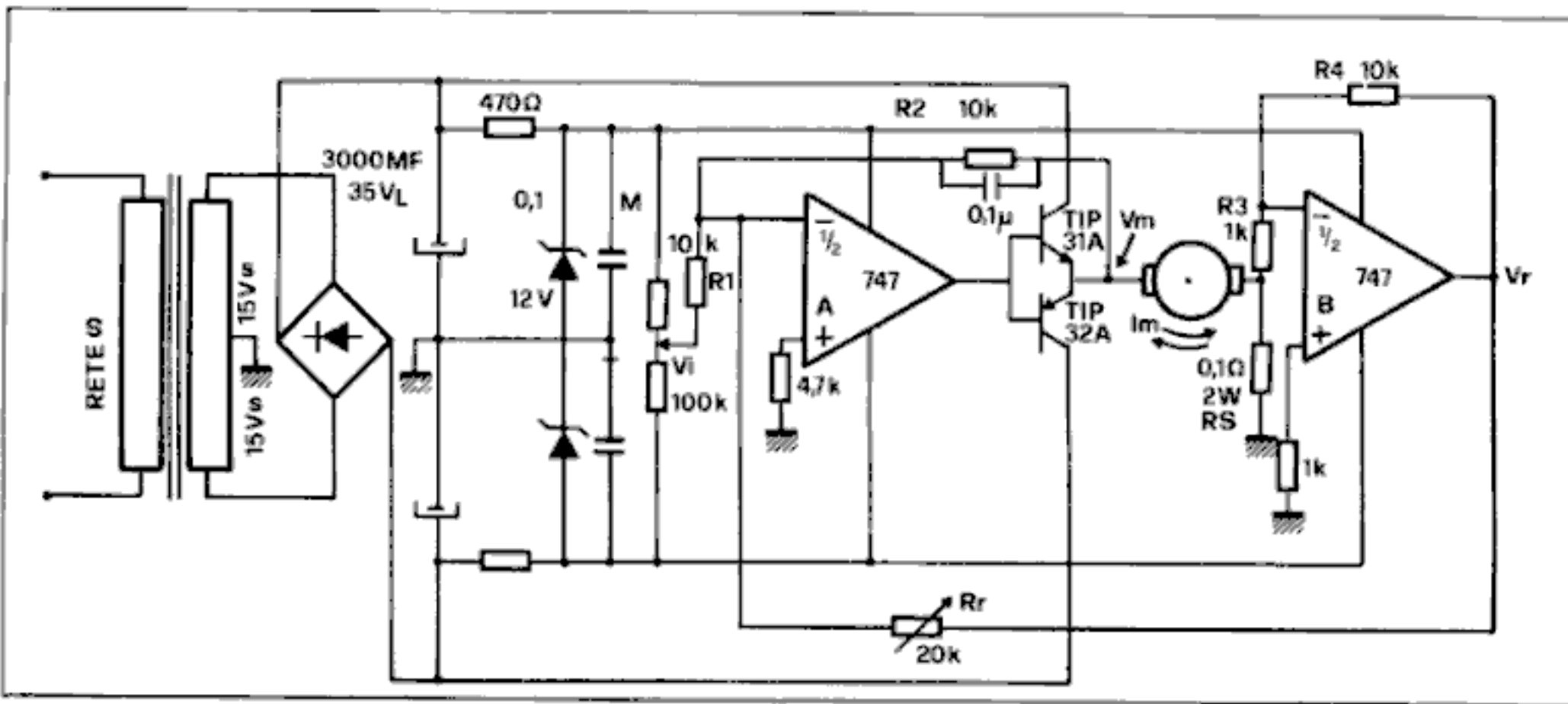
Coppia motrice

Coppia resistente

ritorni pari ad uno e quindi il motore non subisca variazioni della velocità in precedenza impostata.

Negli ultimi anni, la variazione della V di alim. è prevalentemente ottenuta con sistemi a "commutazione" o "switching" o "a tempo proporzionale" che hanno un alto rendimento dovuto alla bassa energia elettrica da dissipare in calore. Essi hanno, però, in alcuni casi, una circuiteria piuttosto complessa e, benché siano ormai disponibili sul mercato in circuiti integrati a costo contenuto, per un loro perfetto utilizzo bisogna corredarli, oltre che della dinamo tachimetrica, di altri circuiti esterni, tali che il loro utilizzo, per motori di piccole potenze, risulta essere sfavorevole rispetto all'impiego di sistemi di alimentazione del tipo "seriale" o "ad ampiezza proporzionale", laddove l'energia da dissipare non risulta poi essere eccessiva.

