SENSORI E TRASDUTTORI

Prof. Matteo OLIVO
Prof. Simone CASTELLAN

SENSORI E TRASDUTTORI

- **Sensore**: dispositivo in grado di rilevare una grandezza, interagendo con essa, ricevendone energia e modificando il proprio stato, cioè variando una sua proprietà (lunghezza, resistenza elettrica, ecc.). Oltre che in base alla grandezza rilevata i sensori sono classificati in base al principio fisico di funzionamento.
- **Trasduttore**: denominazione generica di ogni dispositivo atto a ricevere segnali di determinata natura da un mezzo di trasmissione trasformandoli in altri segnali generalmente di diversa natura, che possono essere trasmessi attraverso un altro mezzo di trasmissione.

I trasduttori i cui segnali di uscita sono di natura elettrica sono detti *trasduttori elettrici*. Ad esempio le sonde ad effetto Hall sono trasduttori elettrici che rilevano grandezze elettriche. Le termocoppie sono invece trasduttori elettrici che rilevano una grandezza non elettrica.

TRASDUTTORI ELETTRICI

Si potrebbe dire che un trasduttore elettrico è composto da due parti principali: un sensore ed un condizionatore di segnale.
I trasduttori elettrici possono essere classificati come:

- **Attivi,** generano corrente elettrica o tensione direttamente in risposta a uno stimolo (un esempio è la termocoppia);
- **Passivi,** producono la variazione di una grandezza elettrica passiva, come la capacità, la resistenza o l'induttanza, in seguito a una stimolazione. I trasduttori passivi richiedono solitamente energia elettrica aggiuntiva.

Un altro criterio di classificazione riguarda la natura del segnale:

- i trasduttori **analogici** producono un segnale variabile con continuità in un determinato intervallo (ad es. 0-5 V, 4-20 mA);
- i segnali prodotti dai trasduttori **digitali** assumono valori discreti con codifica binaria.

SEGNALI ANALOGICI E DIGITALI

I moderni sistemi di controllo si basano su schede digitali contenenti uno o più sistemi di elaborazione dati quali MCU (MicroController Unit), DSP (Digital Signal Processor), FPGA (Field-Programmable Gate Array).

I segnali fisici trasdotti sono, per la maggior parte, analogici, e quindi molto spesso devono essere convertiti in digitale per essere trasmessi mediante un protocollo digitale (ad es. etherCAT), e poi acquisiti ed elaborati dal sistema di controllo, basato ad esempio su PLC (Programmable Logic Controller) o PC industriale.
Allo stesso modo le informazioni prodotte dai regolatori potrebbero dover essere riconvertite in analogico per andare su HMI (Human-Machine Interface) o azionare un attuatore. Queste operazioni vengono condotte da opportuni sistemi di conversione analogico-digitale (A/D) o viceversa (D/A).

SEGNALI ANALOGICI E DIGITALI

I segnali analogici sono più versatili per la trasmissione, potendo essere trasmessi sotto forma di onde elettromagnetiche su mezzi fisici (cavo coassiale, doppino telefonico) o non (onde radio), mentre i segnali digitali richiedono un mezzo fisico su cui viaggiare sotto forma di impulsi elettrici o ottici (fibre ottiche).

La conversione analogico-digitale presenta due punti di attenzione:

- **campionamento** dei segnali analogici, cioè rilevazione dei valori (*campioni*) assunti in una successione discreta di istanti;
- **quantizzazione** dei campioni (legata al numero di bit del convertitore A/D) e conseguente perdita di informazione.

Il *sottocampionamento* (la frequenza di campionamento deve essere maggiore del doppio della frequenza massima presente nel segnale da campionare) porta all'*aliasing*, cioè all'impossibilità di distinguere due segnali diversi una volta campionati.

Il *sovracampionamento* porta all'aumento del carico computazionale e dello spazio di archiviazione senza migliorare la qualità.

TRASDUTTORI DI POSIZIONE E VELOCITÀ

Molti trasduttori di velocità sono derivati da quelli di posizione (conteggio di impulsi, derivazione), ma esistono anche sensori di velocità puri (tachimetri).

I trasduttori di posizione/velocità (siano esse angolari o traslative) possono essere classificati in base al principio di funzionamento. Quelli maggiormente utilizzati rientrano in una delle seguenti tipologie:

- induttivi (dinamo tachimetrica, resolver),
- magnetici (trasduttori ad effetto Hall),
- ottici (encoder).

I trasduttori di posizione sono distinti in **assoluti**, se permettono di determinare la posizione dell'elemento mobile rispetto un riferimento fissato, o **incrementali**, se discriminano solo spostamenti relativi.

GENERATORE TACHIMETRICO

Nella sua forma più comune è noto come **dinamo tachimetrica** ed è un piccolo generatore a corrente continua, con la peculiarità che l'eccitazione è a magneti permanenti.

La tensione generata è proporzionale alla velocità e, dato il principio di funzionamento, non rende disponibile l'informazione sulla posizione.

