

Motori maxon DC e maxon EC

Le cose più importanti

Il motore come trasformatore di energia

Il motore elettrico trasforma la potenza elettrica P_{el} (tensione U e corrente I) in potenza meccanica P_{mech} (velocità n e coppia M). Le perdite che ne derivano sono perdite di attrito, che si attribuiscono a P_{mech} , e perdite di Joule P_J dell'avvolgimento (resistenza R). Le perdite nel ferro sono pressoché nulle nei motori DC maxon senza ferro. Nel motore EC maxon vengono formalmente considerate come un momento di attrito aggiuntivo. Quindi il bilancio della potenza può essere espresso nel modo seguente:

$$P_{el} = P_{mech} + P_J$$

Precisamente si ottiene

$$U \cdot I = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot I^2$$

Costanti elettromeccaniche del motore

La disposizione geometrica dei magneti e dell'avvolgimento è determinante per la trasformazione nel motore della potenza elettrica in ingresso (corrente, tensione) in potenza meccanica in uscita (velocità, coppia). Due importanti parametri di questa trasformazione di energia sono la costante di velocità k_n e la costante di coppia k_M . La costante di velocità lega la velocità n con la tensione indotta nell'avvolgimento U_{ind} (=EMF). U_{ind} è proporzionale alla velocità:

$$n = k_n \cdot U_{ind}$$

Analogamente la costante di coppia lega la coppia meccanica M con la corrente elettrica I .

$$M = k_M \cdot I$$

Il risultato fondamentale è che per il motore maxon le grandezze coppia e corrente sono proporzionali.

Nei grafici del motore perciò la corrente e la coppia sono riportate sullo stesso asse.

Diagrammi del motore

Per ogni motore DC ed EC maxon è possibile tracciare un diagramma, dal quale si possono trarre tutti i principali dati del motore da usare per molte applicazioni. Sebbene non si tenga conto delle tolleranze e delle influenze della temperatura, i valori sono sufficienti per considerazioni di massima. Nel diagramma la velocità n , la corrente I , la potenza in uscita P_2 e l'efficienza η , sono rappresentate in funzione della coppia M a tensione costante U .

Gradiente di velocità

Questa linea descrive il comportamento meccanico del motore con tensione costante U :

- Al crescere della coppia la velocità si riduce in modo lineare.
- Quanto maggiore è la velocità del motore, tanto minore è la coppia risultante.

Con l'aiuto dei due punti estremi, velocità a vuoto n_0 e coppia di stallo M_H , è possibile descrivere la curva (vedi linee 2 e 7 delle schede motore).

I motori DC possono funzionare con qualunque tensione compatibile con l'isolamento elettrico.

Velocità a vuoto e coppia di stallo si modificano in proporzione alla tensione applicata, il che equivale ad una traslazione della linea della velocità sul diagramma. Tra velocità a vuoto e tensione vale con buona approssimazione l'importante rapporto di proporzionalità:

$$n_0 \approx k_n \cdot U$$

ove k_n è la costante di velocità (linea 13 delle schede motore).

Indipendentemente dalla tensione, la caratteristica di questa linea è definita dalla sua pendenza (vedi linea 14 delle schede motore).

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} = \frac{n_0}{M_H}$$

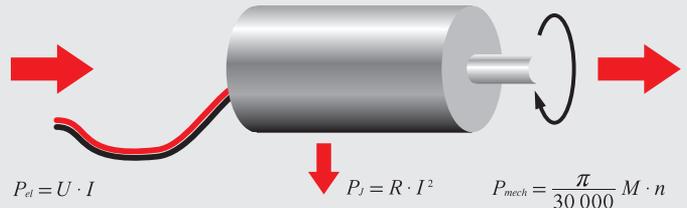
Vedi anche: La tecnica in breve, spiegazione dei dati del motore

Unità di misura

In tutte le formule sono da inserire le grandezze con le unità di misura indicate sul catalogo (vedi grandezze fisiche e loro unità di misura pag. 42).

In particolare vale la regola:

- Tutte le coppie in mNm
- Tutte le correnti in A (anche correnti a vuoto)
- Velocità espressa in numero di giri (rpm) anziché velocità angolare (rad / s)

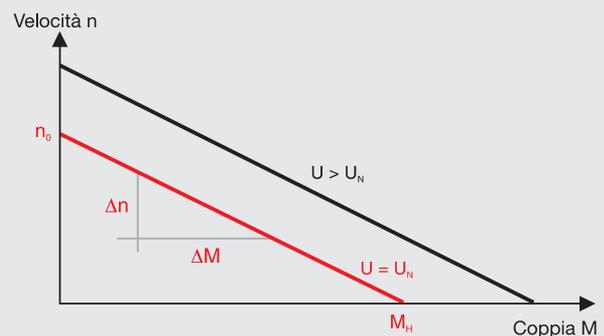


Costanti del motore

Costante di velocità k_n e costante di coppia k_M non sono indipendenti tra loro. Vale:

$$k_n \cdot k_M = \frac{30\,000}{\pi}$$

La costante di velocità è detta anche velocità specifica. Tensione specifica, costante di generatore o di tensione sono principalmente il valore reciproco della costante di velocità ed esprimono la tensione indotta nel motore per numero di giri. La costante di coppia è detta anche coppia specifica. Il valore reciproco è detto corrente specifica o costante di corrente.



Derivazione del gradiente di velocità

Se nella formula della potenza sostituiamo la corrente I con la coppia M si ottiene

$$U \cdot \frac{M}{k_M} = \frac{\pi}{30\,000} n \cdot M + R \cdot \left(\frac{M}{k_M}\right)^2$$

Riformulando e tenendo conto dello stretto rapporto tra k_M e k_n , si ottiene l'equazione di una retta tra velocità n e coppia M .

$$n = k_n \cdot U - \frac{30\,000}{\pi} \cdot \frac{R}{k_M^2} \cdot M$$

Oppure con il gradiente e la velocità a vuoto n_0

$$n = n_0 - \frac{\Delta n}{\Delta M} \cdot M$$

L'inclinazione del gradiente è uno dei parametri più significativi e consente il confronto diretto tra diversi motori. Quanto minore è l'inclinazione, tanto meno sensibile è la reazione della velocità alle variazioni della coppia (carico) e più potente è il motore. Nel motore maxon l'inclinazione del gradiente è praticamente costante all'interno di ogni tipologia di motore a parità di avvolgimenti (ciascuno su una pagina del catalogo).