Per detti circuiti, poi, è altresì più conveniente avere, anziché un'alimentazione unica, un'alimentazione doppia - a simmetria rispetto allo zero - facilmente ottenibile con un trasfor-



matore a presa centrale che aiuta a semplificare ulteriormente il circuito di comando del motore.

Il circuito da noi proposto quale regolatore di velocità per motori in c.c. è del tipo a tensione proporzionale. Esso ha il grosso vantaggio di fare a meno dell'uso di dinamo tachimetrica per mantenere la velocità di rotazione del motore pressochè costante col variare della coppia resistente.

Come si può notare, il circuito, estremamente semplice e comunque funzionale, è composto da un solo 747, due transistori complementari e poche resistenze.

## Funzionamento

L'operazione A fornisce una tensione  $V_m$  al motore pari a:

$$V_m = -V_i \frac{R_2}{R_1} - V_r \frac{R_2}{R_r}$$

All'aumentare della coppia resistente la  $V_m$ , per effetto della diminuita velocità angolare del motore e quindi della forza contro elettromotrice indotta  $E$ , fa fluire nell'avvolgimento rotorico più corrente, determinando così più  $V_s$  ai capi dello shunt  $R_s$ . Detta  $V_s$ , invertita ed amplificata, va a sommarsi - in reazione positiva - alla  $V_i$ , contrastando così il calo di velocità dovuto alla coppia resistente.

Cosicché, detto  $K_m$  il rapporto fra il coefficiente di perdita di velocità del motore e l'assorbimento ( $-V_s$ ) che lo determina (caratteristica questa che varia da motore a motore) e detto  $K_r$  il rapporto fra l'assorbimento ( $-V_s$ ) ed il coefficiente di incremento di velocità del motore proporzionale a:

$$\frac{I_m \cdot R_s \cdot R_4 \cdot R_2}{R_3 \cdot R_r}$$

passiamo a considerare i tre possibili casi.

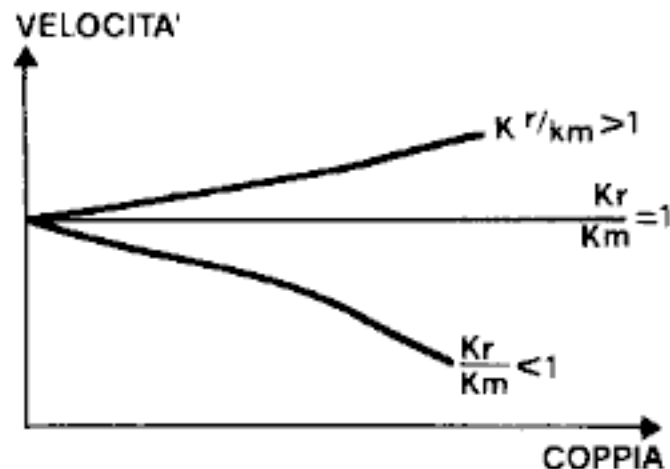
$\frac{K_r}{K_m} < 1$  Il sistema fornisce una reazione "smorzante" per cui agli effetti pratici, il motore non potrà recuperare totalmente la perdita di velocità dovuta al carico.

$\frac{K_r}{K_m} = 1$  È il caso in cui, nei limiti della caratteristica del motore, la velocità angolare di quest'ultimo rimarrà pressochè costante al variare della coppia resistente.

$\frac{K_r}{K_m} > 1$  È questo il caso, non del tutto indesiderato, in cui il motore addirittura aumenta la propria velocità angolare all'aumentare della coppia resistente.

Nel primo dei tre casi, il circuito funziona come limitatore di coppia, invertendo, però, il segno alla  $V_r$ .

Nel secondo caso il circuito soddisfa la maggior parte delle



applicazioni industriali, ove occorre mantenere la velocità costante con qualsiasi coppia resistente. Inoltre esso fornisce al motore anche una coppia di stallo pari alla coppia massima.

Nel terzo caso il circuito presenta il vantaggio di tenere il motore a basso regime di giri in assenza di carico meccanico, aumentandogli, però, automaticamente la velocità quando ad esso vien richiesto lavoro. Ciò potrebbe risultare utile alla vita del motore stesso o per particolari lavorazioni meccaniche per le quali il motore viene utilizzato.