In una forma meno comune i generatori tachimetrici possono essere a corrente alternata. In questo caso la tensione alternata generata viene raddrizzata internamente mediante un raddrizzatore a diodi, ma questo consente limitata precisione a causa dell'ondulazione e li rende adatti solamente per la misura di velocità positive.

Sono i più comuni dispositivi per la retroazione di velocità negli azionamenti a corrente continua, grazie ai seguenti vantaggi:

- resistenza alle sollecitazioni meccaniche ed ampio intervallo di temperatura di esercizio;
- semplicità costruttiva e necessità di solo due cavi per l'interfacciamento con l'unità di controllo.

GENERATORE TACHIMETRICO

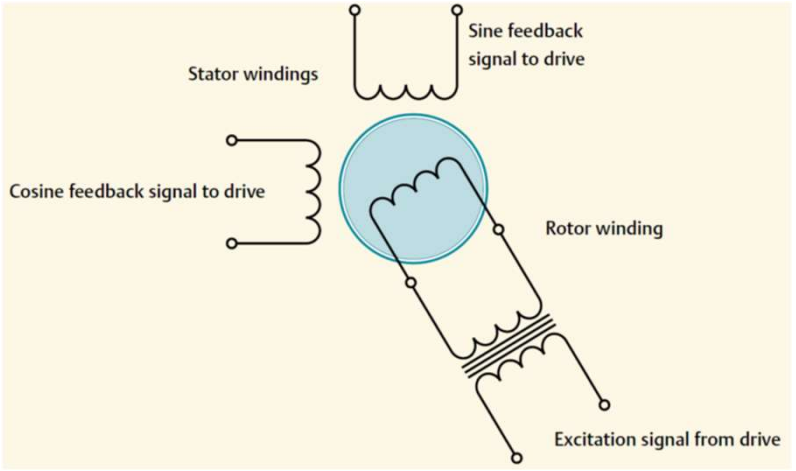
Negli azionamenti a corrente alternata normalmente si preferisce utilizzare altri trasduttori di velocità a causa dei seguenti svantaggi:

- presenza di spazzole soggette ad usura;
- la tensione generata varia con la temperatura e il costo aumenta al miglioramento del coefficiente di temperatura (percentuale di cambiamento della tensione al variare della temperatura);
- se il segnale deve essere portato lontano la presenza di cavi lunghi comporta una caduta di tensione;
- a causa della natura analogica del segnale è soggetto a rumore per le tensioni più basse;
- le versioni industriali generano un segnale di tensione compreso tra 20 e 120 V/krpm, che perde linearità al di sotto dei 500 rpm. Le versioni per servomotori le tensioni generate tendono ad essere inferiori ai 10 V/krpm e hanno spazzole di alta qualità, in carbone impregnate di argento per garantire buona precisione e linearità al di sotto dei 50 rpm, ma questo comporta un aumento dei costi.

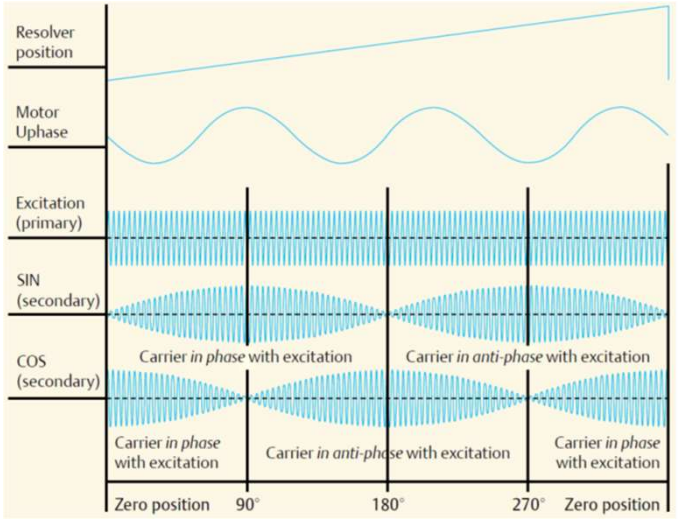
RESOLVER

È come un trasformatore con un primario rotante (detto anche “avvolgimento di eccitazione” e montato sull’albero del motore) e due secondari a 90°. Al primario viene applicato un segnale di tensione alternata a frequenza costante. Ciò produce un segnale corrispondente sugli avvolgimenti secondari, il cui picco è modulato in ampiezza con la rotazione dell'albero, il che fornisce una posizione angolare continua dell'albero.

L'ampiezza di picco del segnale sugli avvolgimenti secondari varia perché il rapporto di trasformazione effettivo varia con la rotazione dell'avvolgimento primario.