Gradiente della corrente

La proporzionalità della corrente e della coppia viene rappresentata con un asse parallelo alla coppia stessa: più corrente attraversa il motore e più coppia si produce. La scala della corrente viene stabilita mediante i due punti corrente a vuoto I_0 e corrente d'avviamento I_A (linee 3 e 8 dei dati motore).

$$M_R = k_M \cdot I_0$$

Nel motore EC maxon in luogo delle perdite di attrito nel sistema di commutazione compaiono, fortemente dipendenti dalla velocità, le perdite di ferro nei fasci laminati in acciaio.

La coppia massima viene sviluppata all'avviamento dei motori. È un multiplo della normale coppia d'esercizio. Analogamente anche il consumo di corrente è al massimo.

$$M_H = k_M \cdot I_A$$

Gradiente del rendimento

Il rendimento η descrive il rapporto tra potenza meccanica in uscita e potenza elettrica in ingresso

$$\eta = \frac{\pi}{30000} \cdot \frac{n \cdot (M - M_R)}{U \cdot I}$$

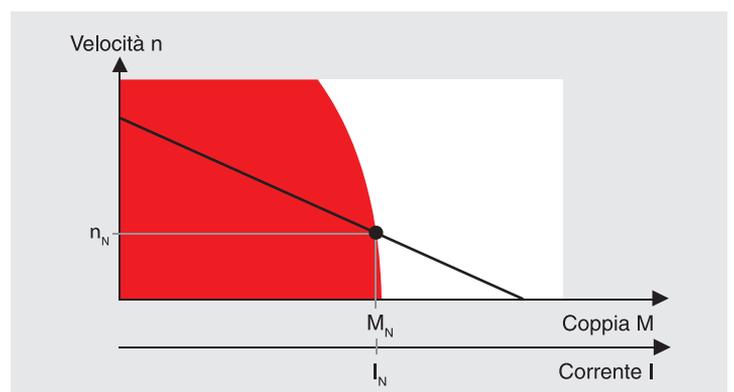
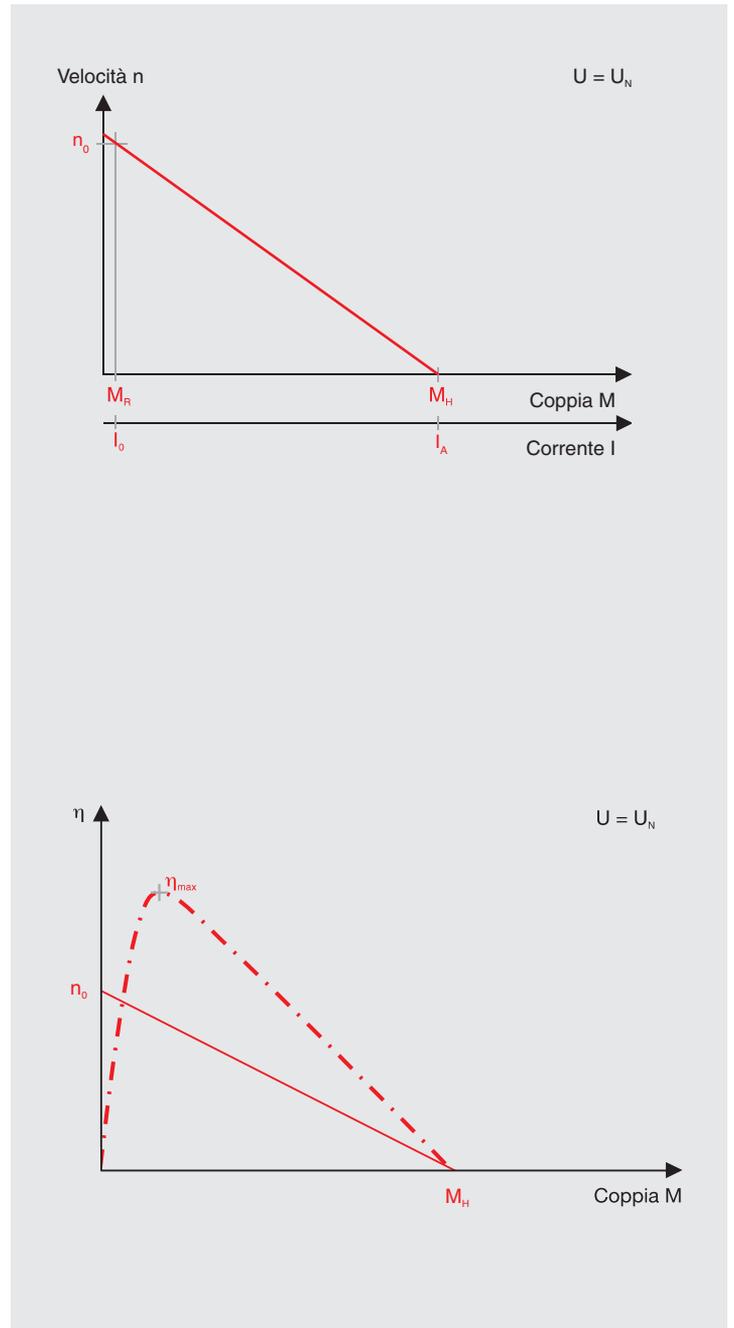
Si vede che, con tensione U costante e in considerazione della proporzionalità tra coppia e corrente, il rendimento cresce linearmente all'aumentare della velocità (al ridursi della coppia). Con coppie piccole le perdite di attrito crescono mentre il rendimento scende rapidamente verso lo zero. Il rendimento massimo (linea 9 delle schede motore) si calcola mediante la corrente di avviamento e la corrente a vuoto e dipende dalla tensione

$$\eta_{max} = \left(1 - \sqrt{\frac{I_0}{I_A}}\right)^2$$

Approssimativamente si può dire che il rendimento è massimo a circa un settimo della coppia di stallo. Ciò significa che il massimo rendimento e la massima potenza in uscita non si ottengono alla medesima coppia.

Valore di funzionamento nominale

Il valore di funzionamento nominale corrisponde ad una condizione ideale di funzionamento del motore che risulta dalla tensione nominale U_N (linea 1 della scheda motore) alla corrente nominale I_N (linea 6). Da questi due parametri si ottiene la coppia nominale M_N (linea 5) per questo punto ideale di funzionamento. Utilizzando poi il gradiente di velocità (linea 14), si ottiene la velocità nominale n_N (linea 4). La scelta della tensione nominale deriva da valutazioni di opportunità relative al valore della velocità a vuoto. La corrente nominale risulta dal carico termico massimo continuativo consentito del motore.



