

Università degli Studi di Padova
Facoltà di Ingegneria



Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale



UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTA DI INGEGNERIA

Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA
DELL'AUTOMAZIONE

**GENERAZIONE DEL MOTO LINEARE: TECNOLOGIE E
CONFRONTO**

Relatore: Prof. ing. Dario Richiedei

Laureando: Md Shahadat Hossain

Anno Accademico 2011-2012

Sommario

Negli ultimi anni il mercato dei motori elettrici ha visto lo sviluppo di una fascia di nuovi prodotti che hanno conquistato spazio accanto ai motori rotativi tradizionali. Tale impulso è stato determinato in parte dalle recenti innovazioni tecnologiche e in parte dalla necessità di soluzioni alternative specificamente pensate per particolari applicazioni in ambito degli azionamenti assi e dell'automazione in generale. Questa classe di prodotti è costituita dagli attuatori lineari che, in funzione del tipo di macchina elettrica, riescono a coprire diversi settori applicativi.

Vengono dunque illustrati tali vantaggi confrontando i motori lineari con le alternative meccaniche, viene fatta una panoramica sulle varie tipologie di motori lineari sincroni e asincroni (capitolo 1); vediamo le tre diverse configurazioni: gli ironcore, gli ironless e i motori tubolari (capitolo 2);

poi vediamo trasformazione da moto rotatorio a moto lineare (capitolo 3); e infine vediamo selezione dei motori lineari per macchine di confezionamento ad alta velocità.;

Indice

Sommario	4
Elenco delle figure	6
introduzione	7
Capitolo 1. Motori lineari elettrici	9
1.1. La storia dei motori lineari dal 1845	10
1.2. Principio di funzionamento	11
Capitolo 2. Tipologie costruttive di motori lineari	14
2.1. Struttura e Configurazione dei Moti Lineari	14
2.2. Motori Monolaterali Ironcore (monolateri)	15
2.3. Motore Ironless (bilaterali)	16
2.4. Motori Tubolari	17
2.5. Motori Slotless	18
2.6. Vantaggi e Svantaggi	19
2.7. Confronto tra i vari tipi di motori elettrici	20
2.8. Panoramica del mercato	20
Capitolo 3. Controllo del moto lineare	24
3.1. Trasformazione da moto rotatorio a moto lineare	24
3.2. Confronto tra Motori Lineari e cinghia e puleggia	24
3.3. Confronto tra motore lineare e pignone cremagliera	27
3.4. Moto lineare con Biella Manovella	29
3.5. Confronto tra motore lineare e sistema a vite	30
Capitolo 4. selezione dei motori lineari per macchine di confezionamento ad alte velocità	33
4.1. Le caratteristiche dei motori lineari che vengono più apprezzate nel settore delle macchine automatiche da imballaggio	33
4.2. Parametri principali che caratterizzano la progettazione	33
4.3. Principali applicazione dei motori lineari nelle macchine packaging	35
4.4. Conclusione	38
Glossario	40
Bibliografia	41

Elenco delle figure

1.2. Immaginario srotolamento di un motore rotativo per ottenerne uno lineare	11
1.2. Motore Asincrono	12
1.2. Motore Sincrono	13
2.1. Esempio di sistema integrato prodotto da Baldor	14
2.2. Esempio di motore ironcore prodotto da Baldor	15
2.3. Motore Ironless (Bolaterali)	17
2.4. Motori tubolari	18
2.5. Motore Lineare slotless (senza cave)	19
2.5. Motore lineare slotted (con cave)	19
2.8. Confronto tra pneumatica e motori lineari riguardo cablaggi ed accessori necessari	22
2.8. Sezione di un cilindro idraulico. Si notano sopra e a destra (cioè rispettivamente di lato e dietro al cilindro) gli ingressi per la pompa dell'olio	22
3.1. (a) puleggia o pignone. (B) cinghia e puleggia roto-traslazione di montaggio.	25
3.2. Cinghia e puleggia	26
3.2. Attuatori a cinghia (Parker)	28
3.3. Pignone cremagliera	28
3.4. Biella Manovella	29
3.5. Vite a ricircolo di sfere	30
4.2. Profili di velocità triangolare (a sinistra) e trapezoidale (a destra) e relative formule	35
4.2. Schema delle forze in gioco	35
4.3. Configurazione aperta fig 1	37

introduzione

Considerando che la maggior parte dei moti da realizzare all'interno di una macchina automatica sono di tipo lineare appare chiaro come questi motori possano assumere un ruolo principe nella progettazione delle macchine automatiche del futuro.

Inoltre, negli ultimi anni questi azionamenti stanno avendo uno sviluppo tecnologico molto rapido, ma l'aspetto che risulta più interessante, oltre al miglioramento delle performance, è il crescere del numero di case produttrici e l'ampliamento dell'offerta commerciale mondiale. Ciò porterà in breve all'affermarsi di un regime di concorrenza a tutto vantaggio degli utilizzatori che potranno trovare sul mercato prodotti sempre più adatti alle loro esigenze e soprattutto a costi più convenienti.

Queste ragioni stanno stimolando molte aziende operanti nel settore del packaging e dell'assemblaggio a chiedersi se e come questa tipologia di attuatori possa essere impiegata sulle proprie macchine per realizzare alcune movimentazioni cruciali del proprio settore produttivo.

I motori lineari che hanno trovato posto nel mercato sono i passo-passo, gli asincroni e i sincroni, mentre quelli a corrente continua non sono riusciti a ritagliarsi uno spazio consistente a causa del loro costo elevato e di problemi inerenti allo scintillio delle spazzole, agli attriti e alle limitate prestazioni sia in termini dinamici che di spinta. Questi attuatori sono ancora oggi in fase di sviluppo e sono oggetto di ricerca e studio per ottimizzarne le prestazioni.

Settori industriali hanno trovato applicazione di questi prodotti sono:

- Machine per il confezionamento
- Lavorazione del legno.
- Manipolatore
- Machine per la stampa
- Applicazione Mediche
- Injection molding
- Saldatura a resistenza

Ci sono due soluzioni per ottenere il moto Lineare:

Diretta	Trasformata
Elettrico	Biella manovella
pneumatico	Cinghia e puleggia
oleodinamico	Pignone e cremagliera sistema a vite

Differentemente da quando accadeva nel passato, l'aumento della produttività non è più l'obiettivo dominante nella progettazione di macchine per il packaging. Infatti, per le macchine di ultima generazione a questo si è affiancata, la necessità di dover conservare un'ampia flessibilità operativa. Ciò è dovuto al crescente interesse verso impianti produttivi capaci di operare su una vasta gamma di formati e di alternarsi in modo rapido ed efficiente su un mix di produzione anche molto frammentato. Idealmente, una macchina dovrebbe essere capace di cambiare formato in un tempo brevissimo senza alcun intervento umano per la sostituzione dei componenti e la messa a punto.

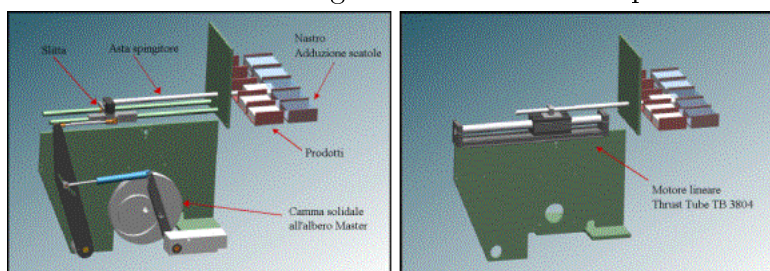
L'aumento della produttività e della flessibilità operativa se da un lato hanno trovato attenti e pronti interlocutori nell'informatica e nell'elettronica, hanno, per contro, messo in evidenza i limiti della meccanica classica.

Infatti, la crescita delle velocità di produzione e quindi di conseguenza dei fenomeni inerziali finisce per far soffrire i cinematismi di trasformazione e trasmissione del moto.

Questi alla lunga denunciano sensibili problemi di usura e quindi di perdita di precisione. Tali esigenze hanno orientato i progettisti verso nuovi approcci nelle architetture dei sistemi di attuazione e controllo.

L'attuazione di tipo concentrato, in cui il moto generato da un unico motore realizza tutti i movimenti necessari grazie ad una complessa catena cinematica e che garantisce elevatissimi livelli di produttività, è stata progressivamente abbandonata per la sua estrema rigidità operativa in favore di un'architettura pluri-attuatore nettamente più flessibile.

Applicando in modo più esteso tale filosofia di progettazione si è giunti fino ad eliminare del tutto i meccanismi di trasformazione del moto sostituendoli con attuatori comandati da sistemi di controllo programmabili in grado di generare il moto lì dove serve già con i parametri cinematici desiderati. I vantaggi di questa tecnologia, nota come "Direct Drive", sono evidenti. Oltre ad un'elevata flessibilità si realizza, infatti, una semplificazione del layout della macchina, si riducono gli effetti delle inerzie e si elimina l'usura con il conseguente aumento della precisione di posizionamento.



In quest'ottica e considerando che la maggior parte dei moti da realizzare all'interno di una macchina automatica sono di tipo lineare appare chiaro come i motori lineari elettrici possano assumere un ruolo principe nella progettazione delle macchine automatiche del futuro.

Motori lineari elettrici

I motori lineari sono particolari attuatori elettrici in grado di produrre il moto direttamente in forma lineare. Ne consegue che si rivelano particolarmente adatti per azionamenti assi, andando a racchiudere in un solo elemento ciò che tali applicazioni viene normalmente ottenuto dall'accoppiamento di un motore rotativo a lineare.

Si può pensare di ottenere un motore rotativo lineare da una qualsiasi macchina rotativa mantenendo lo stesso principio di funzionamento, ma disponendo in modo opportuno le superficie di accoppiamento magnetico in modo che la distribuzione dei campi sia disposta lungo un asse piuttosto che su una circonferenza. In virtù di ciò, il tipo di controllo dei motori lineari analogo a quello del motore rotativo da cui derivano. Esistono diverse tipologie di motori lineari ma i più diffusi sono quelli piatti e quelli tubolari.

I motivi del recente sviluppo degli azionamenti con attuatori lineari in ambito industriale sono da individuarsi nella realizzazione di:

- Materiali più performanti e tecnologie innovative;
- Magneti permanenti ad elevata densità di energia;
- polveri ferromagnetiche sinterizzate;
- isolanti e dielettrici nanoadditivati;
- elettronica di potenza sempre più efficienti;
- strategie di controllo innovative e più raffinate;
- nuove aree di applicazione.

L'insieme di questi fattori ha fatto in modo che i motori lineari potessero competere con gli azionamenti assi tradizionali, realizzati con la combinazione del moto da rotativo a lineare. Questi organi di trasmissione non hanno solo la funzione di convertire il moto ma, costituendo l'anello centrale della catena cinematica fra motore e carico, contribuiscono in modo determinante alle qualità dinamiche e di precisione dell'azionamento, spesso costituendo un rigido compromesso.

Utilizzando motori rotativi è infatti possibile ottenere elevate accelerazioni solamente dimensionando propriamente la trasmissione meccanica. Per ottenere elevati gradi di precisione infatti bisogna introdurre un opportuno riduttore che però va a limitare la velocità dell'azionamento in modo proporzionale al suo rapporto di trasmissione.

La presenza di organi intermedi, suscettibili usura, introduce giochi meccanici, attriti e inerzie che influiscono in modo negativo sulla qualità del posizionamento, sul rendimento e sulla dinamica dell'intero azionamento.

Uno dei motivi principali di tali problemi è da individuarsi nei fenomeni di risonanza e vibrazione che queste masse rotanti introducono nel sistema e causati dalla elasticità degli organi di cui sono composti. L'attuazione diretta del moto in forma lineare consente di eliminare la trasmissione meccanica che si ha fra il motore rotativo e il carico, eliminando quindi tutte le limitazioni introdotte da tali cinematiche; tutto questo migliora l'affidabilità generale del sistema e riduce gli interventi di manutenzione.

Inoltre, grazie alle minori inerzie che vantano i motori lineari, l'invasione del moto risulta particolarmente semplice, il tutto a favore di dinamiche più elevate.

Nei classici sistemi industriali, interi apparati di produzione sono azionati secondo una attuazione di tipo concentrato, in cui il moto generato da un unico motore che realizza tutti i movimenti necessari grazie ad una complessa catena cinematica la quale, se ben progettata, riesce a garantire elevati livelli di produttività.

Questa tipologia di sistema sta venendo però progressivamente abbandonata per la sua estrema rigidità operativa in favore di un'architettura pluri-attuatori, nettamente più flessibile. Considerando che la maggior parte dei moti da realizzare all'interno di una catena automatica sono di tipo lineare, risulta evidente come i motori elettrici lineari possano rappresentare una valida alternativa per l'automazione dei processi industriali.