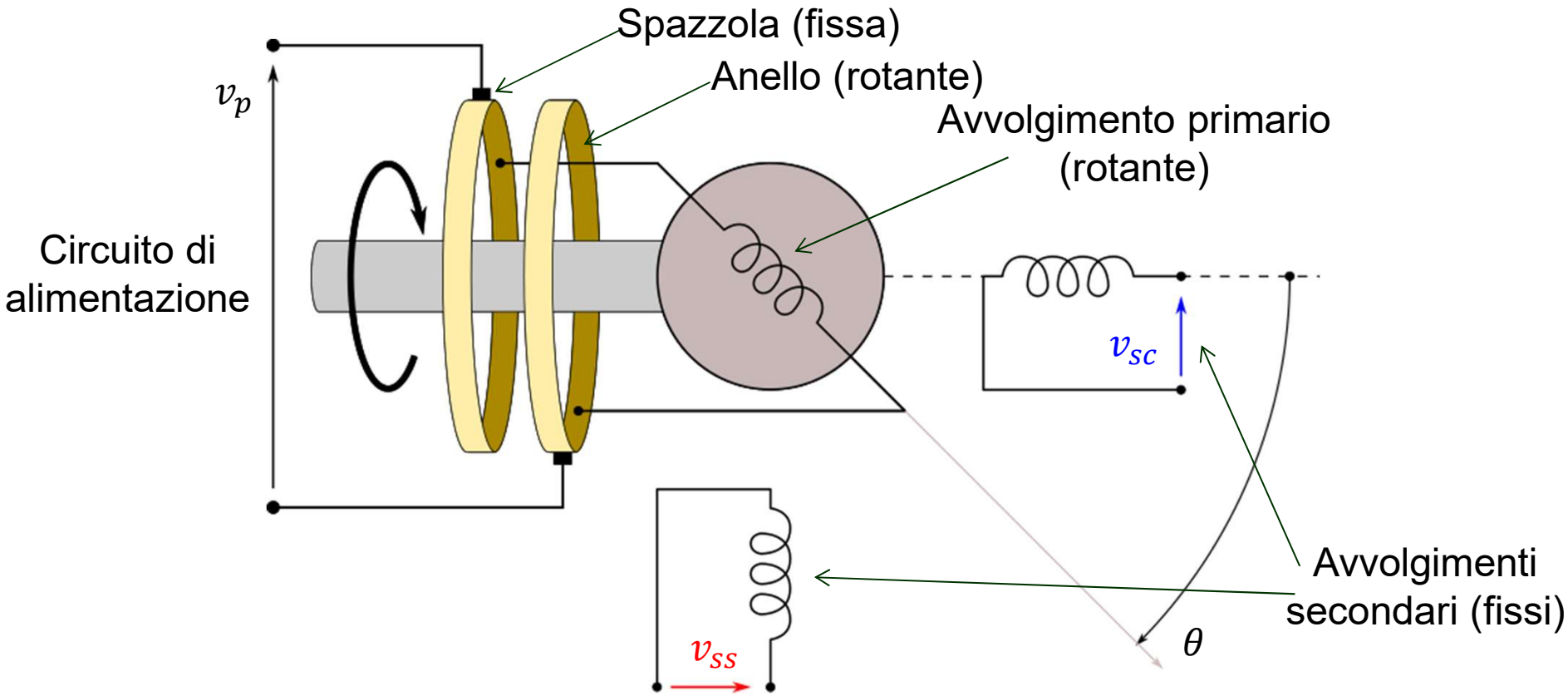


Schema di resolver a due poli

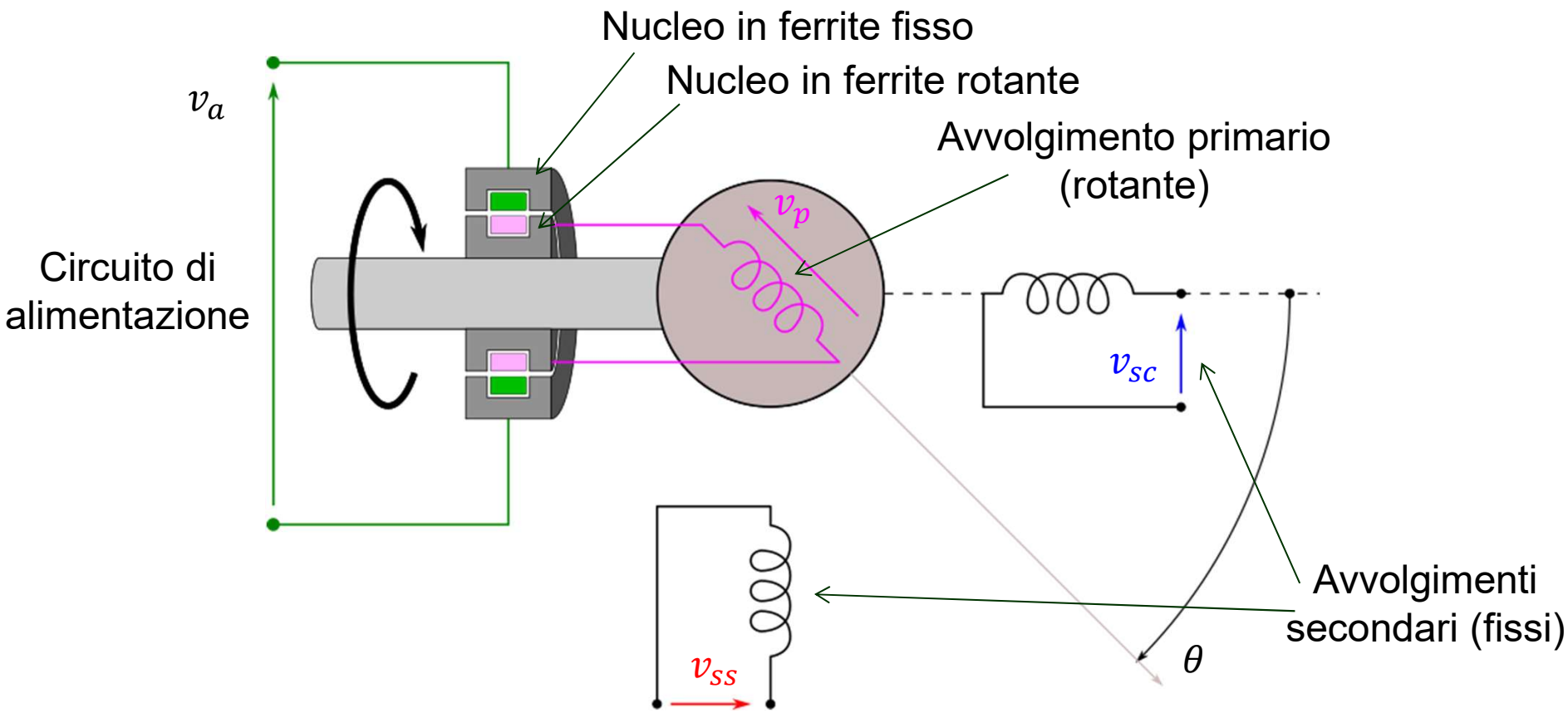


Segnali di uscita seno e coseno di un resolver a due poli

RESOLVER A SPAZZOLE



RESOLVER BRUSHLESS



RESOLVER

Indipendentemente dal fatto che il resolver sia a spazzole o brushless, la tensione primaria è data da:

$$v_p = V_M \sin(\omega t)$$

con $\omega = 2\pi f$ fissa e dipendente dalla frequenza di alimentazione del resolver (solitamente scelta nell'ordine dei kHz).

Nei due avvolgimenti secondari si induce una tensione proporzionale alla primaria (secondo il rapporto spire scelto) e dipende anche dalla proiezione di questo lungo la direzione secondaria considerata, ovvero:

$v_{sc} = K v_p \cos\theta \qquad v_{ss} = K v_p \sin\theta$

I due segnali v_{sc} e v_{ss} possono dunque essere elaborati per risalire alla posizione θ o anche essere impiegati per realizzare una conversione di coordinate (cartesiana-polare, abc-dq).

RESOLVER

Vantaggi nell'utilizzo di un resolver:

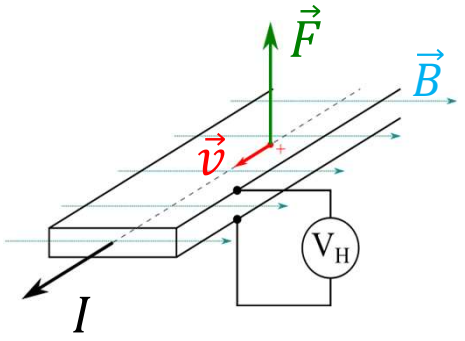
- La presenza dei due segnali di uscita sinusoidali a 90° consente la misurazione della posizione;
- L'assenza di componenti elettronici e di connessioni fra statore e rotore lo rende adatto per l'utilizzo con temperature che vanno dai -55 ai 175°C e in presenza di condizioni ambientali difficili.

Svantaggi:

- il resolver è un traduttore analogico di per sé economico, ma l'informazione sulla velocità e soprattutto sulla posizione viene ottenuta mediante la conversione da analogico a digitale dei due segnali di uscita, il che richiede un'elettronica di conversione che può rendere il sistema costoso;
- la risoluzione dipende dalla massima velocità di progetto.

TRASDUTTORI AD EFFETTO HALL

I trasduttori magnetici sfruttano l'**effetto Hall**: il campo magnetico che investe la corrente in una piastrina genera lo spostamento delle cariche trasportate (forza di Lorentz). La diversa concentrazione di carica sulle facce della piastrina causa una d.d.p. tra queste (tensione di Hall), proporzionale al campo magnetico.