Grafici del motore, campi di funzionamento

Nel catalogo per ogni motore DC ed EC c'è un grafico che basandosi su un motore tipico riproduce a titolo esemplificativo i campi di funzionamento della serie di avvolgimenti.

Intervallo di funzionamento in continuo

I due criteri «coppia continua consentita» e «velocità limite» delimitano l'intervallo di funzionamento in continuo. Valori di funzionamento entro questo campo non sono termicamente critici e non portano di regola ad un'usura maggiore del sistema di commutazione.

Campo di funzionamento di breve durata

A causa della resistenza alla dissipazione termica il motore può essere sollecitato in modo continuo solo con la massima corrente continua consentita. Per breve tempo tuttavia sono ammessi valori di corrente (coppie) maggiori. Fin quando la temperatura dell'avvolgimento resta al di sotto del valore critico, l'avvolgimento stesso non subirà danni. Le fasi con correnti elevate devono essere limitate nel tempo. La misura di quanto possano durare questi sovraccarichi temporanei si ottiene dalla costante di tempo termica dell'avvolgimento (linea 19 delle schede motore). L'ordine di grandezza della durata dei sovraccarichi è di alcuni secondi per i motori più piccoli (6 mm fino a 13 mm di diametro) e fino a circa un minuto per i motori più grandi (60 mm fino a 90 mm di diametro). Il calcolo del tempo di sovraccarico esatto dipende fortemente dalla corrente del motore e dalla temperatura di avviamento del rotore.

Corrente continua consentita, coppia continua consentita

A causa della temperatura massima consentita nell'avvolgimento nel funzionamento in modo continuo non deve essere superata una corrente massima. Il calore prodotto deve potersi disperdere e non deve essere superata la temperatura massima del rotore. Ne deriva una corrente massima consentita I_{cont} (linea 22 delle schede motore) alla quale in condizioni standard (25°C di temperatura ambiente, nessuna dispersione di calore attraverso le flange, libera circolazione d'aria) viene raggiunta la temperatura massima nell'avvolgimento. Una corrente maggiore genera una temperatura eccessiva nell'avvolgimento. La corrente nominale viene scelta in modo da corrispondere a questa corrente continua massima consentita. E' fortemente dipendente dall'avvolgimento. Avvolgimenti con filo sottile hanno correnti nominali più basse rispetto agli avvolgimenti con filo spesso. Con avvolgimenti a impedenza molto bassa la capacità di assorbimento di corrente del sistema con spazzole può ridurre ulteriormente la corrente ammessa in continuo. Nei motori con spazzole in grafite all'aumentare della velocità aumentano molto le perdite di attrito. Nei motori EC all'aumentare della velocità le perdite di corrente parassite generano un riscaldamento supplementare. Ugualmente la corrente continua massima consentita si riduce all'aumentare della velocità. La coppia nominale corrispondente alla corrente nominale rimane praticamente costante all'interno della serie di avvolgimenti di una tipologia di motore e costituisce una grandezza caratteristica della tipologia di motore.

La velocità massima

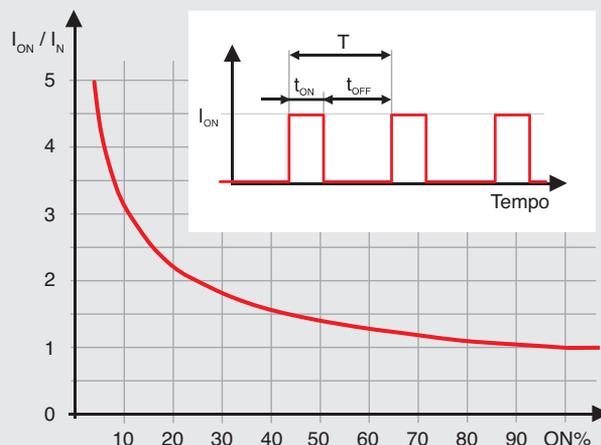
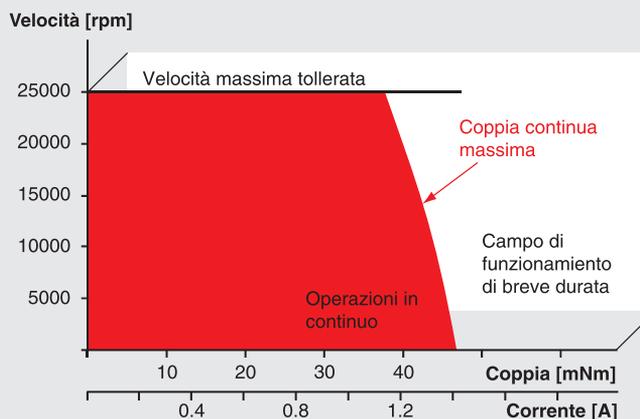
viene limitata in primo luogo dal sistema di commutazione. A velocità molto elevate il collettore e le spazzole subiscono maggiore usura. I motivi sono:

- Elevata usura meccanica per la lunga corsa effettuata dal collettore
- Elevata elettroerosione per la vibrazione delle spazzole e la formazione di scintille

Un ulteriore motivo per limitare la velocità è lo squilibrio meccanico residuo del rotore, che influenza la durata dei cuscinetti a sfere. Velocità più elevate della velocità limite n_{max} (linea 23) sono comunque possibili, ma riducono la durata attesa del motore. La velocità limite del motore EC viene calcolata in funzione della durata di vita dei cuscinetti a sfere (almeno 20000 ore) in condizioni di squilibrio residuo massimo consentito e carico massimo dei cuscinetti.

Temperatura massima consentita nell'avvolgimento

La corrente del motore comporta un riscaldamento dell'avvolgimento a causa della resistenza dell'avvolgimento. Affinché il motore non si surriscaldi di questo calore deve essere disperso nell'ambiente attraverso lo statore. L'avvolgimento autoportante è il punto termicamente critico. La temperatura massima del rotore non deve essere superata neppure per breve tempo. Essa è di 125°C (in casi isolati fino a 155°C) nel caso di motori con spazzole in grafite con carico di corrente tendenzialmente superiore. Motori a commutazione in metalli preziosi ammettono solo carichi di corrente ridotti, tali da non superare una temperatura del rotore di 85°C. Accorgimenti tecnici di montaggio, quali buona circolazione d'aria o lamiere di raffreddamento, possono far diminuire sensibilmente le temperature.