La loro estrema versatilità e la loro flessibilità operativa li rende adatti per svariate applicazioni.

L'eliminazione della trasmissione realizzata con le architetture direct-drive non comporta però solo vantaggi. Infatti la forza trasmissibile del motore lineare al carico risulta limitata rispetto a quella che si potrebbe ottenere a quella che si otterrebbe con il sistema motore rotativo organi di trasmissione, a parità di potenza della macchina.

Inoltre la struttura finita della macchina lineare risente della presenza di effetti di bordo del campo magnetico che si manifestano attraverso una forza parassita che deteriora la prestazione dell'attuatore stesso. Nelle macchine rotative invece non è presente tale contributo di forza perché non presentano terminazioni lungo la direzione di rotazione.

Occorre, però, precisare che l'inerzia e gli attriti degli organi meccanici per la conversione del moto, nel caso si utilizzino macchine rotative, richiedono un incremento della coppia che risulta quindi maggiore di quella strettamente richiesta dal carico.

Questa considerazione risulta particolarmente importante nel caso di corse medio-brevi in cui le dinamiche spinte vengono ottenute con accelerazioni elevate piuttosto che con altri valori di velocità. I motori lineari, pur avendo specifiche minori, riescono comunque a competere egregiamente con le prestazioni di rotativi anche in termini di forza, se da un lato organi di trasmissione introducono forti limitazioni è anche vero che, sacrificando la dinamica, è possibile con forte rapporto di trasmissione ottenere livelli di precisione superiori a quelli intrinseci della macchina rotativa.

Al contrario per i motori lineari la precisione e la stabilità del posizionamento dipendono unicamente dalle qualità intrinseche della macchina e del servocontrollo. In questo senso si può affermare che l'assenza di organi intermedi richiede alla macchina lineare di essere più autonoma in quanto deve sopperire da sola a tutte le esigenze prestazionali.

1.1. La storia dei motori lineari dal 1845

In ingegneria, il termine "nuova tecnologia" potrebbe significare l'invenzione di un nuovo dispositivo o di un nuovo processo; comportare l'uso di materiali innovativi per migliorare gli aspetti di un prodotto già noto. Potrebbe riguardare una nuova scoperta scientifica, legata ad un'intera famiglia di nuovi dispositivi, o ancora, potrebbe essere semplicemente un ulteriore modo di pensare la costruzione di un dispositivo già noto, e così via.

Capita spesso che, alla nascita di una nuova tecnologia, questa prenda subito piede. Ricordiamo, ad esempio, transistor, trisistore e molte altre. Ma quando una "vecchia tecnologia" ritorna fuori, è difficile che si riaffermi, sebbene con un nuovo aspetto. Il motore lineare è certamente un esempio di vecchia tecnologia. L'idea di prendere un motore convenzionale, di tagliarlo e di smontarlo, per produrre una macchina per motori lineari, fu sì ovvia, ma la realizzazione fu meno facile di quel che si potesse pensare.

Il primo motore fu costruito da Charles Wheatstone nel 1845; il secondo, qualche anno dopo, dal "padre della fotografia" Henry Fox Talbot.

Queste macchine vengono ora classificate "motori a riluttanza variabile", essendo essendo costituite semplicemente da una fila di elettromagneti individuali, tali da poter essere attivati in sequenza per attrarre un cilindro scorrevole, di ferro dolce, di ferro dolce, lungo la loro superficie.

I motori a induzione lineare dovranno aspettare altri quarant'anni perché Tesla ne inventi la versione rotante. Nel 1947, Eric Laithwaite costruì un motore funzionante composto da avvolgimenti in linea, con nucleo d'acciaio, alimentati secondo la sequenza di fase tradizionale, e costituenti ciò che ora definiamo come "metà cava per polo e per fase". Ma le macchine devono più che funzionare, devono farlo bene, cosa che al tempo nessuno credette possibile. Infatti il traferro, tra la parte mobile e quella fissa, doveva essere molto più grande rispetto alla contro parte rotante (superiore alle dieci volte).

Il rendimento era, quindi, costretto a essere disastrosamente basso. Fu necessario del tempo prima di capire che, se la misura di quantità lineare (lo spessore del traferro) era sufficiente per determinare grandezze quali il rendimento e il fattore di potenza (che sono rapporti adimensionali), questo fatto sarebbe stato unico in ambito scientifico. Ci doveva essere un'altra dimensione da confrontare con il traferro. Ci vollero molti anni per scoprire che tale dimensione era il passo polare, pari a metà della lunghezza d'onda del campo magnetico traslante.

1.2. Principio di funzionamento

Principi di funzionamento Idealmente i motori lineari si possono considerare ottenuti "srotolando" su un piano i motori rotativi. Per tanto i principi fisici alla base del loro funzionamento sono identici a quelli dei convenzionali motori elettrici.

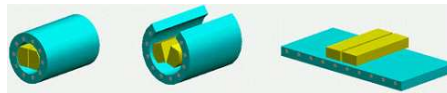


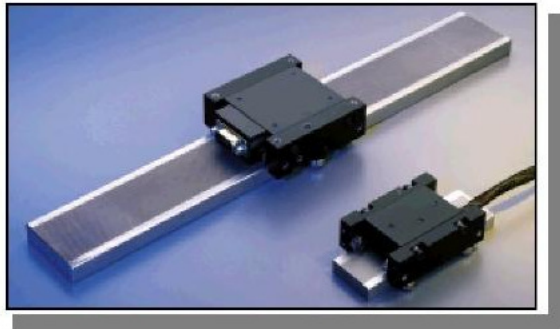
FIGURA 1.2.1. Immaginario srotolamento di un motore rotativo per ottenerne uno lineare

Anche nella versione lineare possiamo, quindi, distinguere:

- Motore a riluttanza variabile: Motori a passo (LSTM = linear stepper motors)
- Motori a riluttanza fissa:
 - (1) Motori asincroni (LIM = linear induction motor)
 - (2) Motori sincroni (LSM = linear synchronous motor)

1.2.1. Motori a passo. Vantaggi: I vantaggi principali di questa tecnologia sono essenzialmente legati alla semplicità del controllo. Infatti, a meno che non sia necessario raggiungere livelli di precisione notevoli per cui è necessario disporre di un sistema di retroazione o applicare complesse tecniche di microstepping, i motori passo sono gli unici a poter essere comandati in catena aperta.

Nei limiti appena evidenziati la logica di comando è di tipo digitale e anche l'azionamento, chiamato a generare semplici onde quadre, risulta poco complesso e costoso. Inoltre, dove si può far a meno del sensore di posizione si evitano i disturbi nel segnale di retroazione e ciò rende il sistema stabile e robusto.



Svantaggi: Nonostante questi indubbi pregi i motori a riluttanza variabile hanno gli stessi svantaggi riscontrabili nella versione rotativa: in primo luogo il loro moto è somma di tanti moti incrementali e questo fa sì che il funzionamento risulti rumoroso e non esente da vibrazioni.

Inoltre essi ricoprono dei range di velocità ma soprattutto di spinta inferiori a quelli generalmente necessari in applicazioni industriali. Per questo sono impiegati con molto successo quasi esclusivamente in attrezzature da laboratorio e nell'industria medicale.

1.2.2. Motori Asincroni. Vantaggi: A differenza di quello che accade per i motori passo i motori asincroni sono adatti in applicazioni in cui sono richieste elevate velocità e forti spinte. Inoltre, l'assenza dei costosi magneti permanenti rende economicamente sostenibile anche la realizzazione di lunghe corse. Per questi ed altri motivi legati soprattutto alle prestazioni ed al controllo essi si sono dimostrati ideali in applicazioni di trasporto sia civile che industriale.

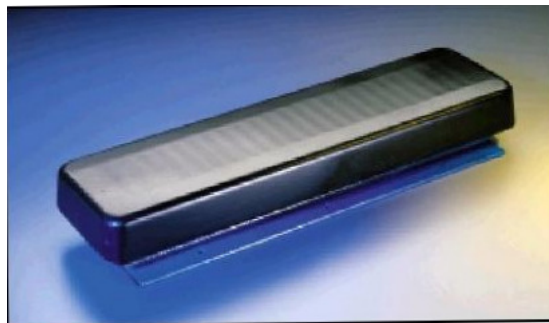


FIGURA 1.2.2. Motore Asincrono

Svantaggi: Le applicazioni alle macchine automatiche di motori ad induzione sono limitate soprattutto dalla complessità dei sistemi di controllo e alimentazione e dal fatto che essi non danno coppie da fermi a meno che non si utilizzi un controllo di tipo vettoriale.

A testimonianza di quanto essi non abbiano trovato fortuna nel campo delle macchine automatiche si può far notare come nei confronti di altre tipologie di motori lineari l'offerta di motori asincroni sia molto limitata (per quella che è la mia esperienza ricordo infatti solo dei motori della Baldor e della Rexroth-Indramat).

1.2.3. Motori Sincroni. Vantaggi Sicuramente i motori sincroni rappresentano, per la particolare applicazione che stiamo trattando, la tipologia più affermata, questo

per una serie di ragioni. Prima tra tutte la semplicità del sistema di controllo e di alimentazione che essendo del tutto simile ed integrabile con quello dei brushless rotativi, che ormai è da considerarsi uno standard industriale, costituisce sia nell'impiantistica che nell'approccio progettuale un punto di continuità con i sistemi tradizionali.

Inoltre i livelli di spinta, di corsa e l'accuratezza di posizionamento tipici di questa classe di motori corrispondono spesso alle necessità tipiche delle macchine automatiche e ciò accade anche in termini di ingombro ed implementabilità all'interno delle macchine.

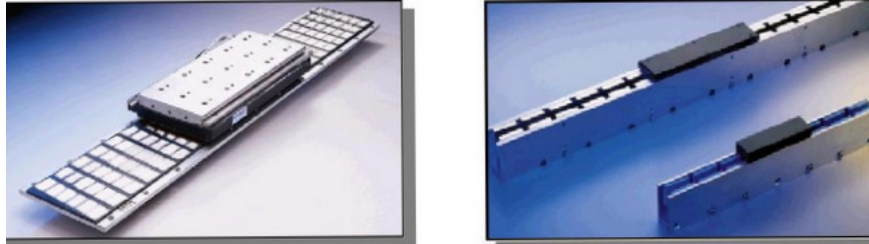


FIGURA 1.2.3. Motore Sincrono

Svantaggi: Le principali note negative di questi dispositivi derivano tutte dalla presenza dei magneti permanenti. Essi, infatti, incidono molto sul costo nell'azionamento, soprattutto quando si devono realizzare lunghe corse, inoltre in alcune morfologie costruttive questi sono causa di un'elevata forza d'attrazione tra il movente e lo statore.

Inoltre va evidenziata la necessità di proteggere con gusci e soffiotti la pista di magneti permanenti da polveri ferromagnetiche come accade ad esempio con i trucioli nelle applicazioni sulle macchine utensili.

Da quanto detto ora ci concentreremo a considerare solo motori di tipo sincrono. Tale limitazione dettata da esigenze di sintesi appare, in ogni caso, ampiamente giustificata; per convincersene basti notare quanto sia preponderante, nei confronti delle altre, la presenza sul mercato di tale tipologia di motori.

Tipologie costruttive di motori lineari

2.1. Struttura e Configurazione dei Moti Lineari

possiamo vedere come nasce un motore lineare. Supponiamo di avere un magnete in grado di muoversi in moto rettilineo senza nessuna componente di moto rotatorio. Posizioniamo questo magnete sopra altri due magneti fissi, in modo che sia in concordanza di polarità con uno dei due e in alternanza con l'altro. Per effetto delle forze di attrazione e di repulsione, il magnete mobile si muoverà allontanandosi dal magnete fisso con cui è in concordanza di polarità, per avvicinarsi a quello con cui è in alternanza.

Se la polarità del magnete mobile si inverte, esso ritornerà indietro secondo lo stesso percorso; e abbiamo visto che è possibile invertire la polarità di un magnete se esso è ottenuto con un avvolgimento percorso da corrente elettrica.

Il motore lineare sfrutta questo fenomeno, infatti esso è formato da una slitta sulla quale sono collocati numerosi denti di materiale ferroso con avvolte delle spire, per formare degli elettromagneti. La slitta corre su una banda magnetica che altro non è se non una serie di magneti permanenti; la lunghezza della banda magnetica determina, a meno della lunghezza della slitta, la corsa dell'attuatore lineare così ottenuto.