Le tre diverse condizioni qui descritte, sono ottenute, come esposto, variando il valore della  $R_r$  e quindi l'incidenza della  $V_r$  sulla  $V_m$ .

Occorre tener presente che per  $K_r \gg K_m$ , la corrente rotorica può assumere valori superiori alla  $I_{max}$  consigliata dal costruttore del motore. Occorrerà in tal caso ben valutare il tempo di persistenza in tali condizioni per scongiurare un eccessivo riscaldamento degli avvolgimenti del motore. È consigliabile nel caso, l'utilizzo di un semplice circuito di protezione e soglia che tenga conto della  $V_s$  alla  $I_m$ .

Come si diceva all'inizio, il sistema qui presentato è del tipo "a tensione proporzionale" ed avendo il grosso vantaggio di non richiedere l'utilizzo né della dinamo tachimetrica, né di encoder a cui applicare un convertitore F/V, risulta avere un costo estremamente basso che ne giustifica perciò ampiamente il rendimento non eccessivo.

Tutti questi vantaggi legati alla semplicità del circuito, al suo basso costo, alla sua facile realizzazione e taratura, vengono però a scemare per potenze via via crescenti. A nostro avviso un buon rendimento del sistema è da ricercarsi per motori la cui potenza elettrica non superi i 25 ÷ 30 W.

I valori dei componenti riportati a schema sono stati definiti per un motore a magnete permanente con tali caratteristiche:

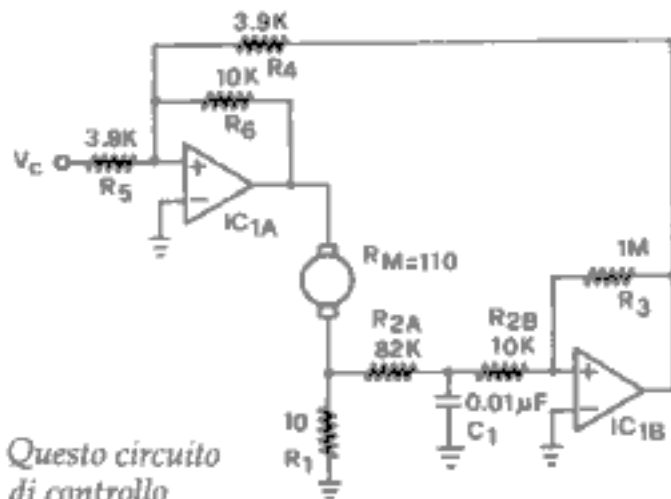
$V_{max} = 12$  V; RPM 5200; Pot. mecc. resa = 3,8 W.  
 $I_o = 8$  ma; F.E.M. 2,3 V/1000 rpm; Indutt. = 0,8 mH.  
 $R$  a 22° = 9,4 Ω; Costante di coppia = 21,9 mNm/A.  
 Costante di tempo meccanica = 17 msec.

# Controllo di velocità di un motore senza tachimetro

D. Wolze, KLA Instruments, Santa Clara, California

Il circuito riportato in figura 1 è un regolatore di velocità bidirezionale adatto per motori di bassa potenza; ha la caratteristica di non richiedere tachimetro. La tensione applicata al motore dall'amplificatore IC1a è pari a:

$$\left[ V_c + R_1 \left( \frac{R_3}{R_{2A} + R_{2B}} \right) \right] I_m \left( \frac{R_6}{R_5} \right),$$



Questo circuito di controllo permette una regolazione della velocità di rotazione in entrambe le direzioni senza uso di tachimetro.

dove  $V_c$  è la tensione di comando e  $I_m$  la corrente che scorre nel motore.

Se la resistenza equivalente degli

avvolgimenti e delle spazzole del motore  $R_m$  è pari a:

$$R_1 \left( \frac{R_3}{R_{2A} + R_{2B}} \right),$$

la tensione di comando diventa proporzionale alla forza contro-elettromotrice che si sviluppa sull'avvolgimento.

Il condensatore  $C_1$  provvede alla compensazione in frequenza. Il valore di  $R_1$  deve essere pari al 5-10% del valore di  $R_m$ . Quest'ultimo generalmente è indicato nelle specifiche del motore. ■