ON	Motore in funzione
OFF	Motore non in funzione
I_{ON}	Massima corrente di picco
I_N	Massima corrente continua (Linea 6)
t_{ON}	Tempo di ON [s], dovrebbe essere inferiore a τ_w (Linea 19)
T	Tempo del ciclo $t_{ON} + t_{OFF}$ [s]
$t_{ON\%}$	Ciclo di lavoro in percentuale del tempo T
	Il motore può essere sovraccaricato secondo la relazione I_{ON} / I_N per un periodo X % del ciclo totale di tempo.

$$I_{ON} = I_N \sqrt{\frac{T}{t_{ON}}}$$

Motori piatti maxon flat motor

I motori piatti a più poli maxon richiedono per un singolo giro un più alto numero di fasi di commutazione (6 x il numero di coppie di poli). Poichè hanno un'induttanza ai terminali più elevata rispetto ai motori con avvolgimento senza ferro, a velocità elevate, la corrente, durante gli intervalli di commutazione relativamente brevi, sarà meno efficiente, così la coppia risultante sarà relativamente più piccola. Parte della corrente viene rinvia allo stadio di potenza; ne risulta un comportamento che si discosta dal gradiente lineare ideale e che dipende dalla tensione e dalla velocità. L'inclinazione apparente del gradiente velocità/coppia è maggiore a velocità più elevate. Nel campo di funzionamento continuo dei motori piatti EC il gradiente raggiungibile può essere assimilato ad una retta tracciata tra la velocità a vuoto e il valore di funzionamento nominale. Per questo gradiente vale approssimativamente la seguente relazione:

$$\frac{\Delta n}{\Delta M} \approx \frac{n_0 - n_N}{M_N}$$

L'accelerazione

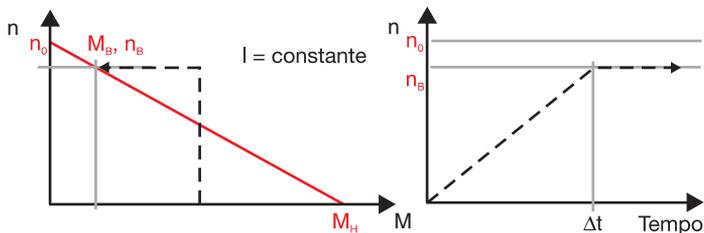
Secondo le condizioni elettriche adottate (alimentatore, controllo, batteria) si distinguono due diversi procedimenti d'avviamento principali:

- Avviamento con tensione costante (senza limite di corrente)
- Avviamento con corrente costante (con limite di corrente)

Un avviamento con corrente costante

Un limite di corrente significa sempre che il motore può fornire soltanto una coppia limitata. Nel diagramma velocità-coppia, a coppia costante la velocità cresce su una linea verticale. Anche l'accelerazione è costante, perciò i calcoli si semplificano.

Un avviamento con corrente costante si trova soprattutto in applicazioni con servoamplificatori, nei quali i momenti di accelerazione sono limitati dal picco di corrente dell'amplificatore.



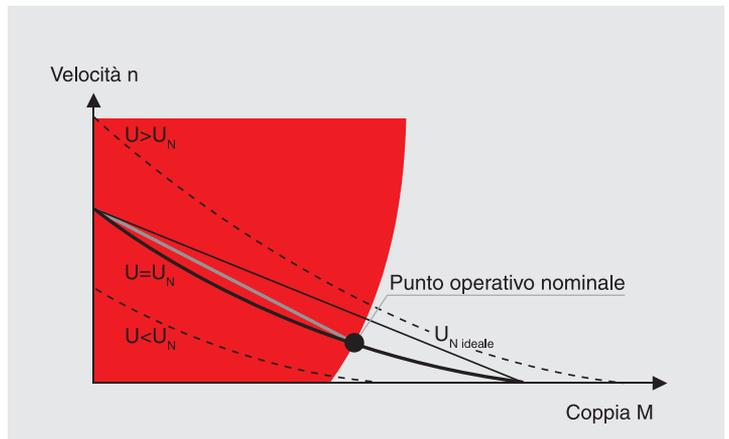
- Accelerazione angolare α (in rad / s^2) con corrente costante I o coppia costante M del motore con carico aggiunto J_L :

$$\alpha = 10^4 \cdot \frac{k_M \cdot I}{J_R + J_L} = 10^4 \cdot \frac{M}{J_R + J_L}$$

- Tempo massimo Δt (in ms) di variazione della velocità Δn del motore con carico aggiunto J_L :

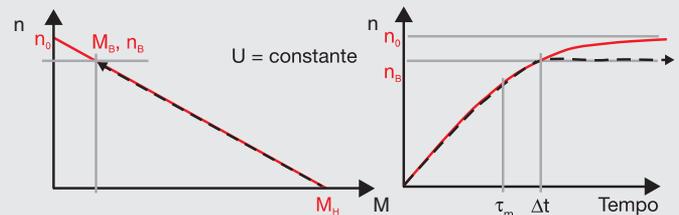
$$\Delta t = \frac{\pi}{300} \cdot \Delta n \cdot \frac{J_R + J_L}{k_M \cdot I}$$

(tutte le grandezze sono espresse nelle unità di misura indicate sul catalogo)



Avviamento con tensione costante ai morsetti

Qui la velocità cresce in funzione del momento d'inerzia seguendo il gradiente di velocità. La coppia maggiore, e quindi la massima accelerazione, si ha alla partenza. Quanto più elevata è la velocità del motore, tanto minore diventa l'accelerazione. La velocità aumenta più lentamente. Questa crescita con livellamento esponenziale viene descritta mediante la costante di tempo meccanica τ_m (linea 15 delle schede motore). Passato questo tempo il rotore ha raggiunto il 63% della velocità a vuoto ad albero libero. Il rotore raggiunge la velocità a vuoto dopo un tempo che è quasi il triplo.