La corrente fatta circolare negli avvolgimenti deve essere controllata (in ampiezza e fase) in modo opportuno così da regolare in modo ottimale la spinta del motore lineare; in questo modo il motore è dotato, in modo intrinseco, di un sistema di variazione della velocità.

Quando il motore viene alimentato con la corrente elettrica trifase, il flusso magnetico sinusoidale generato dagli avvolgimenti andrà a interagire con il flusso magnetico positivo e negativo creato dai magneti permanenti, questi due flussi vanno a ingranarsi l'uno nell'altro, creando una vera e propria "cremagliera elettromagnetica" che determina il moto rettilineo della slitta e quindi il movimento dell'attuatore.

Al fine di ottenere la massima efficienza da questa "cremagliera elettromagnetica", il campo magnetico prodotto dagli avvolgimenti dovrà essere sempre in quadratura rispetto al campo dei magneti permanenti. Questo è uno degli obiettivi primari che si pongono le moderne tecniche di controllo dei motori Brushless. Tre tipi diversi di motore lineare. Il concetto del motore lineare è stato declinato in tre diverse configurazioni: gli ironcore, gli ironless e i motori tubolari.

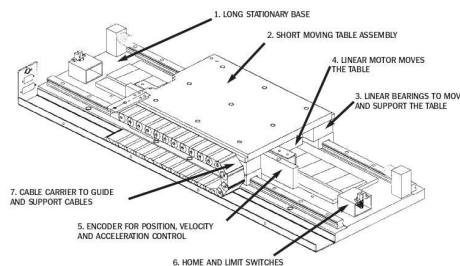


FIGURA 2.1.1. Esempio di sistema integrato prodotto da Baldor

2.2. Motori Monolaterali Ironcore (monolateri)

I motori ironcore sono formati da una banda magnetica piatta e da una parte, comunemente denominata "coil", in cui il sistema trifase di avvolgimenti è avvolto attorno a una struttura laminata di materiale ferromagnetico (da qui l'etimologia della parola "ironcore")

Un motore lineare ironcore brushless pu' essere visto come un tradizionale motore brushless rotativo a magneti permanenti tagliato assialmente e srotolato. Il risultato di tale operazione sono due componenti: una lamina fissa consistente di magneti permanenti a terre rare multipolo a polarità alternata disposti su una placca di acciaio e nichel laminato a freddo altamente permeabile al flusso magnetico (il rotore srotolato) ed il blocco degli avvolgimenti in moto (il forcer) consistente in avvolgimenti di rame attorno ad un nucleo di acciaio laminato incapsulati in resina epossidica termicamente conduttiva (lo statore srotolato). La commutazione 'e realizzata da un sensore ad effetto Hall o algoritmi software.

Il motore ironcore è un vero "cavallo da tiro", capace di sviluppare alti valori di spinta. Il motore ironcore presenta però, a causa della sua struttura (oltre che della presenza dei magneti permanenti), un fenomeno chiamato "cogging", dovuto all'anisotropia del nucleo del motore stesso, che tende ad avere dei punti di posizionamento preferenziali rispetto alla banda magnetica.

Questo può essere capito più chiaramente se pensiamo alla struttura base del motore ironcore. In un motore ironcore, quando il coil si muove, ciascun magnete vede l'alternanza continua di denti e cave. Questa alternanza fa sì che la riluttanza del circuito magnetico cambi con la posizione; la riluttanza è minima dove c'è il dente, perché lo spazio di aria fra il dente e la banda magnetica è minimo. Fra un dente e l'altro lo spazio di aria aumenta, aumentando anche la riluttanza. Questo crea una vibrazione intrinseca al sistema, durante il movimento, che può essere solo ridotta attraverso accorgimenti costruttivi (inclinazione dei magneti o delle cave) ma non eliminata (a meno di operare una mappatura del piano magnetico e adottare algoritmi di compensazione non banali e sempre diversi da una macchina all'altra).

Questa perturbazione esterna, che si traduce in una pendolazione sulla velocità, rende gli ironcore meno adatti a macchine che richiedono elevata fluidità di movimento, come le macchine per stampa o le macchine di misura.

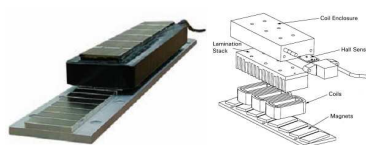


FIGURA 2.2.1. Esempio di motore ironcore prodotto da Baldor

Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Si realizzano così i più elevati valori di spinta (15 kN con raffreddamento forzato) • Buona possibilità di dissipare il calore prodotto • perché la grande superficie di scambio termico • per ventilazione forzata data dal moto generalmente rapido • Modularità della corsa
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Nucleo Ferromagnetico: Forza d'attrazione e maggiore inerzia del movente
Applicazioni tipiche	<ul style="list-style-type: none"> • Dove sono necessarie alte spinte e precisione. (macchine utensili, posizionatori in macchine di assemblaggio)

2.3. Motore Ironless (bilaterali)

I motori ironless hanno invece un piano magnetico a forma di U e il nucleo degli avvolgimenti è privo di ferro. In altre parole nella parte interna dell'avvolgimento c'è solo l'impregnante in resina che serve per conferire rigidità agli avvolgimenti stessi.

Questo tipo di motori lineari ha due piste magnetiche parallele poste faccia a faccia ed il forcer, contenente gli avvolgimenti di rame incapsulati in resina epossidica termicamente conduttiva, scorre tra di esse. Le due piste a multipoli magnetici sono alloggiati in un canale a forma ad U e sono composte di magneti a terre rare a polarità alternata fissati ad una lamina cromata di acciaio laminato a freddo.

Il motore ironless, grazie all'assenza del ferro, è più leggero dell'ironcore e ha una minore induttanza: in altri termini ha una minore inerzia sia meccanica che elettrica, e può godere pertanto di dinamiche migliori. Un'ulteriore pregio è la maggiore fluidità di movimento dovuta all'assenza di cogging.

Tuttavia il motore ironless, sempre per l'assenza del ferro, può fornire delle densità di forza di picco moderate e, a causa della forma costruttiva, delle densità di forza continuativa basse. L'ironless ha infatti maggiori difficoltà di smaltimento del calore, rispetto alla struttura piana del motore ironcore in grado di offrire una maggiore superficie di scambio termico.

Questo tipo di motori lineari è il più adatto a ridurre la dispersione di flusso magnetico, grazie all'alloggiamento delle piste magnetiche nel canale a forma ad U; ciò minimizza inoltre il rischio di incidenti dovuti all'intrappolamento da parte di magneti molto potenti e rende tali motori più adatti a lavorare in ambienti critici per la presenza di materiali ferromagnetici o schegge di ferro che possono danneggiare il motore stesso; tale fatto comporta come contropartita una maggior difficoltà a nello smaltimento del calore prodotto: si possono ottenere migliori performance aggiungendo al motore un sistema di raffreddamento ad aria o liquido.

Grazie al design delle piste magnetiche, esse possono essere combinate insieme per aumentare la lunghezza del percorso del forcer, con l'unico limite in lunghezza dovuto al sistema gestione cablaggi, alla lunghezza degli encoder disponibili e all'abilità di manovrare strutture più lunghe; bisogna però tenere presente che la doppia fila di magneti aumenta il costo complessivo del sistema in relazione alle forze generate ed alla lunghezza dello sforzo.



FIGURA 2.3.1. Motore Ironless (Bolaterali)

Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Simmetria del campo magnetico • Ottimo sfruttamento del flusso magnetico • Assenza di forza di attrazione • Massa ridotta del movente(resina epissodiche) • Modularita della corsa
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Struutura chiusa:Difficoltà di smaltimento Termico • Non si puo inserire un nucleo ferro magnetico:spinte non superiori a 2 KN
Applicazioni Tipiche	<ul style="list-style-type: none"> • Dove non sono necessarie alti valori della spinta ma movimenti rapidi e precisi • Pick and Place e robot cartesiani

2.4. Motori Tubolari

Nei motori tubolari, infine, la parte magnetica è di forma cilindrica, ed esternamente ad essa scorre il sistema trifase di avvolgimenti. Come abbiamo visto, il campo magnetico prodotto da un avvolgimento con al suo interno un pezzo di materiale ferroso è molto più forte di quello prodotto da un semplice avvolgimento in aria.

I tubolari, sono un'esclusiva di Servotecnica e si basano sullo stesso principio di funzionamento dei motori ironcore; la differenza è che, anziché essere disposti su una banda piatta, i magneti permanenti sono inseriti all'interno di un tubo cilindrico, attorno al quale scorre il "forcer" contenente gli avvolgimenti.

Questotipo di motori si può utilizzare in due differenti configurazioni.

La configurazione della figura prevede che il movente sia lo stelo contenente i magneti permanenti mentre l'avvolgimento (forcer) costituisca lo statore. Si osservi come la particolare morfologia dell'avvolgimento renda molto facile l'e- spulsione del calore prodotto per effetto Joule. Una nota negativa 'e da ricondurre al fatto che durante l'escursione la superficie sede del flusso magnetico tra magneti e avvolgimento diminuisca facendo diminuire a sua volta la forza che il motore e in grado di produrre.

Un altro problema di tale configurazione emerge quando aumenta la lunghezza della traiettoria da far compiere al carico. Data la forma del motore ed il movimento compiuto dall'asta, l'unico punto di supporto per questo design è ad una estremità, ciò significa che ci sarà sempre un limite alla lunghezza del moto ottenibile affinché la deflessione dell'asta dovuta alla sua stessa forza peso non causi il contatto tra magneti e forcer.

Nell'altra tipologia di montaggio dei motori cilindrici, figura il movente 'e rappresentato dall'avvolgimento mentre l'albero con i magneti permanenti 'e fisso. In questa soluzione è da sottolineare come l'avvolgimento traslante ad alta velocità consenta di espellere calore per convezione forzata. Si paga però il "fastidio" di avere dei cavi in moto con relativo aumento della massa traslante.



FIGURA 2.4.1. Motori tubolari

Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Ottimo sfruttamento del flusso Magnetico • Eccelente compartamento termico • Ventilazione forzata durante il moto:Facilità di raffreddamento • Bassi costi di costruzione dell'avvolgimento
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Lunghezza della corsa limitata • Effetti di bordo à La spinta può calare con la fuoriuscita dello stelo
Applicazioni tipiche	<ul style="list-style-type: none"> • Applicazione molto veloci su corse medio brevi • Pick and Place, spingitori, tastatori

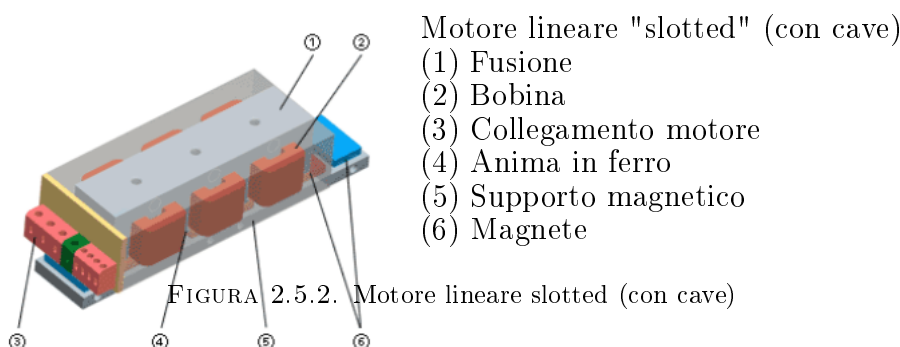
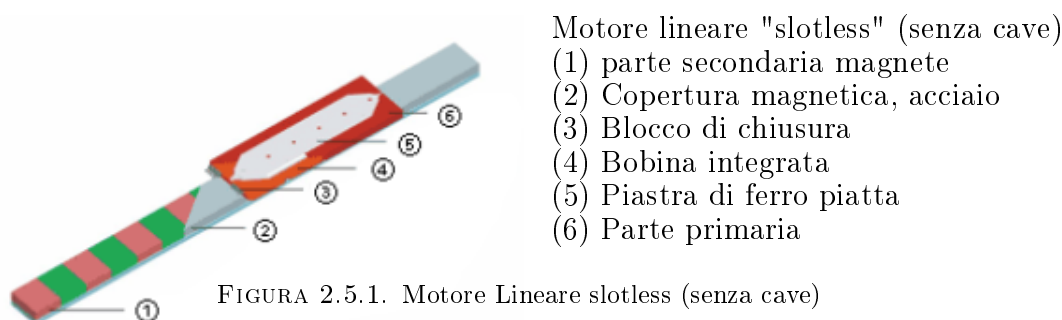
2.5. Motori Slotless

Sono un'interessante variante di motori lineari che combinano elementi di progetto di ironcore e ironless e possono essere considerati una sorta di ibrido tra i due.