Un semplice sensore di prossimità magnetico (per elementi ferrosi) può essere realizzato con un magnete permanente che investa una piastrina polarizzata (a corrente costante).
In assenza dell'elemento ferroso il campo che investe la piastrina è debole, così come la tensione di Hall risultante; nel momento in cui si avvicina l'elemento ferroso il campo che attraversa la piastrina è più intenso, causando una tensione di Hall che supera la soglia di attivazione del sensore.

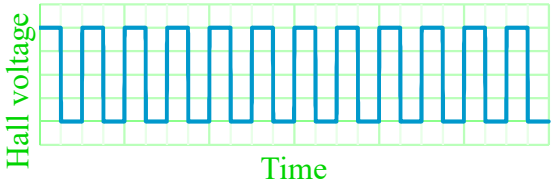
TRASDUTTORI AD EFFETTO HALL

In maniera simile a quanto descritto nella slide precedente, può essere realizzato un trasduttore di velocità, accoppiando un elemento ricevitore (pick-up, composto da sensore Hall + magnete permanente) con un disco ferromagnetico provvisto di salienze (ruota fonica). Il passaggio della salienza in corrispondenza del pick-up causa un impulso di tensione.

Il numero di impulsi che si registrano quando la ruota compie un giro corrisponde al numero di salienze N, per cui la velocità ω può essere calcolata in base al numero di impulsi n in un secondo, sfruttando la seguente semplice relazione:

$$\omega = \frac{2\pi}{N} n \; [rad/s]$$





ENCODER ROTATIVO DIGITALE

È un trasduttore elettromeccanico che converte la velocità di rotazione o la posizione in una serie di impulsi elettronici digitali.

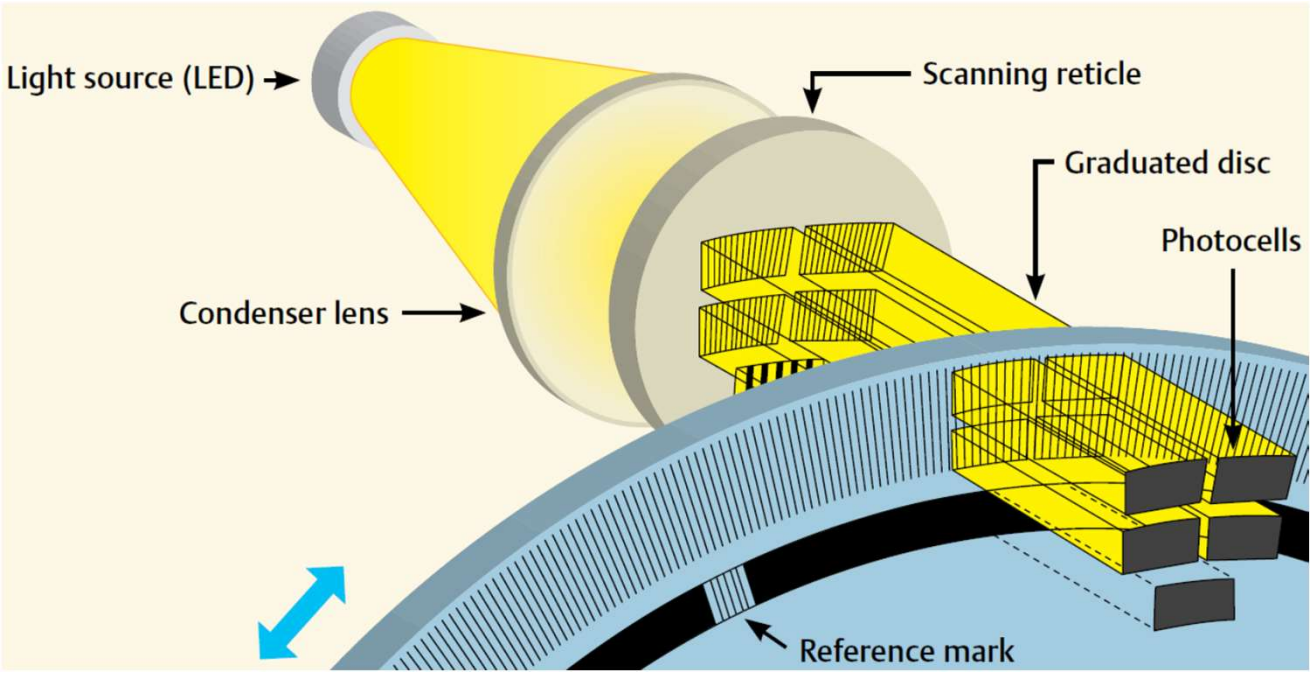
L'elemento di base di questi sensori è una o più coppie sorgente-rilevatore luminosi (LED + fotocellula) montate sulla parte fissa della macchina, tra le quali viene interposto un disco forato (caratterizzato da zone trasparenti alternate a zone opache) solidale alla parte mobile.

I trasduttori ottici di posizioni angolari vengono comunemente detti **encoder** (incrementale o assoluto).