- Costante di tempo meccanica τ_m (in ms) del motore senza carico:

$$\tau_m = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2}$$

- Costante di tempo meccanica τ_m' (in ms) del motore con carico aggiunto J_L :

$$\tau_m' = 100 \cdot \frac{J_R \cdot R}{k_M^2} \left(1 + \frac{J_L}{J_R} \right)$$

- Accelerazione angolare massima α_{max} (in rad / s^2) del motore senza carico:

$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R}$$

- Accelerazione angolare massima α_{max} (in rad / s^2) del motore con carico aggiunto J_L :

$$\alpha_{max} = 10^4 \cdot \frac{M_H}{J_R + J_L}$$

- Tempo massimo (in ms) per raggiungere la velocità di funzionamento a tensione costante (M_B, n_B):

$$\Delta t = \tau_m' \cdot \ln \left(\frac{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0}{\left(1 - \frac{M_B + M_R}{M_H} \right) \cdot n_0 - n_B} \right)$$

Tolleranze

In situazioni critiche non è possibile trascurare le tolleranze. Gli scostamenti possibili delle dimensioni meccaniche si rilevano dai disegni d'insieme. I dati del motore sono valori medi. Il diagramma a lato mostra gli effetti delle tolleranze sulla caratteristica delle curve. Essi vengono soprattutto causati da differenze nel campo magnetico e nella resistenza del conduttore, meno da influenze meccaniche. Per facilitare la comprensione nel diagramma le variazioni sono segnate in neretto e sono semplificate. È però chiaro che nell'effettivo campo di funzionamento del motore l'ampiezza delle tolleranze è inferiore che all'avviamento o nel funzionamento a vuoto. Le nostre schede computerizzate contengono tutti i valori dettagliati. E' chiaro però che nell'intervallo di funzionamento effettivo del motore l'ampiezza (modulo) della tolleranza varia ed è inferiore a quella che si ha all'avviamento o nel funzionamento a vuoto. Il programma di selezione maxon selection program contiene tutti i dettagli in merito.

Calibrazione

Con un'opportuna minore magnetizzazione dei motori è possibile ridurre l'ampiezza del campo delle tolleranze tra l'1 ed il 3%. Questa fascia di tolleranza più ristretta rimarrà sempre compresa nel campo di tolleranza standard.

Il comportamento termico

Semplificando, per il riscaldamento del motore sono determinanti le perdite per effetto Joule P_J dell'avvolgimento. Questa energia termica deve essere dispersa attraverso la superficie del motore. L'innalzamento ΔT_W della temperatura dell'avvolgimento T_W rispetto alla temperatura ambiente T_U deriva dalle perdite di calore P_J e le resistenze termiche R_{th1} e R_{th2} .

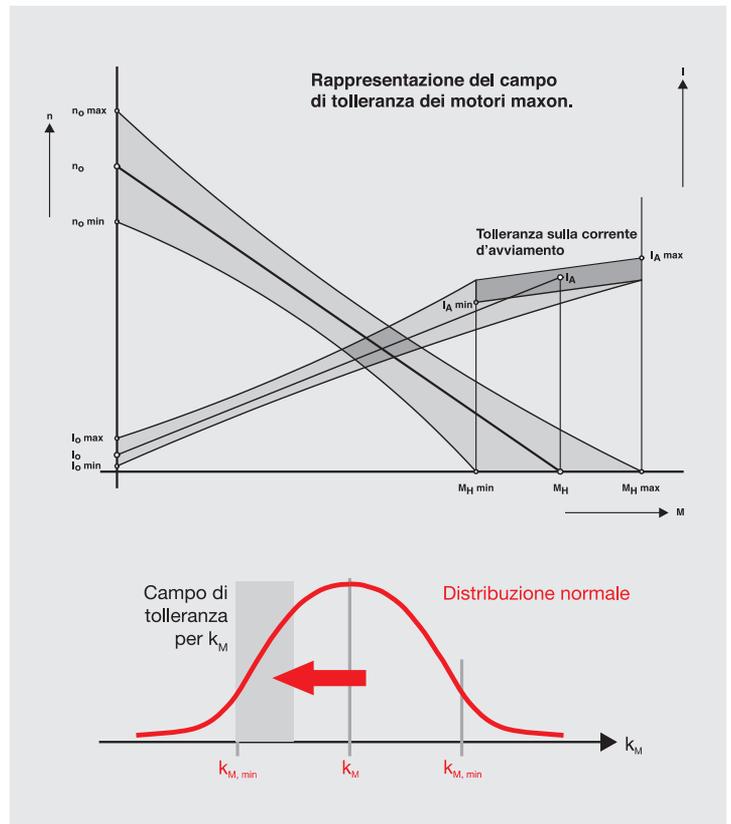
$$T_W - T_U = \Delta T_W = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_J$$

La resistenza termica R_{th1} contrassegna il passaggio di calore tra avvolgimento e statore (retro e magneti), mentre R_{th2} descrive il passaggio di calore dalla scatola all'ambiente. Il montaggio del motore su uno chassis in grado di trasmettere calore riduce sensibilmente la resistenza termica R_{th2} . Nelle schede motore i valori relativi alle resistenze termiche e la corrente continua consentita sono stati rilevati in serie di prove per le quali il motore era montato di testa su una piastra in materiale sintetico verticale. La resistenza termica nella specifica applicazione R_{th2} deve essere rilevata in condizioni ambientali e di montaggio reali. Nei motori con flangia metallica la resistenza termica R_{th2} si riduce fino al 80%, se il motore è collegato ad un supporto che è un buon conduttore di calore p.es. metallico.

Il riscaldamento dell'avvolgimento e dello statore avvengono in tempi diversi a causa delle diverse masse. Dopo la connessione si scalda dapprima l'avvolgimento (con costanti di tempo tra alcuni secondi e ca. mezzo minuto). Lo statore reagisce successivamente. La sua costante di tempo si trova, secondo la grandezza del motore, tra 1 e 30 minuti. Dopo si instaura un equilibrio termico. La differenza di temperatura tra l'avvolgimento e l'ambiente può essere determinata nel funzionamento in continuo mediante il valore della corrente I (oppure nel funzionamento ciclico mediante il valore effettivo della corrente $I = I_{RMS}$).

$$\Delta T_W = \frac{(R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}{1 - \alpha_{cu} \cdot (R_{th1} + R_{th2}) \cdot R \cdot I^2}$$

Ove il valore della resistenza elettrica R è a temperatura ambiente.



Influenza della temperatura

Un'elevata temperatura del motore influenza la resistenza dell'avvolgimento ed i parametri dei magneti.

La resistenza dell'avvolgimento aumenta in modo lineare secondo il coefficiente di resistenza del rame:

$$R_T = R_{25} \cdot (1 + \alpha_{cu} \cdot (T - 25^\circ\text{C}))$$

Esempio: una temperatura dell'avvolgimento di 75°C provoca un aumento della resistenza dell'avvolgimento quasi del 20%.

Il magnete si indebolisce a temperatura elevata. Secondo il tipo di materiale magnetico il calo è dall'1 al 10 % a 75°C.