In essi gli avvolgimenti del forcer, sebbene non avvolgono slot di ferro, sono comunque localizzati al di sotto di una lamina ferromagnetica (le laminazioni non sono dentate, come negli ironcore, ma sono comunque presenti);il forcer si muove lungo una singola fila di magneti.

In questo modo si realizza un motore che, rispetto agli ironless, ha costo minore grazie all'utilizzo di un'unica pista di magneti, dissipa il calore in maniera più efficiente ed esercita maggior forza per unità di volume (come gli ironcore); Rispetto all'ironcore ha peso minore e minor inerzia del forcer, dunque c'è meno forza attrattiva tra pista e forcer e così si ha maggior durata nella vita dei cuscinetti, si ha inoltre minor effetto cogging.

Gli svantaggi di tale configurazione sono la presenza di forze attrattive e cogging, per quanto ridotte, e la minor efficienza complessiva rispetto ad entrambe le tipologie di motori da cui deriva: serve infatti più calore per ottenere le medesime prestazioni.



2.6. Vantaggi e Svantaggi

Velocità Alta: la velocità massima di un motore lineare è limitata solo dalla tensione del bus e la velocità dell'elettronica di controllo. Velocità tipiche per motori lineari sono 3 metri al secondo con risoluzione di 1 micron e oltre 5 metri al secondo, 200ips, con grossolane risoluzioni.

alta precisione: La, accuratezza, risoluzione, e ripetibilità di un motore lineare azionato da un dispositivo è controllato dal dispositivo di feedback. Con la vasta gamma di retroazione lineare dispositivi disponibili, la risoluzione e la precisione sono principalmente limitati a bilancio e il controllo a banda.

Risposta veloce: Il tasso di risposta di un dispositivo motore lineare guidato può essere superiore a 100 volte quella di una trasmissione meccanica. Questo significa più veloci accelerazioni e di assestamento, quindi più di throughput.

Rigidità: Poiché non esiste alcun collegamento meccanico, aumentando la rigidità è semplicemente questione di guadagno e di corrente. Il tasso di risposta di un sistema di motore lineare guidato possono essere molteplici volte quella di un dispositivo di ricircolo di sfere driven. Tuttavia si deve notare che questa è limitata la forza di motori di picco, la corrente disponibile e la risoluzione del feedback.

Funzionamento libero di manutenzione: Dato che i motori lineari di oggi non hanno contatto con parti non vi è usura.

L'aspetto negativo, nonostante i miglioramenti, riguarda l'inefficienza dei motori lineari: il consumo di energia è fino a cinque volte superiore a quello degli attuatori cremagliera e pignone. Il fabbisogno energetico superiore può significare, oltre al diretto costo energetico maggiore, maggiori investimenti in infrastrutture per le linee ad alta potenza, trasformatori e azionamenti elettrici. Inoltre i motori lineari generano molto calore e spesso hanno bisogno di un sistema secondario di raffreddamento, che aggiunge costi e complessità e peggiora ulteriormente l'efficienza complessiva. La generazione di

calore può essere elevata alle basse velocità o durante operazioni ad alta forza, come per esempio la perforazione.

Poiché sono a trazione diretta, i motori lineari non possono usufruire della riduzione del cambio. I riduttori sono comunemente usati per accoppiare la velocità di un motore rotativo e la coppia del carico. Con un motore lineare, questo non è possibile e porta talvolta ad un sistema meno efficiente.

Dal punto di vista di controllo a circuito chiuso, carichi esterni che inducono variazioni di posizione possono causare oscillazioni o risonanze. Senza la riduzione dell'inerzia e dello smorzamento dei sistemi meccanici relativi, si possono creare problemi alla superficie del componente da lavorare. Tra le altre considerazioni, la contaminazione da trucioli o piccoli frammenti può essere un problema a causa della forte attrazione magnetica se il motore lineare non è protetto.

È necessario quindi valutare molto bene i costi e il consumo di energia potenzialmente più elevati contro i vantaggi di prestazioni e produttività della macchina. Tutto ciò rende controversa la valutazione dei vantaggi del motore lineare rispetto alle tradizionali tecniche di trasformazione del moto rotativo in lineare.

Per tali motivi il motore lineare spesso è scelto in ambito industriale solo per le caratteristiche di forza, che può superare i 2 kN, e per la possibilità di applicare una tensione meccanica costante e uniforme nella manipolazione dei materiali. In tal modo, ad esempio, è possibile trascinare nastri metallici durante la formazione delle bobine perché i sistemi meccanici tendono ad applicare un'azione di tiro non uniforme con significativi rischi di danneggiamenti locali del nastro.

2.7. Confronto tra i vari tipi di motori elettrici

Di seguito una sintesi delle caratteristiche dei motori lineari e come ogni tipo di motore è paragonabile alle altri.

Attribute	Ironcore	Ironless	Slotless
Cost	Low	High	Lowest
Attractive Force	Highest	None	Moderate
Cogging	Highest	None	Moderate
force/Size	Best	Moderate	Good
thermal Characteristics	Best	worst	good
Forcer Weight	Heaviest	Lightest	Moderate
Forcer Strength	Best	Worst	Good

2.8. Panoramica del mercato

Nella seguente tabella vengono indicati alcuni produttori di motori lineari (nei quali ci si è imbattuti durante la ricerca di materiale per questa tesi) e le relative tipologie prodotte, si tenga presente che alcune ditte producono anche altri tipi di motori (rotativi, sistemi integrati anche con vite a ricircolo. . .)

Produttore	Tipologie di Motori Prodotti	Pagina web
Aereotech	Ironcore e Ironless	www.aerotech.com
Airex	Ironless	www.airex.com
Baldor	Ironcore, ironless, motori a passo a singolo e doppio asse, motori AC a induzione, motori lineari DC non commutati, motori DC a spazzole, motori Hybrib Core, sistemi integrati	www.baldor.com
Califonia linear device (CLD)	Tubolari	www.calinear.com
Copley	Tubolari, sistemi integrati	www.copleycontrols.com
Faulhaber	Tubolari	www.faulhaber-group.com
Hiwin	ironcore, ironless a doppio asse	www.hiwin.com
Motor power company	Ironcore, sistemi integrati, motori lineari curvi	www.motorpowergroup.com
Parker	Ironless, ironcore, sistemi integrati anche su base slotless, motori di dimensione ridotte	www.parkermotion.com
Rockwell	Ironcore, ironless, sistemi integrati	www.rockwellautomation.com
LinMot	Tubolari, sistemi integrati	www.linmot.com
Intellidrives	Ironcore e Ironless	www.intellidrives.com
Siemens	Ironcore	www.automation.siemens.com

2.8.1. Moto Lineare Pneumatica. La soluzione pneumatica presenta come vantaggi la semplicità e i costi, mentre gli svantaggi sono dati da flessibilità, dinamica, durata e stabilità del processo, tutti vantaggi che invece offre un motore lineare, oltre ad una ancor maggiore semplicità, relativa al numero dei componenti: in un sistema pneumatico sono molti di più che in un sistema con motore lineare, dove sono presenti solo un plc, un controllore ed il motore, con cablaggi nettamente ridotti rispetto alla pneumatica (vedi figura 2..8.1).

Il motore lineare permette posizioni multiple/intermedie (rispetto alla lunghezza dello scorrevole), cosa che non si ha con la pneumatica, nella quale lo stantuffo può trovarsi unicamente ad inizio o fine corsa e per modificare quest'ultima bisogna intervenire manualmente ogni volta tramite noiose regolazioni; il motore lineare inoltre può essere programmato semplicemente grazie alla funzione di autoapprendimento (teach-in a mano). Per quanto riguarda la stabilità, le curve di velocità ed accelerazione dei motori lineari sono stabili nel tempo ed alcuni di essi sono dotati della funzione di autodiagnosi.

Coi motori lineari è anche possibile modulare la forza, procedimento complesso per la pneumatica, dal momento che richiede la riduzione della pressione ma anche del diametro dei tubi. La pneumatica si adatta meglio dei motori lineari per le applicazioni verticali: questi ultimi necessitano infatti di dispositivi di supporto per tali applicazioni, mentre la pneumatica no.

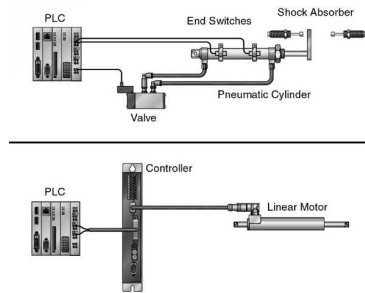


FIGURA 2.8.1. Confronto tra pneumatica e motori lineari riguardo cablaggi ed accessori necessari

Applicazioni: Gli attuatori pneumatici si possono trovare nelle più diverse applicazioni che spaziano dalle attrezzature agricole alle apparecchiature industriali, dagli impianti di ventilazione agli apparecchi medicali. Ovunque occorra sollevare, abbassare, spingere, tirare, ruotare o posizionare un carico.

- Macchine agricole e operatrici: settore agricolo, edile, minerario,
- attrezzature stradali: dalle ferroviarie, pantografi, valvole a farfalla.
- Impianti Industriali: nastri trasportatori, piattaforme di lavoro, macchine per distribuzione, taglio, i
- Salute e fitness: letti e sollevatori per infermi, veicoli speciali per disabili e sedie a rotelle, dispositivi ospedalieri.

2.8.2. Moto Lineare Idraulico. Gli attuatori idraulici, avendo un elevato rapporto forza/peso, consentono di ottenere forze molto elevate, anche in condizioni di stallo; come per la pneumatica, il moto è a guida diretta. Potenzialmente possono avere buon comportamento dinamico e precisione discreta ($10\mu\text{m}$) e non hanno problemi di surriscaldamento.

Essi però presentano notevoli svantaggi: innanzitutto non consentono di ottenere velocità superiori a 2 m/s e dunque il rendimento è decisamente basso, inoltre vi sono varie fonti di disturbo, come attrito e comprimibilità del fluido, ed alcuni fattori esterni, come temperatura e pressione, possono portare a variazioni nei parametri del fluido. Il comportamento è non lineare e non risultano adatti per posizionamenti ad elevata precisione, inoltre il loro controllo è decisamente complicato; il funzionamento è rumoroso e richiedono sorgenti di alimentazione autonome.

I motori lineari ovviano a tutti questi svantaggi: permettono velocità molto elevate, consentendo al tempo stesso forze di qualche migliaio di Newton, il loro controllo è semplice e non presentano i disturbi tipici degli attuatori idraulici.

Altro aspetto negativo dei questi ultimi, tranquillamente ovviabile con un motore lineare, è la lunghezza della corsa, limitata ad un massimo di 6 metri per i primi, illimitata, costi permettendo, per i secondi. Unici punti a favore dell'idraulica in questo confronto sono il problema del surriscaldamento, assente per gli attuatori idraulici e critico invece per quelli elettrici, e l'utilizzo in applicazioni verticali, per le quali valgono le stesse considerazioni fatte per la pneumatica.

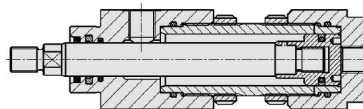


FIGURA 2.8.2. Sezione di un cilindro idraulico. Si notano sopra e a destra (cioè rispettivamente di lato e dietro al cilindro) gli ingressi per la pompa dell'olio

Vantaggi dei sistemi idraulici

- Semplicità di progetto.
- flessibilità di dislocazione
- controllo: consente di controllo delle forze e della velocità in un ampio campo con estrema facilità.
- protezione automatica contro sovraccarichi.
- capacità di trasmettere di potenze anche elevate

Essi presentano tuttavia alcune limitazioni:

- rendimenti totali di trasmissione non elevati (50-70%)
- difficoltà di sincronizzazione di più attuatori in modo semplice
- difficoltà a mantenere rigorosamente costante la velocità dei movimenti in presenza di resistenze variabili.

Applicazioni:

- Macchine per laterizi
- pale cariatrici
- Gru industriali.
- Macchine agricole e delle costruzioni stradali.

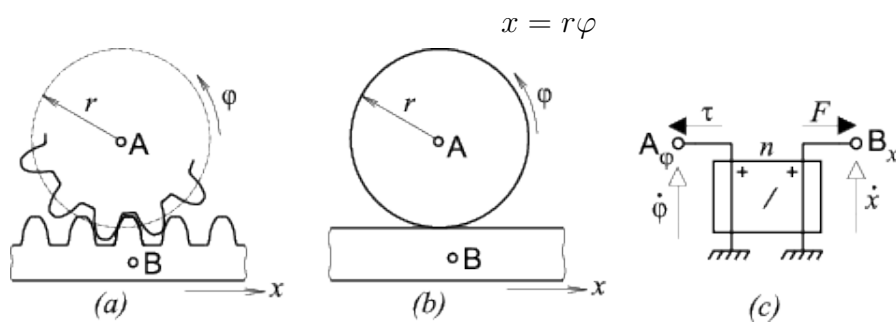
2.8.3. Confronto tra le prestazioni di un motore lineare tubolare e alcuni dispositivi tradizionali. .