La rotazione del disco va quindi a modulare il fascio di luce che dalla sorgente luminosa va al ricevitore, realizzando dei cambi di stato (ON-OFF) correlati al movimento, che vengono poi interpretati da un'elettronica dedicata e convertiti in posizione assoluta o spostamento relativo, a seconda della tipologia di encoder.

ENCODER ROTATIVO INCREMENTALE

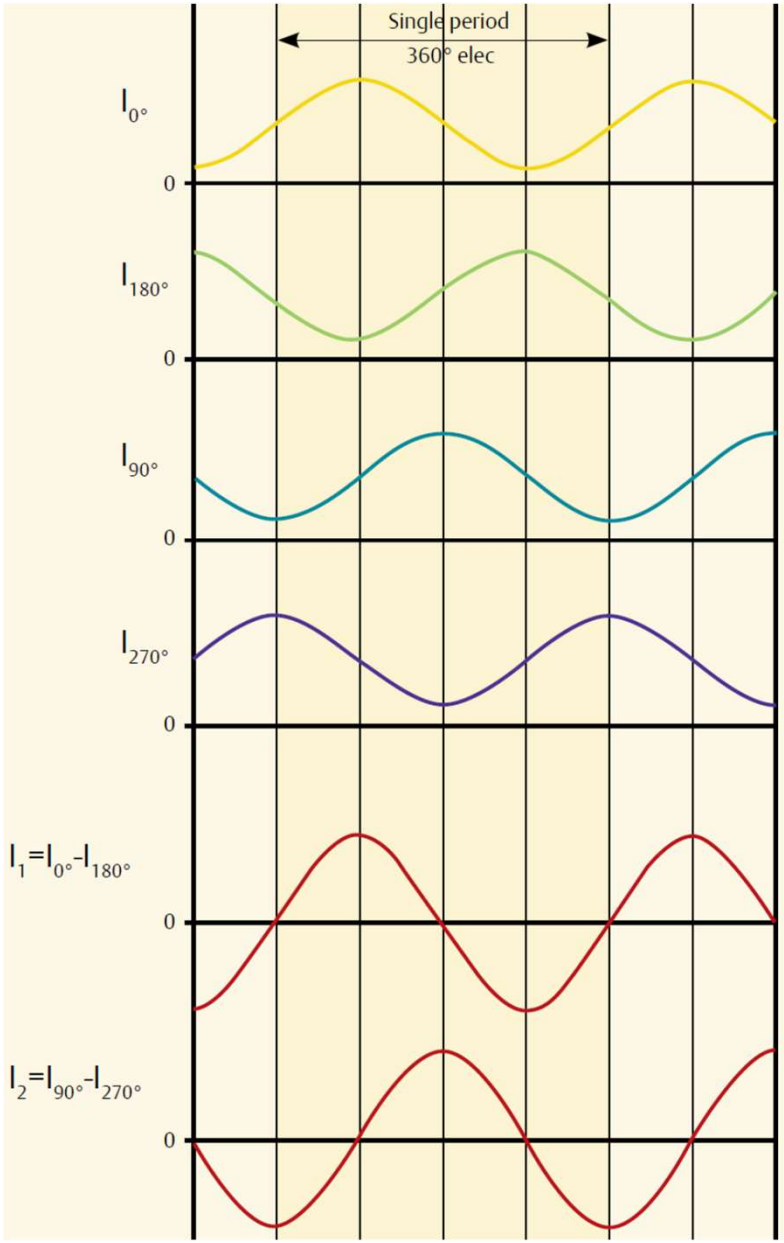
Genera una serie di impulsi rettangolari quando l'albero ruota. Gli impulsi vengono poi accumulati tramite conteggio (solitamente all'interno dell'unità di controllo) per fornire la posizione relativa.
Sono attualmente la tecnologia più diffusa, anche se comincia ad essere rimpiazzata da altre tecnologie.



Raffigurazione schematica indicante il principio di funzionamento di un encoder di tipo ottico.