L'importante conseguenza di una temperatura del motore elevata è che il gradiente di velocità risulta più inclinato e con ciò si riduce la coppia di stallo. La diversa coppia di stallo può essere calcolata in prima approssimazione mediante la tensione e la maggiore resistenza dell'avvolgimento.

$$M_{HT} = k_M \cdot I_{AT} = k_M \cdot \frac{U}{R_T}$$

Scelta del motore

Prima di passare alla scelta del motore si devono definire le esigenze relative all'applicazione.

- A che velocità e con quali coppie si muove il carico?
- Quanto durano le varie fasi di carico?
- Che accelerazioni compaiono?
- Quanto sono elevati i momenti d'inerzia?

In molti casi il funzionamento è indiretto, vale a dire che avviene una trasformazione meccanica della potenza in uscita dal motore, mediante cinghie, riduttori, mandrini e simili. Le grandezze in gioco dunque devono essere ricalcolate all'albero del motore. I passi successivi per la definizione di un riduttore sono indicate di seguito.

Inoltre è necessario chiarire i presupposti dell'applicazione.

- Quale tensione massima è disponibile al motore?
- Che limiti ci sono riguardo alla corrente?

Nei motori alimentati a batteria o a celle solari la corrente e la tensione hanno forti limitazioni. Nel funzionamento mediante un servoamplificatore sovente la corrente massima dell'amplificatore rappresenta un limite importante.

Scelta del tipo di motore

La scelta del tipo di motore avviene sulla base delle coppie desiderate. Da un lato è necessario considerare il picco di coppia massimo M_{max} , dall'altro la coppia continua effettiva M_{RMS} . Il funzionamento continuo è caratterizzato da un solo valore di esercizio (M_B , n_B). Le tipologie di motore prese in considerazione devono avere una coppia nominale (= coppia continua massima) M_N superiore alla coppia di funzionamento M_B .

$$M_N > M_B$$

Nei cicli di lavoro, come il funzionamento start-stop, la coppia nominale del motore dev'essere maggiore della coppia di carico (media quadratica). Ciò evita un surriscaldamento del motore.

$$M_N > M_{RMS}$$

La coppia di stallo del motore scelto, in casi normali dovrebbe essere superiore al più elevato picco di coppia di carico.

$$M_H > M_{max}$$

Scelta dell'avvolgimento: requisiti elettronici

Nella scelta dell'avvolgimento occorre accertarsi che la tensione applicata direttamente sul motore sia sufficiente per raggiungere nei vari punti del ciclo la necessaria velocità.

Controllo ad anello aperto (open loop)

Nelle applicazioni con una sola velocità di funzionamento quest'ultima qualche volta deve essere raggiunta con una tensione fissa U . In tal modo si cerca l'avvolgimento il cui gradiente con tensione predeterminata passi per il punto di funzionamento. Il calcolo si basa sul fatto che tutti i motori della stessa tipologia praticamente presentano un gradiente con la stessa inclinazione. A partire dal valore di funzionamento (n_B , M_B) si può perciò calcolare una velocità a vuoto teorica $n_{0,theor}$.

$$n_{0,theor} = n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

Questa velocità a vuoto teorica deve essere raggiunta con la tensione U disponibile, e in tal modo definire la costante di velocità teorica $k_{n,theor}$.

$$k_{n,theor} = \frac{n_{0,theor}}{U}$$

L'avvolgimento la cui k_n è possibilmente vicina alla $k_{n,theor}$, data una certa tensione, sarà il più adatto. Una costante di velocità un po' più elevata produce una velocità leggermente maggiore, una costante di velocità più ridotta una inferiore. La variazione della tensione fa raggiungere alla velocità il valore desiderato, un principio usato anche dai servoamplificatori.

La corrente del motore I si calcola mediante la costante di coppia k_M dell'avvolgimento scelto e la coppia d'esercizio M_B .

$$I = \frac{M_B}{k_M}$$

Suggerimenti per la valutazione delle esigenze:

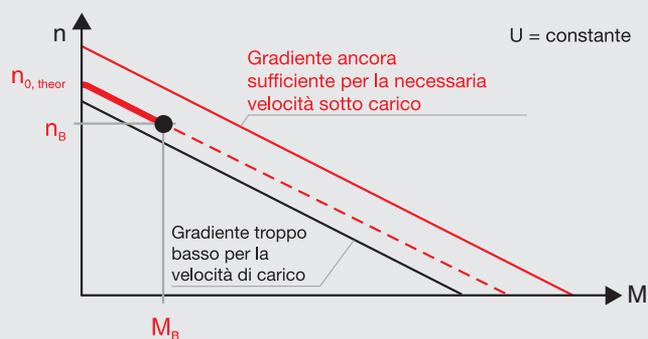
Frequentemente i parametri di carico (in special modo le coppie) non sono ancora definiti o si possono rilevare con difficoltà. In questi testate il vostro apparecchio con un motore dimensionato con valori approssimati. Variate la tensione finché vengono raggiunte le condizioni di funzionamento desiderate. Misurate tensione e corrente. Con queste indicazioni ed il codice del motore utilizzato i nostri ingegneri possono sovente dare indicazioni sul motore più indicato per la vostra applicazione.

Altri criteri di ottimizzazione sono per esempio:

- La massa da accelerare (tipo, inerzia della massa)
- Tipo di funzionamento (continuo, ad intermittenza, ad inversione)
- Condizioni ambientali (temperatura, umidità dell'aria, medie)
- Alimentazione (batterie, rete)

Nella scelta del tipo di motore hanno un ruolo importante anche altri parametri.

- Quale può essere la lunghezza massima inclusi il riduttore e l'encoder?
- Quale diametro?
- Quale durata si richiede al motore e che sistema di commutazione si vuole usare?
- Commutazione con metalli preziosi per il funzionamento continuo con correnti basse (regola fondamentale per la durata massima: fino a ca. 50% di I_n)
- Commutazione con grafite per elevate correnti continue (regola fondamentale: 50% fino a ca. 75% di I_n) e frequenti picchi di corrente (funzionamento start-stop, ad inversione).
- Commutazione elettronica per velocità e durate massime.
- Qual è la dimensione delle forze sull'albero, si devono usare cuscinetti a sfere o sono sufficienti le più economiche bronzine sinterizzate?