	Tubolar Motors	Mechanical drives	Hydraulics	Pneumatic
Speed	100 in/sec	10 in/sec	10 in/sec	20 in/sec
Accuracy	0.001 in.	0.001 in.	0.1 in.	0.1 in.
Stiffness	High	Medium	Medium	low
Friction	Medium	Medium	High	High
Temperature range	125°C	125°C	50°C	50°C
Shock loading	High	Medium	High	High
Efficiency	50%	40%	25%	25%
Noise	40 db	80 db	120 db	120 db
Environmental concerns	None	Minimal	Oil leaks and disposal	oily air mist
Controllability	Fully programmable	Fixed move profiles (cams) Backlash increases	Limited move profiles	Mostly bang/bang control

Controllo del moto lineare

3.1. Trasformazione da moto rotatorio a moto lineare

In problemi di controllo del movimento è spesso necessario convertire il movimento di rotazione in una traslazione e viceversa. Ad esempio, un carico può essere controllato per muoversi lungo una linea dritta attraverso un motore rotativo e cremagliera e pignone assemblaggio, come illustrato in figura. Il pignone è un ingranaggio piccolo, e la cremagliera è un elemento lineare con l'ingranaggio su un lato. La relazione che descrive di questo sistema è definito come

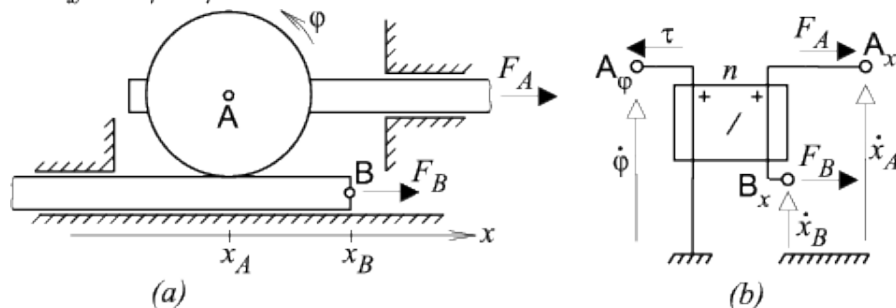


così la relazione di conversione da rotante a lineare è:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}(t) \\ F(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & n \\ -n & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tau(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}$$

In cui l'accoppiamento rapporto vale

$$n = \frac{\dot{\varphi}}{\dot{x}} = -\frac{F}{\tau} = \frac{1}{r}$$



Un altro approccio per rotante conversione movimento di traslazione è di utilizzare il movimento rotatorio di una puleggia combinato con il movimento lineare di una cinghia. Lo stesso effetto si ottiene combinando con una ruota dentata con una catena, un tamburo con una fune o cavo avvolto intorno ad esso, ecc. Questo concetto è illustrato in Fig a. Un gruppo comune di due pulegge e da una cinghia utilizzati per il controllo di una massa attraverso una delle pulegge da un motore rotativo primario è mostrato in fig b. Sia l'unità e la puleggia di rinvio hanno lo stesso raggio r.

3.2. Confronto tra Motori Lineari e cinghia e puleggia

Metodo tradizionale per produrre moto lineare partendo da un motore rotativo, il sistema a cinghia e puleggia vede nella resistenza alla tensione da parte della cinghia

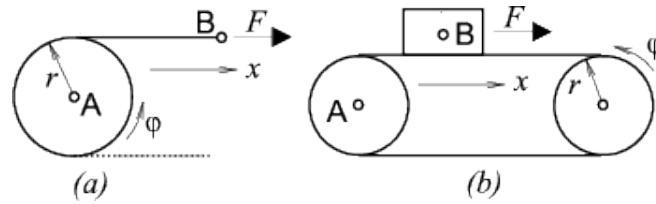


FIGURA 3.1.1. (a) puleggia o pignone. (B) cinghia e puleggia roto-traslazione di montaggio.

stessa il suo limite principale alla forza spinta sostenibile. Allo stesso modo, anche precisione e ripetibilità soffrono delle limitazioni dovute alle caratteristiche meccaniche della cinghia.

Ad esempio, un sistema a cinghia e puleggia consistente in una puleggia di 100 mm di diametro e rapporto di trasmissione 5:1 può produrre uno spostamento lineare alla velocità di 3.14 m/s con velocità d'ingresso del motore pari a 3000 rpm. La risoluzione teorica di questo sistema con un encoder a 10000 impulsi per giro attraverso la trasmissione sarebbe di 6.3 μm .

Tuttavia, posizionare un carico su di una cinghia con tale risoluzione e con una certa ripetibilità è praticamente impossibile. Gli avvolgimenti meccanici e la tensione della cinghia, oltre al backlash, inducono infatti inaccurately nel sistema, oltre al fatto che l'encoder rotativo misura in realtà la posizione del rotore e non l'effettiva posizione del carico. Per averla si potrebbe usare un secondo encoder (stavolta lineare) ma ciò aggiungerebbe costo ulteriore.

Con il sistema a cinghia, anche il tempo di assestamento è un problema. Infatti anche le migliori cinghie rinforzate alla fine di un movimento molto veloce presenteranno un ritardo nell'assestamento dovuto a vibrazioni, oscillazioni o imprecisioni, che rendono impossibile spingere la macchina a ritmi di lavoro troppo sostenuti. Questo problema peggiora con cinghie più lunghe. Il meglio che si può raggiungere in un sistema a cinghia e puleggia in termini di ripetibilità di posizione è circa da 25 a 50 μm , con la cinghia tensionata ottimamente ed i cuscinetti precaricati.

Siccome sia velocità che ripetibilità sono cruciali parlando di servomeccanismi, il sistema a cinghia e puleggia non è una Dall'altro lato, un sistema con motore lineare può raggiungere velocità anche di 10 m/s e posizionare il carico con una precisione di 0.1 μm , o migliore. Solamente la risoluzione degli encoder lineari utilizzati e la stabilità della meccanica limitano le performance. Dal momento che non c'è alcun backlash, un sistema ad azionamento lineare diretto avrà ripetibilità assoluta anche col trascorrere del tempo. Anche il tempo di assestamento risulta ottimale, dal momento che il carico è direttamente collegato allo slider e così non ci saranno oscillazioni o vibrazioni intrinseche al sistema.

Si rende necessario un solo encoder che viene direttamente collegato al carico per mantenere l'accuratezza nel posizionamento. Anche in sistemi di moto lineare a lunga percorrenza, le prestazioni e l'accuratezza non diminuiscono, dal momento che le piste magnetiche sono componibili e il carico rimane direttamente collegato allo slider.

Un'ulteriore considerazione finale: per sistemi a cinghia e puleggia il carico deve essere leggero, altrimenti il sistema stesso verrebbe danneggiato; al contrario un tipico motore lineare può produrre parecchie migliaia di Newton di forza di spinta e ancora non compromettere le proprie performance.

3.2.1. Panoramica Attuatori a cinghia dentata Parker. Gli attuatori a cinghia serie LCB, HLE e HPLA possono essere facilmente combinati tra di loro così come

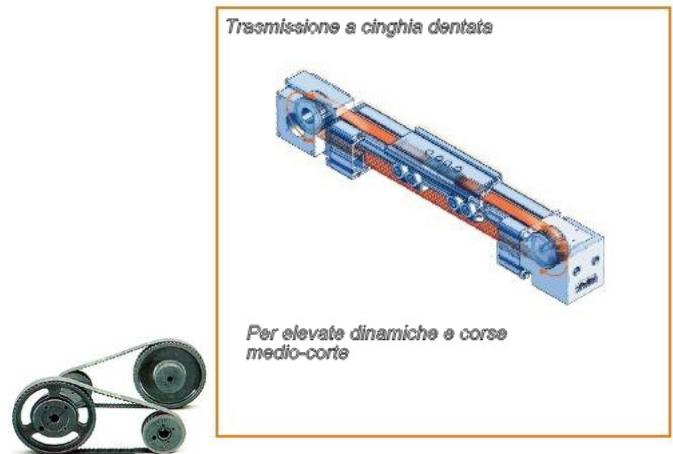
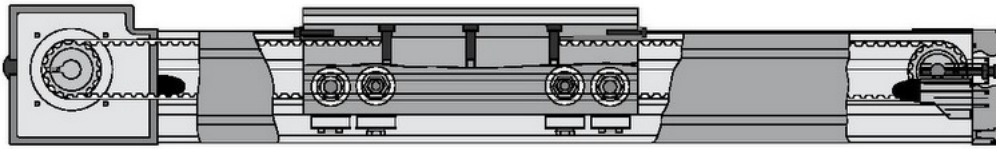


FIGURA 3.2.1. Cinghia e puleggia

tra gli attuatori a pignone e cremagliera e quelli verticali. L'ampia gamma di accessori Parker permette di creare un sistema completo di manipolazione e di scegliere l'attuatore lineare ideale per ogni compito e applicazione. Gli attuatori a cinghia, con elevate dinamiche e praticamente privi di manutenzione, sono disponibili in sette taglie da 40mm fino a 180mm.

Applicazioni: Per macchine e sistemi evoluti ed economici

- Manipolazione: pallettizzatori, alimentazione e rimozione di materiale
- Macchine tessili: taglio a lunghezza e trasversale, impilamento, imbottitura, aggraffatura
- Ingegneria di processo: verniciatura rivestimento, incollatura
- Immagazzinamento: gestione e mantenimento dello stock
- Industria delle costruzioni: copertura e inserimento di rinforzi in acciaio
- Ambienti puliti: trasporto e preparazione di alimenti
- Macchine utensili: caricamento dei pezzi in lavorazione, cambio utensili.



Tipo	corsa fino a (m)	velocità fino a (m/s)	Accelerazione fino a (m/s ²)	Forza di spinta fino a (N)	Carico tipico (kg)	Ripetibilità fino a (mm)	Taglia
LCB	5.5	8	20	560	30	±0.2	40,60
HLE	10	5	10	1350	300	±0.05	100,150
HPLA	10	5	10	5460	500	±0.05	80,120,180

3.3. Confronto tra motore lineare e pignone cremagliera

Il sistema a pignone e cremagliera (figura) è meccanicamente piú rigido di uno a cinghia e puleggia ma si applicano le stesse equazioni di traslazione. Dunque un pignone di 100 mm di diametro attraverso una trasmissione 5:1 pu'ò produrre una velocità lineare di 3.14 m/s a 3000 rpm in ingresso, sebbene il sistema pignone- cremagliera fornisca maggior capacità di spinta.

Ancora una volta lo svantaggio principale è la mancanza di accuratezza e di ripetibilità. La trasmissione e il pignone presentano delle imprecisioni nel trasmettere il moto in entrambe le direzioni e, a lungo andare, l'usura aumenterà tale problema; inoltre il backlash nel sistema impedisce all'encoder posizionato sul motore di rilevare l'effettiva posizione del carico.

Il backlash nella trasmissione non solo porta all'inaccuratezza, ma causa anche instabilità nel servo-sistema, portando a guadagni minori e performance generali piú lente. I motori lineari non sono soggetti a queste limitazioni e possono spingere il carico a maggiori velocità.