ENCODER ROTATIVO INCREMENTALE

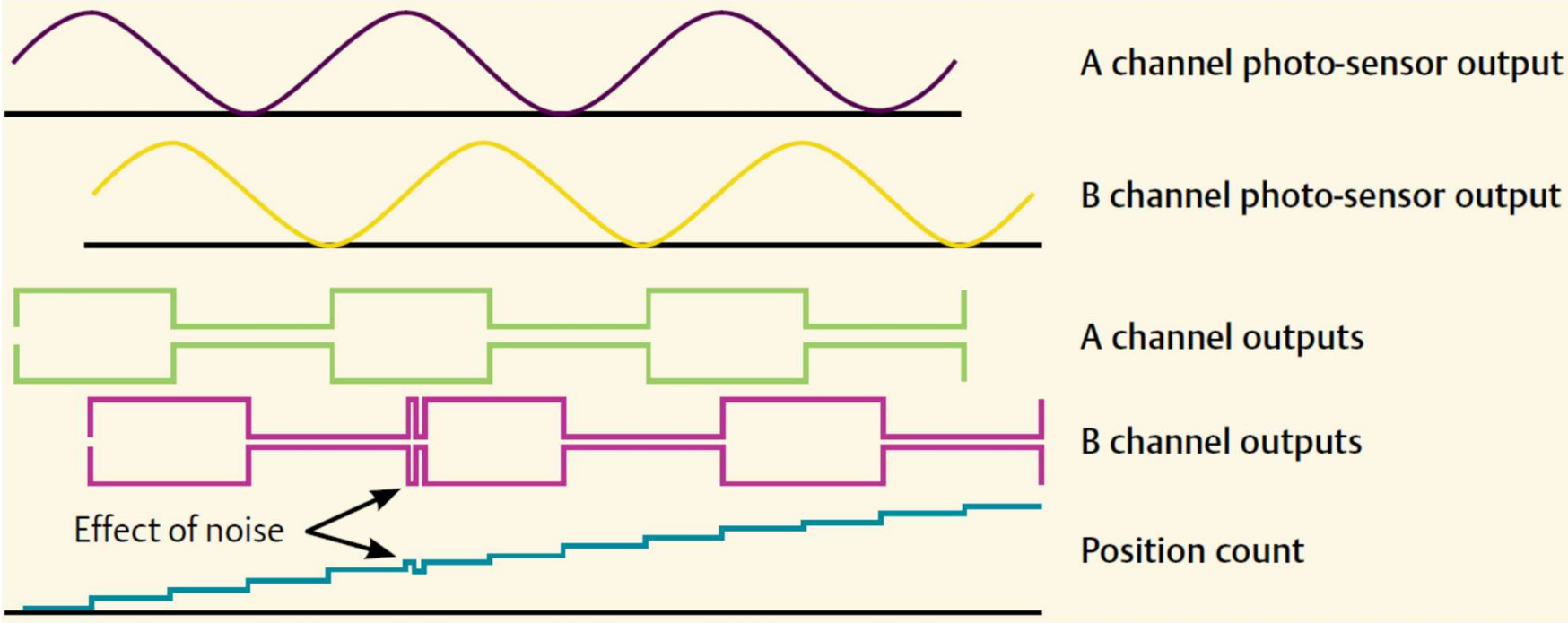
Negli encoder ottici un raggio generato da una sorgente luminosa passa attraverso una griglia di 4096 linee equidistanti (encoder più costosi ne hanno di più) disposte radialmente su un elemento fisso e su un disco rotante trasparente. Quando le griglie si muovono l'una rispetto all'altra, quattro fotosensori rilevano fluttuazioni periodiche di luminosità con andamento circa sinusoidale. I quattro segnali generati vengono poi combinati per formare due segnali sinusoidali in quadratura ed infine trasformati in segnali digitali.



ENCODER ROTATIVO INCREMENTALE

La relazione di fase fra i due segnali in quadratura determina il verso di rotazione.

Utilizzando un contatore che incrementa o decrementa su ciascuno dei fronti del segnale dei canali A e B, è possibile ottenere una posizione relativa con una risoluzione pari a quattro volte il numero di linee per giro (ad esempio un encoder a 4096 linee fornisce un valore di posizione binario con una risoluzione di 14 bit).



ENCODER ROTATIVO INCREMENTALE

Vantaggi dell'encoder rotativo incrementale:

- è intrinsecamente digitale e quindi facilmente interfacciabile con i moderni sistemi digitali;
- è di semplice utilizzo, economico ed offre una buona risoluzione in rapporto al suo costo;
- la sua uscita digitale differenziale lo rende più immune al rumore rispetto ad altri trasduttori che forniscono segnali analogici.

Svantaggi:

- fornisce feedback di velocità e posizione ma la posizione assoluta è sconosciuta, con la conseguenza che in caso di interruzione dell'alimentazione l'informazione sulla posizione viene persa;
- Rispetto a un resolver, l'intervallo di temperatura di esercizio è inferiore perché l'elettronica è integrata nell'encoder. L'encoder rimane operativo a temperature fino a 120 °C (100 °C per mantenere le massime prestazioni).

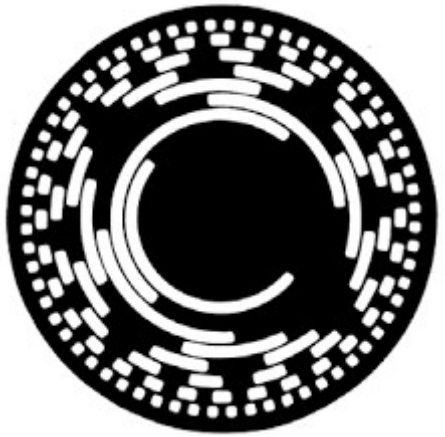
ENCODER ROTATIVO ASSOLUTO

È formato da un disco con N tracce indipendenti, opportunamente oscurate, le quali permettono una risoluzione pari a $1/2^N$ (ad esempio, un encoder a 10 tracce discrimina la 1024-esima parte del giro, ossia restituisce la posizione con una precisione di $\approx 0.35°$).