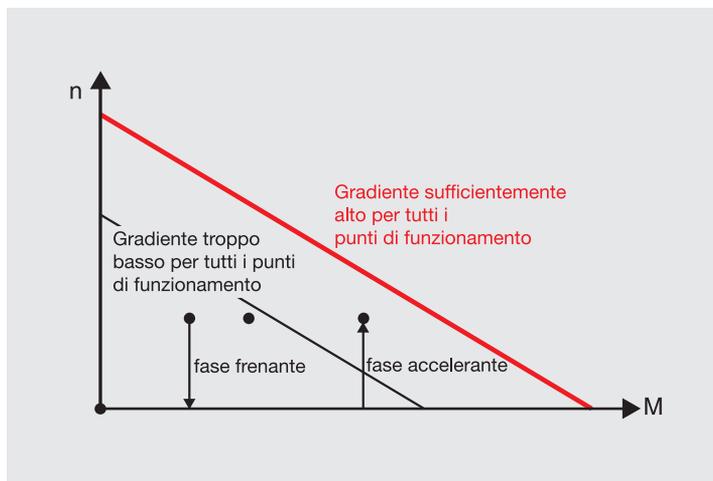


Servocontrolli ad anello chiuso (closed loop)

Nei cicli di lavoro tutti i punti di funzionamento devono trovarsi al di sotto del gradiente a tensione massima U_{max} . Ciò significa che per tutti i punti di funzionamento (n_B, M_B) deve valere la formula matematica:

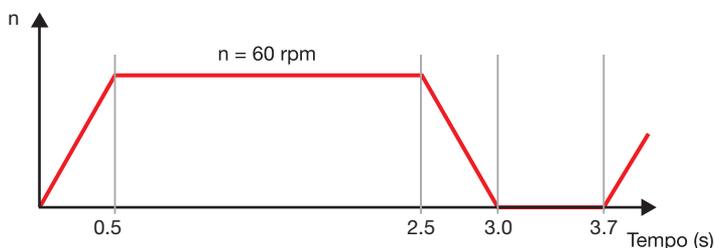
$$k_n \cdot U_{max} = n_0 > n_B + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_B$$

Nell'impiego di servoamplificatori sovente si perdono nei transistor di potenza alcuni Volt di tensione, così la tensione effettiva sul motore risulta ridotta di quel valore. Di questo si deve tenere conto nella determinazione della tensione di alimentazione massima U_{max} . Si consiglia di comprendere una riserva di regolazione di ca. 20% in modo che la regolazione sia consentita anche con sfavorevoli tolleranze di motore, carico, amplificatore e tensione di alimentazione. Infine si determinano il carico di corrente medio ed il picco di corrente e ci si assicura che il servoamplificatore scelto possa fornire queste correnti. In ogni caso si deve scegliere un avvolgimento a più alta resistenza in modo che le correnti si riducano. Comunque poi aumenta la tensione richiesta.



Esempio per la scelta del motore e del riduttore

Un azionamento si deve muovere in modo ciclico secondo questo diagramma di velocità.



L'inerzia del carico J_L da accelerare sia di 130 000 gcm². La coppia di attrito costante sia 300 mNm. Il motore deve essere azionato da un servoamplificatore lineare su 4-Q maxon (LSC). L'impianto mette a disposizione al massimo 5 A e 24 V.

Calcolo dei dati di carico

La coppia necessaria per l'accelerazione e per la frenatura si calcola come segue (si tralasci l'inerzia del motore e del riduttore)

$$M_\alpha = J_L \cdot \alpha = J_L \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t} = 0.013 \cdot \frac{\pi}{30} \cdot \frac{60}{0.5} = 0.163 \text{ Nm} = 163 \text{ mNm}$$

Insieme alla coppia di attrito risultano così le seguenti coppie per le diverse fasi di movimento:

- Fase di accelerazione (durata 0.5 s) 463 mNm
- Velocità costante (durata 2 s) 300 mNm
- Frenata (L'attrito frena inoltre 300 mNm) (durata 0.5 s) 137 mNm
- Fermo (durata 0.7 s) 0 mNm

Il picco di coppia si presenta durante l'accelerazione. La coppia RMS di tutto il ciclo di lavoro è

$$M_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{tot}} (t_1 M_1^2 + t_2 M_2^2 + t_3 M_3^2 + t_4 M_4^2)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{3.7} (0.5 \cdot 463^2 + 2 \cdot 300^2 + 0.5 \cdot 137^2 + 0.7 \cdot 0^2)} \approx 280 \text{ mNm}$$

La velocità è massima (60 rpm) al termine della fase di accelerazione con coppia massima (463 mNm). Dunque la potenza meccanica massima è

$$P_{max} = M_{max} \cdot n_{max} \cdot \frac{\pi}{30} = 0.46 \cdot 60 \cdot \frac{\pi}{30} \approx 2.9 \text{ W}$$

Valori fisici e rispettive unità di misura

		SI	Catalogo
i	Rapporto di riduzione*		
I	Corrente del motore	A	A, mA
I_A	Corrente di avviamento*	A	A, mA
I_0	Corrente a vuoto*	A	mA
I_{RMS}	Corrente RMS	A	A, mA
I_{cont}	Corrente continua consentita*	A	A, mA
J_R	Momento d'inerzia del rotore*	kgm ²	gcm ²
J_L	Momento d'inerzia del carico	kgm ²	gcm ²
k_M	Costante di coppia*	Nm/A	mNm/A
k_n	Costante di velocità*		rpm/V
M	Coppia (del motore)	Nm	mNm
M_B	Coppia d'esercizio	Nm	mNm
M_H	Coppia di stallo*	Nm	mNm
M_{mot}	Coppia del motore	Nm	mNm
M_R	Coppia di frizione	Nm	mNm
M_{RMS}	Coppia RMS	Nm	mNm
M_N	Coppia continua consentita*	Nm	mNm
$M_{N,G}$	Coppia massima del riduttore*	Nm	Nm
n	Velocità		rpm
n_B	Velocità di esercizio		rpm
n_{max}	Velocità limite del motore*		rpm
$n_{max,G}$	Velocità limite del riduttore*		rpm
n_{mot}	Velocità del motore		rpm
n_0	Velocità a vuoto*		rpm
P_{el}	Potenza elettrica	W	W
P_J	Perdita di potenza Joule	W	W
P_{mech}	Potenza meccanica	W	W
R	Resistenza ai terminali	Ω	Ω
R_{25}	Resistenza a 25°C*	Ω	Ω
R_T	Resistenza alla temperatura T	Ω	Ω
R_{th1}	Resistenza termica avvol.-contenitore*		K/W
R_{th2}	Tesist. termica contenitore-ambiente*		K/W
t	Tempo	s	s
T	Temperatura	K	°C
T_{max}	Temp. massima ammessa per l'avvol.*	K	°C
T_U	Temperatura ambiente	K	°C
T_W	Temperatura dell'avvolgimento	K	°C
U	Tensione del motore	V	V
U_{ind}	Tensione indotta (EMF)	V	V
U_{max}	Tensione di alimentazione massima	V	V
U_N	Tensione nominale*	V	V
α_{Cu}	Coefficiente di resistenza di Cu		
α_{max}	Accelerazione angolare massima		rad/s ²
$\Delta n / \Delta M$	Inclinazione del gradiente*		rpm/mNm
ΔT_W	Differenza di temp. avvol.-ambiente	K	K
Δt	Tempo massimo	s	ms
η	Rendimento (del motore)		%
η_G	Rendimento (del riduttore)*		%
η_{max}	Rendimento massimo*		%
τ_m	Costante di tempo meccanica*	s	ms
τ_S	Costante di tempo termica dello statore*	s	s
τ_W	Costante di tempo termica dell'avvol.*	s	s