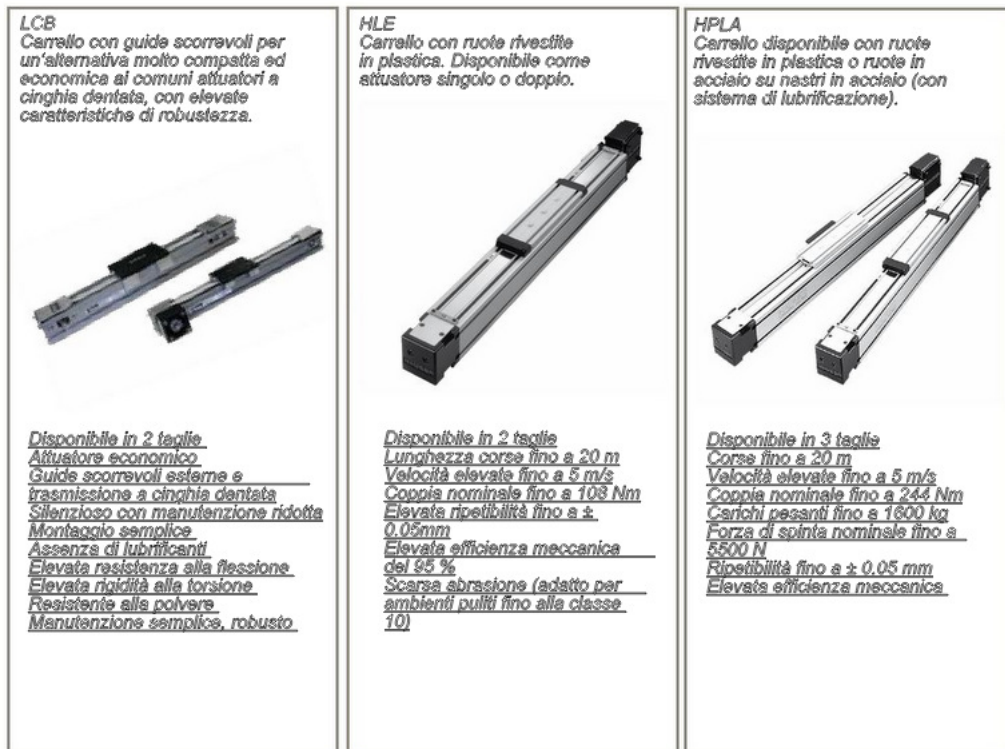


FIGURA 3.2.2. Attuatori a cinghia (Parker)

Anche considerando l'usura meccanica dovuta al tempo e all'utilizzo, il motore lineare e l'encoder ad accoppiamento diretto forniranno sempre un posizionamento estremamente accurato, diversamente dal sistema a pignone e cremagliera.

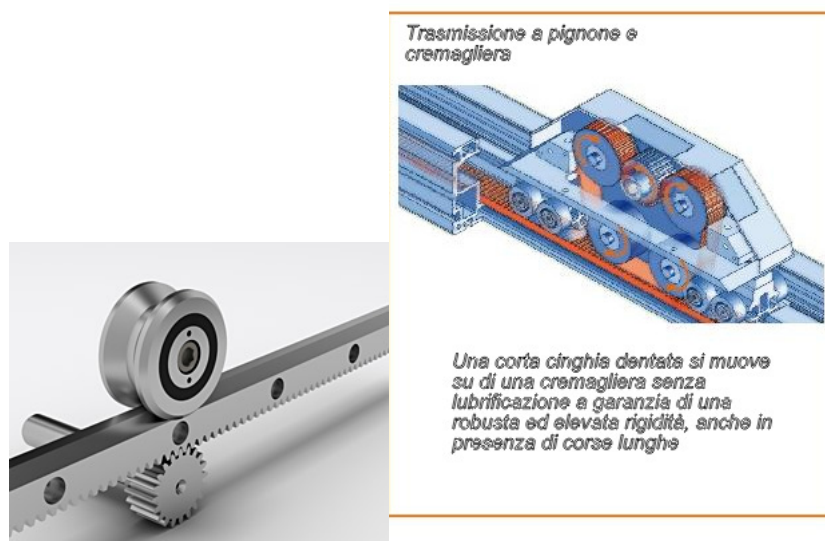


FIGURA 3.3.1. pignone cremagliera

3.3.1. Vantaggi dell'azionamento a pignone e cremagliera:

- alta e consistente rigidità indipendente dalla lunghezza o dalla posizione della corsa
- possibilità di lunghe corse (fino a 50 m)
- possibilità di vari carrelli su singolo attuatore

Aree di applicazione

per macchine innovative ed economicamente vantaggiose:

- Tecnologia di manipolazione: es. palettizzatori, alimentatori
- Costruzione macchine tessili: es. taglio trasversale e in lunghezza
- Ingegneria di processo: es. verniciatura, rivestimento, incollaggio
- Magazzini: es. immagazzinamento
- Costruzione: es. rivestimenti, inserimento rinforzi in acciaio
- Tecnologia stanza asettica: es. rivestimento e trasporto wafer
- Macchine utensili: es. cambio utensile, cambio pezzo
- Tecnologia di test: es. guida di sensori ultrasonici.

3.4. Moto lineare con Biella Manovella

Generalità e descrizione

È un manovellismo di spinta impiegato per CONVERTIRE UN MOTO rettilineo alternato in un moto rotatorio (o viceversa). È utilizzato nella maggior parte dei motori endotermici e nelle macchine volumetriche (pompe, compressori).

I suoi principali componenti sono: lo STANTUFFO (o PISTONE) che porta al suo interno lo spinotto cilindrico sul quale si articola l'estremità superiore della biella (piede di biella), mentre l'estremità inferiore (testa di biella) abbraccia il perno posto al termine della manovella calettata sull'albero a gomiti del motore; la BIELLA, asta collegata con due cerniere, da un lato allo stantuffo, dall'altro alla manovella; la MANOVELLA, asta collegata con la biella e vincolata a ruotare intorno al punto O; il TELAIO che costituisce il supporto sul quale poggia il complesso.

La schematizzazione di calcolo è quella riportata in figura

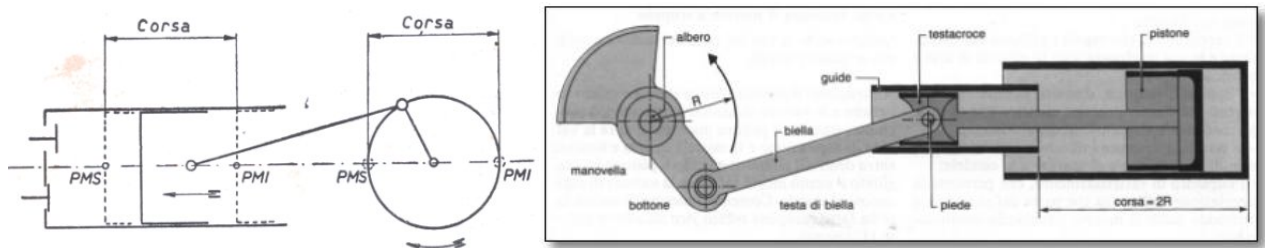


FIGURA 3.4.1. Biella Manovella

Facendo ruotare la manovella, lo stantuffo si muoverà con velocità variabile, lungo una traiettoria rettilinea, tra due punti estremi chiamati punto morto superiore (PMS) e punto morto inferiore (PMI). Questi punti sono chiamati morti, perché in questi punti è nulla la velocità dello stantuffo.

Trova larghissima applicazione in numerosi elementi meccanici, dove i più comuni sono:

- Motori a pistoni alternativi (endotermici e non)
- Sistemi di chiusura delle presse da stampaggio
- Macchine utensili, come i demolitori o scalcinatori

3.5. Confronto tra motore lineare e sistema a vite

Probabilmente il piú comune tipo di trasformazione da moto rotativo a lineare è la vite, sia essa conduttrice o a ricircolo di sfere (figura).

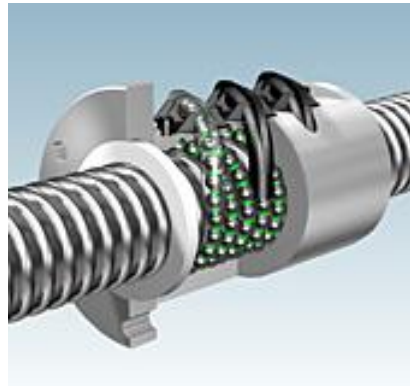


FIGURA 3.5.1. Vite a ricircolo di sfere

Il sistema a vite conduttrice (o madrevite), sebbene non sia costoso, è un sistema inefficiente di produzione di moto lineare, tipicamente con rendimento pari al 50%. Non è neanche una buona scelta per applicazioni con elevato ciclo utile, dal momento che la chiocciola che scorre lungo la vite soffre di usura dovuta al contatto tra le superfici.

L'elevato attrito risultante può minimizzare il backlash ma produce calore e usura, riducendo l'accuratezza e la ripetibilità, già scarse dal momento che la vite non è tipicamente un prodotto di precisione e presenta inaccuranze intrinseche.

Il sistema a vite a ricircolo di sfere usa una chiocciola con sfere ed è quindi molto più efficiente nel convertire motorotativo in lineare, tipicamente il rendimento è infatti pari al 90%. Questo tipo di sistema è migliore della vite conduttrice per elevati duty cycle.

Una vite a ricircolo di sfere ad alta precisione aumenta l'accuratezza, ma è più costosa e, col tempo, si usurerà comunque e accuratezza e ripetibilità diminuiranno. Ad ogni modo, per entrambe le viti non si possono raggiungere alte velocità senza compromettere la risoluzione del sistema: è possibile infatti aumentare la velocità della vite aumentando il passo, ma ciò ha effetti diretti sulla risoluzione di posizionamento della vite. Inoltre una velocità di rotazione troppo alta può causare il raggiungimento della frequenza di risonanza, causando instabilità e vibrazioni; come se non bastasse tale problema aumenta all'aumentare della lunghezza della vite. Ciò ovviamente limita la capacità di aumentare l'output netto di una macchina o la lunghezza del percorso mantenendo l'accuratezza nel posizionamento.

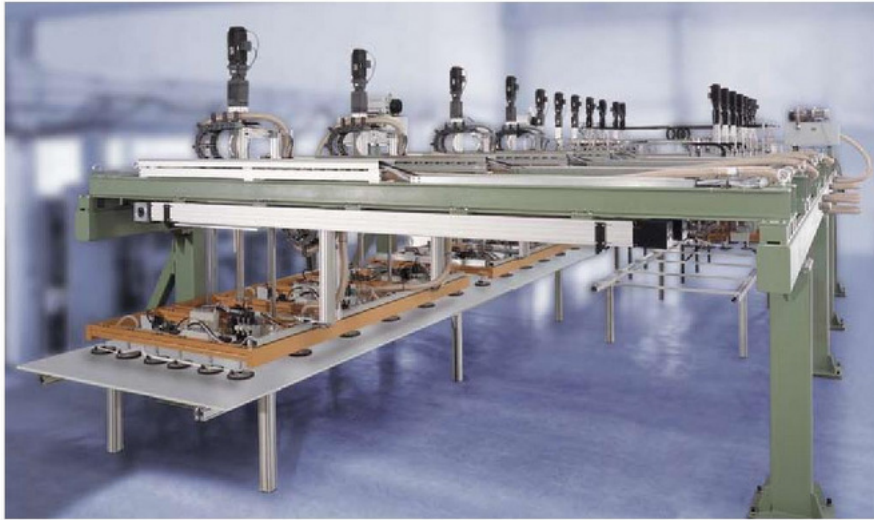
Come già detto in precedenza, il motore lineare non introduce nè backlash nè problemi di posizionamento, dal momento che i cuscinetti dello slider lineare sono l'unico punto di attrito; si possono raggiungere velocità molto elevate e si possono ottenere traiettorie lunghe a piacimento.

Come per gli altri sistemi di traslazione discussi, il posizionamento del carico in un sistema a vite è fatto con un encoder rotativo montato sul motore; il controllore non chiude mai veramente l'anello sul carico. In un sistema con motore lineare invece l'encoder è posto sul carico che dunque viene posizionato perfettamente. Il motore lineare si dimostra dunque superiore sotto molteplici punti di vista anche alla soluzione a vite.

Aree di applicazione:

Sistemi di manipolazione ed alimentazione:

- industria della plastica e del legno
- attuatori verticali per macchine utensili di carico
- industria automotive per componenti di trasporto e alimentari
- Attrezzature di test ed applicazioni di laboratorio
- Movimentazione valvole Pick & Place
- Alimentatori materiali per l'industria alimentare
- impianti siderurgici
- presse ad iniezione
- industria nucleare



3.5.1. Confronto tra viti a rulli e viti a sfere. La capacità di carico di una vite ad elementi volventi dipende dalle caratteristiche dei punti di contatto:

- dismetro
- durezza
- grado di finitura superficiale
- precisione dei contatti nell'assicurare la ripartizione del carico.

Viti a sfere

In una vite a sfere il carico viene trasmesso attraverso le sfere interposte nelle piste tra vite e madrevite. In una vite a sfere monoprinzipio il diametro delle sfere è limitato a circa il 70 % del passo: vi è una sola spirale di sfere per madrevite, con un numero ridotto di contatti.

Viti a rulli

In una vite a rulli, il carico è trasmesso dalla madrevite alla vite attraverso la filettatura dei rulli che sono tutti sotto carico. Il diametro delle superfici di contatto risulta notevolmente aumentato così come il numero dei punti di contatto.