L'attivazione o disattivazione dei rilevatori su ciascuna traccia confluisce nei bits della codifica binaria della frazione di giro corrispondente alla posizione attuale, stabilendo una corrispondenza biunivoca tra la posizione del disco e lo stato complessivo dei ricevitori delle tracce.

L'alternanza di zone trasparenti e opache dipende dalla codifica adottata. Piuttosto che la codifica binaria pura si utilizza solitamente la codifica Gray, cioè un codice binario a lunghezza fissa, nel quale il passaggio da un numero rappresentato al successivo (o precedente) comporta la variazione di un solo bit. Questo, oltre a rendere più semplice la realizzazione del disco, consente una più semplice discriminazione degli errori.

ENCODER ROTATIVO ASSOLUTO

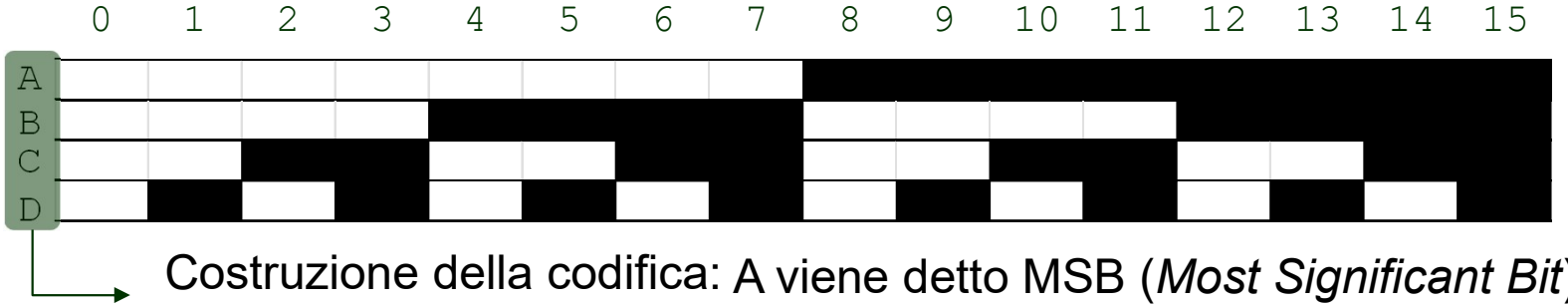


N=8, risoluzione 1/256 di giro (codifica Gray)

Esempio:

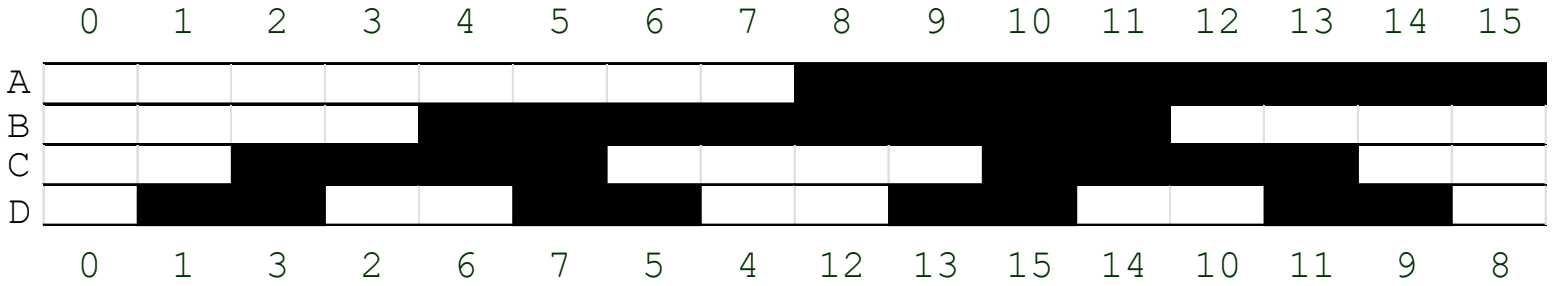
N=4, risoluzione 1/16 di giro.

Codifica binaria pura



Costruzione della codifica: A viene detto MSB (*Most Significant Bit*)
ABCD
D è il LSB (*Least Significant Bit*)

Codifica Gray



ENCODER ROTATIVO ASSOLUTO

Può essere mono-giro, dotato di un unico disco per determinare la posizione assoluta, o multi-giro, dotato di dischi aggiuntivi collegati al primo tramite un rapporto di trasmissione al fine di contare il numero di giri.

Ad esempio il disco principale può avere un codice Gray a 12 tracce (12 bit, cioè 4096 posizioni), mentre gli ausiliari un codice Gray a 4 tracce (4 bit, cioè 16 giri per disco), richiedendo quindi un rapporto di trasmissione 16:1.

Dettagli costruttivi di un encoder assoluto multi-giro.