(*indicato nelle schede motore o riduttore)

Scelta del riduttore

Si cerca un riduttore con una coppia continua massima di almeno 0.28 Nm ed una coppia ad intermittenza di almeno 0.46 Nm. Questa esigenza viene soddisfatta per esempio da un riduttore planetario del diametro 22 mm (versione in metallo). La velocità massima in ingresso nel riduttore pari a 6000 rpm consente un rapporto di riduzione massimo di

$$i_{\max} = \frac{n_{\max, G}}{n_B} = \frac{6000}{60} = 100 : 1$$

Scegliamo il riduttore a tre stadi con il rapporto di riduzione immediatamente inferiore pari a 84:1 (programma a magazzino). Il rendimento ammonta al massimo al 59%.

Scelta del tipo di motore

Velocità e coppia vengono ricalcolati all'albero

$$n_{\text{mot}} = i \cdot n_B = 84 \cdot 60 = 5040 \text{ rpm}$$

$$M_{\text{mot, RMS}} = \frac{M_{\text{RMS}}}{i \cdot \eta} = \frac{280}{84 \cdot 0.59} \approx 5.7 \text{ mNm}$$

$$M_{\text{mot, max}} = \frac{M_{\text{max}}}{i \cdot \eta} = \frac{460}{84 \cdot 0.59} = 9.3 \text{ mNm}$$

I motori che, secondo il sistema modulare maxon, possono essere accoppiati con il riduttore scelto sopra sono elencati **nella tabella che segue**. La tabella contiene solo motori con commutazione in grafite, che sono più indicati per il funzionamento start-stop.

La scelta cade su un A-max 22, 6 W, che presenta una coppia continua consentita sufficientemente grande. Il motore dovrebbe avere una riserva di coppia, per funzionare anche con un rendimento inferiore del riduttore. La coppia supplementare necessaria durante l'accelerazione può essere fornita senza problemi dal motore. Il picco di coppia di breve durata non è neanche il doppio della coppia continua consentita del motore.

Scelta dell'avvolgimento

La tipologia di motore A-max 22, 6 W, ha un'inclinazione media del gradiente pari a circa 480 rpm/mNm. È tuttavia da notare che i due avvolgimenti a più bassa resistenza presentano una maggiore inclinazione del gradiente. La velocità a vuoto desiderata si calcola come segue:

$$n_{0, \text{theor}} = n_{\max} + \frac{\Delta n}{\Delta M} M_{\max} = 5040 + 450 \cdot 9.3 \approx 9200 \text{ rpm}$$

Nel calcolo è naturalmente da inserire il punto di lavoro estremo (velocità massima e coppia massima), dal momento che il gradiente dell'avvolgimento deve trovarsi al di sopra di tutti i punti di lavoro nel diagramma velocità-coppia. Questa velocità a vuoto nominale deve essere raggiunta con la tensione massima $U = 19 \text{ V}$ prodotta dal comando (LSC) (caduta di tensione attraverso lo stadio di potenza dell'LSC 5 V), che definisce la costante di velocità minima $k_{n, \text{theor}}$ del motore.

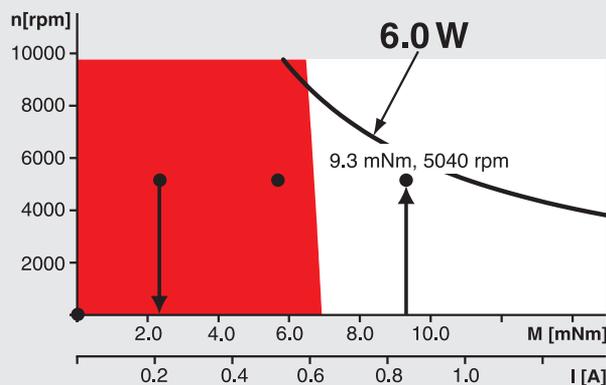
$$k_{n, \text{theor}} = \frac{n_{0, \text{theor}}}{U} = \frac{9200}{19} = 485 \frac{\text{min}^{-1}}{\text{V}}$$

Seguendo i calcoli, la scelta cade sul motore 110162, che corrisponde all'avvolgimento con la costante di velocità immediatamente più elevata (689 rpm /V) ed ha un albero passante per il montaggio dell'encoder. La costante di velocità dell'avvolgimento più alta rispetto al valore nominale significa che il motore con 19 V gira più velocemente del necessario, cosa che si può compensare con il controllo. Questa scelta assicura anche che esiste una riserva di regolazione della velocità superiore al 20%. Così anche tolleranze sfavorevoli non sono un problema. La costante di coppia di questo avvolgimento è pari a 13.9 mNm/A. La coppia massima corrisponde dunque ad un picco di corrente di

$$I_{\max} = \frac{M_{\max}}{k_M} + I_0 = \frac{9.3}{13.9} + 0.036 \approx 0.7 \text{ A}$$

Questa corrente è inferiore alla corrente massima (2 A) del controllo (LSC).

In tal modo si trova un motoriduttore che soddisfa i requisiti di velocità e coppia e può essere azionato con il controllo previsto.



Motore	M_N	Idoneità
A-max 22, 6 W	≈ 6.9 mNm	buono
A-max 19, 2.5 W	≈ 3.8 mNm	troppo debole
RE-max 21, 6 W	≈ 6.8 mNm	buono