Esempio di confronto (superficie di contatto)

	Vite a sfera	vite a rulli
Diametro	medio	alto
numero di contatti	medio	alto
grado di finitura superficiale	buono	buono
precisione dei contatti	buono	buono
capacità di carico	medio	alto

quindi riassumendo possiamo dire che,ragioni per utilizzare una vite a rulli:

- Elevata capacità di carico
- elevata velocità di rotazione
- alto tasso di accelerazione e decelerazione
- Capacità di sopportare urti occasionali e forti carichi da shock
- vita più lunga
- costi minimi di manutenzione
- movimento altamente affidabile
- Piccola risoluzione con ottima ripetibilità
- Meccanismo epicicloidale di precisione:Capacità di lavorare in presenza di ghiaccio, sporco o scarsa lubrificazione

3.5.2. Esempio di confronto (Danhaer Motion).

	Cinghia	A Vite
sigla	2REE16	2RBE16
corsa max [mm]	2.8	2.8
velocità max [m/s]	3	1
Range di temperatura [°C]	-20-+70	-20-+70
peso slitta[kg]	1.7	1.7
carico max Fx [N]	1488	3000
Carico max Fy [N]	2100	2100
Carico max Fz [N]	4300	4300
Coppia max Mx [Nm]	250	250
Coppia max My [Nm]	250	250
Coppia max Mz [Nm]	125	125
Spostamento [mm/g]	110	5/10/20
Ripetibilità [± mm]	0.05	0.005
Precisione di posizionamento su 300 mm di corsa [mm]	0.2	0.025

selezione dei motori lineari per macchine di confezionamento ad alte velocità

Nell'articolo che segue ci spingeremo oltre. Infatti, non ci limiteremo a descrivere e commentare i prodotti presenti sul mercato ma, ci chiederemo di definire quella, che a giudizio di chi scrive, è la configurazione più conveniente per un motore da impiegare all'interno delle macchine da packaging.

Prima di tutto individueremo quali sono i parametri di prestazione e le problematiche che possono essere considerati cruciali nell'applicazioni di packaging, poi proporrò alcuni aspetti costruttivi che posso costituire una linea guida nello sviluppo di prodotti industriali dedicati allo specifico settore delle macchine da imballaggio.

4.1. Le caratteristiche dei motori lineari che vengono più apprezzate nel settore delle macchine automatiche da imballaggio

I maggiori vantaggi dell'applicazione di motori lineari all'interno delle macchine automatiche sono principalmente legati alla semplificazione delle catene cinematiche di trasmissione e trasformazione del moto.

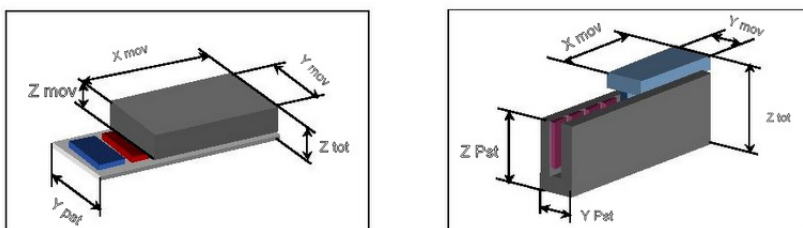
Oltre all'aumento dell'affidabilità ed il miglioramento dell'accuratezza di posizionamento quello che è realmente cruciale è l'aumento di flessibilità operativa che consente di realizzare sistemi di produzione che rapidamente riescono ad adattarsi a variazioni sia del volume produttivo che delle caratteristiche dei prodotti come la forma e le dimensioni.

La crescita della flessibilità si ottiene dalla capacità di poter ottenere ogni moto dei mezzi operativi non più da rigidi meccanismi, ma da dispositivi che essendo programmabili consentono la massima libertà nella realizzazione dei profili di moto. Soprattutto in macchine di tipo intermittente, appare evidente che la maggior parte dei moti che i mezzi operativi sono chiamati a compiere sono di tipo lineare.

All'interno di una macchina automatica tali attuatori possono essere, dunque, impiegati per realizzare una grande vastità di compiti; basti pensare a sottogruppi funzionali fondamentali quali spingitori, tastatori, selettori ed ad operazioni di tipo "pick and place" o di movimentazione prodotto ed imballi.

4.2. Parametri principali che caratterizzano la progettazione

Nella tabella che segue sono riportati i parametri principali che caratterizzano i motori lineari e che risultano fondamentali nel processo di selezione e progettazione.



4.2. PARAMETRI PRINCIPALI CHE CARATTERIZZANO LA PROGETTAZIONE E4

Tipi di moto	-	Generalmente i motori lineari compiono moti rettilinei pertanto il loro funzionamento è di tipo alternato. Esistono, però, in commercio anche dei motori che possono realizzare percorsi curvi e chiusi ad esempio si visiti il sito www.magnemotion.com .
Corse massime raggiungibili	-	Alcune forme costruttive (motori di tipo tubolare) i valori delle corse hanno delle limitazioni (al massimo circa 2-3 m) nelle altre la pista di magneti permanenti è in realizzazione modulare per cui l'unica limitazione è dettata dai costi.
Velocità	[m/sec]	Valori tipici possono essere anche dell'ordine di 7 m/sec e superiori
Accelerazioni	[m/sec ²] o in g	Valori tipici possono essere anche dell'ordine di 20 g e superiori
Massa del movente	[kg]	E' la massa della parte mobile del motore. Questo rappresenta un parametro importante nella selezione di un motore in applicazioni con alte accelerazioni.
Massa dello statore	[kg]	E' la massa della parte fissa del motore. In caso di piste modulari viene espressa in kg su metro di pista
Forza di picco (f picco)	[N]	E' la forza che il motore è in grado di erogare solo per brevi istanti
Forza d'attrazione	[N]	Nella configurazione monolaterale e la forza dovuta all'attrazione magnetica tra i magneti permanenti della pista e il nucleo ferromagnetico dell'avvolgimento.
Forza continua	[N]	E' la forza che il motore è in grado di erogare in modo continuo
T max	°C	Temperatura massima sopportata dall'avvolgimento (circa 130-150°C)
Air gap	[mm]	E' il traferro tra statore e movente. Per motori monolaterali e bilaterali il traferro è generalmente dell'ordine del millimetro con tolleranze molto strette, le configurazioni cilindriche sopportano invece un traferro largo e lasciano tolleranze molto più ampie
kf	N/A	costante di forza
BEMF	V(m/sec)	Costante di forza contro elettromotrice
Sistemi di raffreddamento	-	E' noto che le prestazioni di ogni motore elettrico sono limitate dalla capacità di evacuare il calore prodotto per effetto Joule. Per tale ragione si ricorre spesso a sistemi di raffreddamento. I più comuni sono quelli ad aria compressa o ad acqua.

Prima di scegliere il motore più adatto alla propria applicazione è necessario conoscere nei dettagli cosa il motore è chiamato a fare, ovvero la distanza da percorrere, i tempi e le forze in gioco: è necessario cioè eseguire il cosiddetto dimensionamento del motore.

Molti produttori mettono a disposizione dei clienti del software in grado di decidere autonomamente quale sia il miglior motore adatto allo scopo, una volta inseriti i parametri del moto richiesti; altri programmi sono stati sviluppati anche da personale docente delle Università.

Ad ogni modo il dimensionamento non è una procedura complicata e può essere eseguito anche a mano: il software evita soprattutto la seccatura di dover ripetere tutti i conti se il motore scelto non si rivela adatto, ad esempio perchè si surriscalda troppo.

Innanzitutto è necessario scegliere un profilo di velocità da adottare per il motore: i due profili più semplici sono il triangolare ed il trapezoidale (figura 4.2.1), disponendo di un programma si possono utilizzare profili più complessi, ad esempio sinusoidali.

Applicando le leggi cinematiche fondamentali e tramite considerazioni geometriche

sulle figure riportate, si ottengono le equazioni riportate in basso nella figura 4.2.1, utili per il calcolo delle velocità e delle accelerazioni richieste al motore.

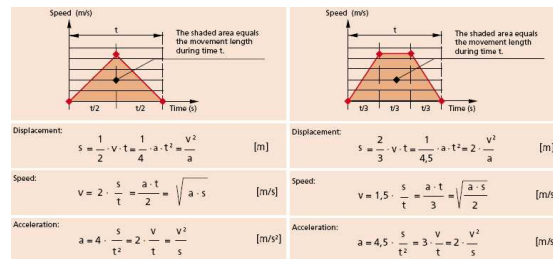


FIGURA 4.2.1. Profili di velocità triangolare (a sinistra) e trapezoidale (a destra) e relative formule

Una tipica applicazione di un motore lineare pu' essere schematizzata come in figura 4.2.2. La forza erogata dal motore deve vincere le forze esterne (rappresentate in figura da una molla), le forze di attrito e quelle gravitazionali, oltre ad essere in grado di muovere la massa complessiva di carico, avvolgimenti ed eventuali cablaggi in movimento.

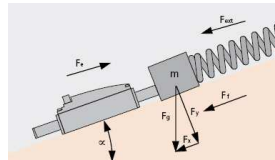


FIGURA 4.2.2. Schema delle forze in gioco

Chiaramente, la massa degli avvolgimenti e di tutto ciò relativo al motore è inizialmente incognita ed i calcoli svolti terranno conto solo del carico; una volta scelto il motore, con sufficiente margine nelle prestazioni, si ripeteranno i conti per verificare che esso sia effettivamente adatto all'applicazione.

4.3. Principali applicazione dei motori lineari nelle macchine packaging

Riassumere in maniera del tutto generale le principali problematiche progettuali riguardanti l'applicazione dei motori lineari all'interno delle macchine automatiche è un compito arduo sia perché questi attuatori sono presenti in una grande varietà di morfologie costruttive sia per il gran numero di parametri che loro il dimensionamento coinvolge.

In ogni modo, è bene evidenziare come sia possibile individuare alcuni aspetti peculiari relativi a questo settore applicativo. Generalmente nella realizzazione di movimentazioni all'interno di macchine per il packaging con motori lineari:

- la legge di moto richiesta è caratterizzata da dinamiche molto spinte in termini di massimi valori di velocità e di accelerazione;
- i carichi di tipo dissipativo risultano spesso trascurabili, mentre molto più prevalenti sono quelli di tipo inerziale;
- data la tipica ciclicità del modo di operare delle macchine per il packaging, all'attuatore lineare viene richiesto di realizzare levati numeri di inversione del moto (generalmente qualche centinaia al minuto);
- le specifiche sull'accuratezza di posizionamento comunemente non sono molto stringenti ed a differenza di altri campi applicativi (macchine utensili o l'industria elettronica) il numero dei set-points è molto limitato lasciando quindi grande libertà nell'ottimizzazione delle leggi di moto.

- i motori lineari possono essere utilizzati anche per realizzare moti in direzione verticale, ma in questo particolare tipo di applicazioni, poiché in condizioni di mancanza di alimentazione essi non oppongono alcuna resistenza al moto retrogrado è necessario prevedere dei sistemi di bilanciamento statico o di frenatura ad attivazione spontanea;
- all'interno dei vari sottogruppi operativi delle macchine automatiche lo spazio a disposizione è generalmente molto ridotto. Inoltre l'applicazione del concetto Direct-Drive comporta la necessità di ospitare un gran numero di attuatori molto prossimi al flusso del prodotto così che la riduzione e la miniaturizzazione degli attuatori risulta un fattore estremamente critico;
- nelle macchine per il packaging la presenza di polveri e sporcizie è rilevante, ma poiché raramente queste sono costituite da sostanze metalliche o magnetiche ciò non costituisce un problema come invece accade ad esempio per le macchine utensili ad asportazione di truciolo;
- l'incompatibilità elettromagnetica ed i problemi legati alla salute e alla sicurezza degli operatori deve essere ben valutata in ogni applicazione;
- generalmente il costo risulta nella maggior parte delle applicazioni il fattore più condizionante.

4.3.1. Aspetti generali nella selezione dei motori lineari. Come accade per i motori rotativi, i motori lineari sono disponibili in un alto numero di tipologie e configurazioni costruttive che si differenziano per intrinseche prestazioni, per integrabilità strutturale e costi. Il primo passo da affrontare nel processo di selezione deve essere quello di soffermarsi nel valutare le differenti tipologie di motori lineari considerando le loro potenzialità rispetto alle specifiche dell'applicazione prima di tutto in termini di principio di funzionamento (motori passo, sincroni o asincroni) e morfologia costruttiva (motori monolateri, bilateri o tubolari).

Naturalmente sarà necessario anche verificare le principali caratteristiche di performance come il valore della spinta continua e di quella massima e della velocità, ma è anche importante non perdere mai di vista il fatto che il motore lineare deve essere inserito all'interno della macchina.

Il più delle volte, infatti, i progettisti trovano molte soluzioni che soddisfano le specifiche relative alle prestazioni meccaniche (in termini di spinta e legge di moto) ma poche di queste soddisfano pienamente altre esigenze ed altri vincoli progettuali ugualmente importanti come il ridotto ingombro, la facilità di integrazione senza apportare profonde modifiche alla struttura della macchina ed una reale convenienza economica.

Per le applicazioni sulle macchine automatiche i motori lineari sincroni (LSM) sono considerati normalmente la soluzione più qualificata grazie al loro alto livello di prestazioni dinamiche e cinematiche ed al loro limitato ingombro.

Inoltre le metodologie di alimentazione e controllo sono simili a quelli adottati per i motori rotativi brushless e ciò rappresenta una fattore di continuità con le soluzioni di tipo tradizionali. Un'altro punto importante da tener presente è il distinguere tra due fondamentali forme commerciali degli azionamenti lineari: i sistemi integrati e i sistemi a configurazione aperta.

I costruttori di motori lineari, generalmente, forniscono solo le due parti fondamentali di cui si costituisce l'azionamento, cioè l'avvolgimento primario e il gruppo di magneti permanenti (configurazione aperta, Fig 4.4.1). Questa scelta commerciale, se da un lato consente un'ottima flessibilità d'impiego in applicazioni anche diversissime tra loro dall'altro, demanda al progettista dell'asse lineare un grande carico di responsabilità ed un oneroso lavoro di progettazione.

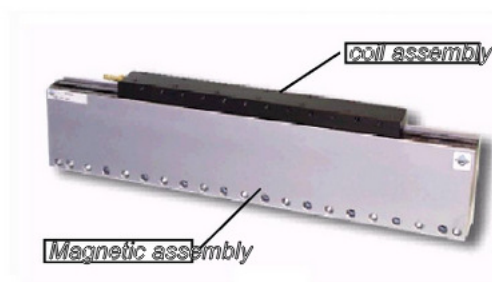
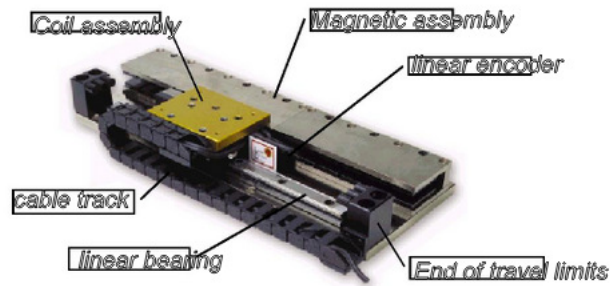


FIGURA 4.3.1. Configurazione aperta fig 1

Se si guardasse al problema dall'ottica di chi progetta e produce solo azionamenti lineari, questa circostanza sarebbe del tutto favorevole, ma per le industrie di packaging in cui la movimentazione lineare è una necessità non un fine è ovvio come tale situazione possa costituire un seria limitazione.

Per ridurre quindi questa distanza tra motori lineari ed industria e per rendere più fruibili i propri prodotti i costruttori di motori hanno sviluppato dei sistemi di tipo integrato in cui, oltre alla parte propriamente elettromeccanica, vengono già implementati tutti gli altri dispositivi necessari alla movimentazione come, ad esempio, il sistema di guide lineari, il sensore di posizione, la catena guida-cavi. In figura 2 è mostrato un esempio di sistema integrato in cui sono evidenziati i principali dispositivi ausiliari.



Dal punto di vista dell'utilizzatore questo rappresenta una semplificazione enorme. Non solo il progetto diventa ovviamente più semplice, ma anche più affidabile e, sebbene i costi di questo tipo di asse lineare restino ancora elevati, sicuramente più economico rispetto alla progettazione completa della movimentazione.

Il progetto diventa più affidabile per il fatto che ora si conosce a priori, da catalogo, tutta quella serie di informazioni come la spinta, le dimensioni effettive e l'accuratezza del posizionamento che invece partendo da una configurazione aperta costituivano le specifiche stesse del processo di dimensionamento.

La validità dei sistemi di tipo integrato e l'attenzione che il mondo dell'industria ha dimostrando a tale tipologia di prodotto sono testimoniati dal fatto che quasi tutti i costruttori di motori lineari o propongono dei propri assi completi o hanno stipulato degli accordi commerciali con ditte che provvedono ad implementare i loro prodotti all'interno di movimentazioni complete.

4.4. Conclusione

Se si esegue un breve riepilogo delle qualità dei motori lineari, integrando i pregi delle varie tipologie di macchine, si possono evidenziare i fattori più importanti: Elevata rigidità, bassi errori di posizionamento, velocità massime.

Durata di vita: la vita del motore è generalmente più lunga di quella degli altri elementi meccanici che costituiscono la catena cinematica per la conversione del moto. Conseguentemente, la durata di vita effettiva del sistema con applicazione diretta della forza sarà determinata dalla durata di vita dei cuscinetti. Questo si traduce in una minor manutenzione ed in una vita più lunga del sistema.

Levigatura: attraverso l'applicazione diretta della forza alle pari in movimento è possibile ottenere un moto più uniforme, eliminando così le vibrazioni prodotte dai giochi meccanici e dall'elasticità degli alberi.

Possibilità di ottenere corse lunghe: incrementando la lunghezza dello statore del motore lineare (costituito da una fila di magneti permanenti incollati su di un piatto d'acciaio), è possibile realizzare corse lunghe, facendo in modo che siano rispettati i valori previsti per il traferro e per le tolleranze di montaggio, senza subire una degradazione delle prestazioni.

Maggiore protezione elettrica e meccanica: consente la permanenza in ambienti ostili.

Semplificazione del progetto: il basso numero di componenti meccanici implicato, rispetto alla soluzione che utilizza motori rotativi, permette di progettare macchine più semplici e meno ingombranti.

Silenziosità: i contatti meccanici, che costituiscono la principale causa di rumore, sono localizzati solo nelle connessioni lineari.

Accuratezza e ripetibilità: l'accuratezza del trasduttore di posizione e alla qualità delle connessioni lineari.

Dalle caratteristiche sopra menzionate si capisce come i motori lineari abbiano molti campi di impiego: possono venire impiegati nelle industrie che producono macchine impacchettatrici, robot X-Y, macchine tranciatrici, macchine laminatrici, etc. La maggior limitazione pratica dei motori lineari è la bassa efficienza dovuta alla presenza di un largo traferro. Inoltre, specialmente nei motori molto lunghi, è difficile mantenere un traferro costante per tutta la lunghezza assiale della macchina. La seconda grande limitazione è imposta dalla corsa del secondario, perciò le applicazioni migliori si ottengono nel caso in cui sia richiesta una limitata corsa del secondario o un moto oscillatorio. Dal punto di vista elettromagnetico esistono alcune differenze fra il motore lineare e il corrispondente rotativo; ad esempio durante il moto nel motore lineare e il corrispondente rotativo; ad esempio durante il moto nel motore lineare le porzioni dell'elemento più lungo che non si trovano nella regione attiva definita dall'altro elemento subiscono dei fenomeni transitori, sia al bordo d'ingresso che in quello di uscita, che fanno incrementare le perdite e generano forze elettromagnetiche resistenti. Per queste ragioni la forza trasmissibile, a pari potenza del motore, risulta limitata rispetto a quella che si otterrebbe con la soluzione tradizionale. Mentre nella macchina rotante la simmetria cilindrica porta ad un bilanciamento di tutte le forze radiali, nella macchina piatta vi è una forza risultante perpendicolare alla direzione di moto: questa caratteristica può essere utile nelle applicazioni in cui sia richiesta la lievitazione, ma non è sempre un effetto desiderato.

Glossario

In questa sezione è presente il glossario dei termini chiave usati all'interno di questa tesi.

- **ACCURATEZZA**- accuracy Vedi "precisione".
- **BACKLASH**: Fenomeno che si verifica in un dispositivo meccanico quando, nonostante l'accoppiamento perfetto tra le parti, una o più di queste presentano un leggero gioco lungo l'asse del movimento anche se dovrebbero rimanere ferme.
- **COGGING** :Forza orizzontale esercitata dalle lamine di ferro di un motore a nucleo sulla pista magnetica per allinearsi con la loro posizione preferita sulla stessa.
- **CORRENTE CONTINUA**- continuous current :Corrente necessaria per produrre la forza continua.
- **COSTANTE DEL MOTORE**- motor constant:è una figura di merito rappresentante l'efficienza del motore: è il rapporto tra la forza continua e la radice quadrata delle perdite di potenza del motore.
- **FORCER** :La parte del motore elettrico contenente gli avvolgimenti.
- **FORZA CONTINUA**- continuous force :La forza che il motore è in grado di erogare in modo continuo e per lungo tempo.
- **FORZA D'ATTRAZIONE**- attraction force :Nella configurazione monolaterale è la forza dovuta all'attrazione magnetica tra i magneti permanenti della pista ed il nucleo ferromagnetico dell'avvolgimento.
- **PISTA MAGNETICA**- magnetic track: La parte del motore su cui sono alloggiati i magneti.
- **GUIDA DIRETTA**- direct drive: Metodo tipico dei motori lineari di accoppiare il carico direttamente al motore, senza trasmissioni o altro. Comporta notevoli vantaggi rispetto agli accoppiamenti meccanici classici.
- **RISOLUZIONE**- resolution : Passo minimo del motore. Il valore dipende dal metodo di misura (encoder, sensori ad effetto Hall. . .) e relativa elettronica di controllo.
- **STATORE**- stator : La parte del motore che non si muove; in genere coincide con la pista magnetica ma, ad esempio nei motori tubolari a stelo mobile, può essere costituito dal forcer.

Bibliografia

- [1] Boldea and Syed A. Nasar, "Linear electric actuators and generators" (Cambridge University Press, 1997).
- [2] Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech, "Linear Synchronous Motors; Transportation and Automation Systems" (CRC Press LLC, 2000).
- [3] Claudio Melchiorri, "Traiettorie per azionamenti elettrici" (Progetto Leonardo, Bologna 2000).
- [4] M. Andriollo, A. Di Gerlando, (Organi di trasmissione, Tecniche Nuove), "Realizzare movimenti rettilinei con guide elettromagnetiche", Componenti Industriali, N° 46, 47, 48, 1999 - 2000.
- [5] E. Bassi, F. Benzi, A. Bruno, "Introduzione alle caratteristiche e alle applicazioni industriali dei motori lineari", da: "Macchine operatrici con motori lineari: quali vantaggi per gli utilizzatori?", 22.BI-MU, Milano, 4 ottobre 2000.
- [6] M. Venturini, "Motori lineari senza raffreddamento per posizionamento: il prodotto Phase Motion Control", da: Macchine operatrici con motori lineari: quali vantaggi per gli utilizzatori?, 22.BI-MU, Milano, 4 ottobre 2000.
- [7] R. Knox, "A comparison of Linear Motor Technology", 2000. <http://www.desogninfo.com/IndustrialDevicesCorp/ref/ComparisonLinear.html>
- [8] M. Johnson, "Selecting the Correct Electromechanical Linear Motion Device", 2000 <http://www.desogninfo.com/IndustrialDevicesCorp/ref/Positioning.html>
- [9] www.motorpowerco.it
- [10] SMC, "Electric actuators - at the push of a button," www.smc.eu.
- [11] Fabrizio Lotti, "I motori lineari nel packaging", at www.opifici.com;
- [12] www.opifici.com;
- [13] J.F. Gieras, Z.J. Piech: "Linear synchronous motor", CRC Press (USA), 2000.
- [14] F. Lotti, G. Vassura, A. Zucchelli, M. Salmon: "Selection of linear motors for high-speed packaging machines", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'01) – 2001.
- [15] guide lineari THK: www.thk.com;
- [16] catene portacavi Brevetti Stendalto: www.brevettistendalto.it;
- [17] motori lineari Trilogy: www.trilogysystems.com;
- [18] motori lineari Aerotech: www.aerotech.com;
- [19] motori lineari Sultzer-Linmot: www.linmot.com;
- [20] MOTOR POWER COMPANY, "SKA DDL. Motori lineari ironcore," maggio 2008.
- [21] MOTOR POWER COMPANY, "SKA ARC linear motor," febbraio 2008.
- [22] M. Piccinelli, "L'applicazione di motori lineari curvi direct drive rivoluziona la robotica," Bologna, 11 marzo 2008.
- [23] Mechatronic system company, "Galileo sphere robot.
- [24] A. Cardone, "Reggio, apre i battenti l'officina delle idee," Econerre, pp. 32– 33, aprile 2008.
- [25] www.rockwellautomation.com.
- [26] Parker, "Trilogy Linear Motor & Linear Motor Positioners," www.parkermotion.com.