

Progetto di Azionamenti ed Elettronica Industriale

Aniello Di Donato

Giugno 2024

Indice

1	Introduzione	2
2	Guida lineare	3
2.1	Specifiche di progetto	4
2.2	Scelta della guida lineare	4
2.3	Scelta del motore	6
3	Modello del motore	10
3.1	Amplificatore di potenza	11
3.2	Limitatore di corrente	12
3.3	Dinamo tachimetrica	14
4	Progetto del controllore	15
4.1	Regolatore PI	15
4.2	Progetto parametro K_p	15
4.3	Progetto parametro K_i	17
4.4	Correzione fenomeno Wind-up	20
4.5	Feed Forward	21
5	Risultati	22

1 Introduzione

Si vuole progettare un controllo di un motore elettrico in corrente continua con spazzole. Il motore è montato su una guida lineare commerciale motorizzabile. Dunque, lo scopo del progetto è realizzare un controllore che permetta di movimentare il carrello posto sulla guida, su cui è posta una massa di 5 Kg , da una posizione x ad una posizione y nel minor tempo possibile, e con velocità finale ω nulla. L'approccio scelto è di tipo "Asservimento a tempo minimo".

2 Guida lineare

Una guida lineare è un sistema strutturale autoportante in grado di trasformare un moto circolare generato da un motore in un moto lineare lungo un asse, così da produrre un movimento di spinta, tiro, sollevamento, abbassamento o inclinazione di un carico. Le guide lineari sono utilizzate in ambienti industriali, tipicamente nelle linee di produzione, per applicazioni di raccolta e posizionamento.

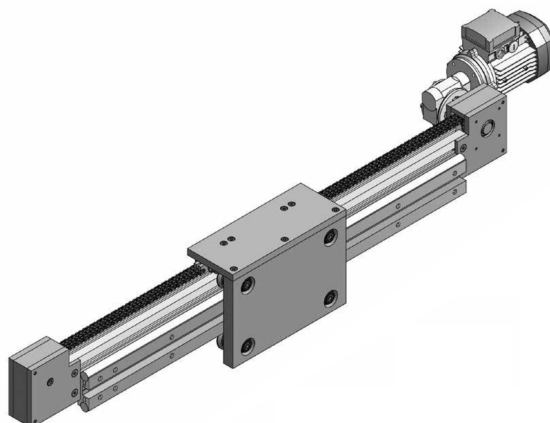


Figure 1: Disegno CAD di una guida lineare motorizzata.

Tipicamente, le guide lineari sono dotate di una movimentazione a cinghia dentata. La trasmissione a cinghia dentata è costituita da due pulegge applicate alle estremità del modulo e una cinghia dentata a contatto con queste. Il moto rotatorio prodotto dal motore applicato alla puleggia motrice, viene trasformato in moto lineare. In figura 2 è riportata la struttura di una cinghia dentata.

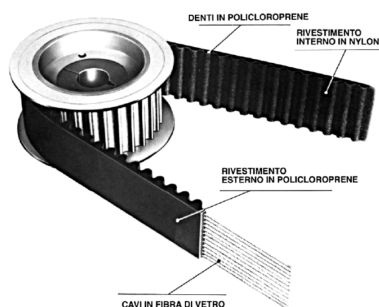


Figure 2: Struttura della cinghia dentata.

2.1 Specifiche di progetto

Si vuole spostare una massa posta sul carrello della guida da una posizione iniziale $x_0 = 0 \text{ m}$ ad una posizione finale $x_f = 5 \text{ m}$, con la massima accelerazione e velocità consentita dalla guida. Le specifiche di progetto nel dettaglio sono:

- velocità massima : $v_{max} = 1 \text{ m/s}$
- accelerazione massima : $a_{max} = 0.8 \text{ m/s}^2$
- massa totale da trasportare : $m = 5 \text{ Kg}$
- spostamento voluto : $l = 5 \text{ m}$

2.2 Scelta della guida lineare

La guida lineare utilizzata per questo progetto è sviluppata dall'azienda C.T.S, la quale offre numerose tipologie di guide distinte per: peso, lunghezza, velocità massima e massimo carico trasportabile. È stato scelto per l'elaborato il modello AK42. Pertanto, è stato necessario calcolare le forze che si sviluppano durante il movimento per verificare se la guida fosse adatta alle specifiche citate.

Calcolo delle Forze

- forza periferica F_u :

$$F_u = m \cdot a + m \cdot g + \mu \cdot m \cdot g$$

- momento di azionamento necessario M :

$$M = \frac{1}{2} \cdot D_0 \cdot F_u$$

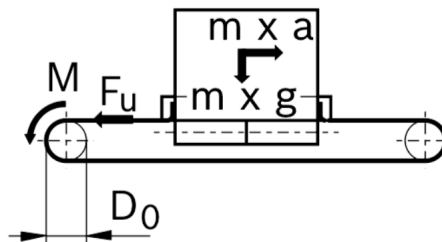


Figure 3: Schema delle forze in gioco.

dove :

- D_0 è il diametro della puleggia
- μ è il coefficiente di attrito delle guide definito dall'azienda

Sono stati estraplati dal datasheet fornito dall'azienda i parametri in Tabella

1

Modello	D_0 [mm]	μ	M_{cons}	$F_{u,cons}$
AK42	57.33	0.02	15	510

Table 1: Valori estratti dal datasheet della guida.

Quindi:

- *forza periferica F_u :*

$$F_u = m \cdot a + m \cdot g + \mu \cdot m \cdot g = 5 \cdot 0.8 + 5 \cdot 9.81 + 0.02 \cdot 5 \cdot 9.81 = 54.03 \text{ N}$$

- *momento di azionamento necessario M :*

$$M = \frac{1}{2} \cdot D_0 \cdot F_u = 0.5 \cdot 0.0573 \cdot 54.03 = 1.54 \text{ Nm}$$

Confrontando i valori ottenuti con quelli massimi consentiti dalla guida, la guida scelta è adatta alle specifiche di progetto.

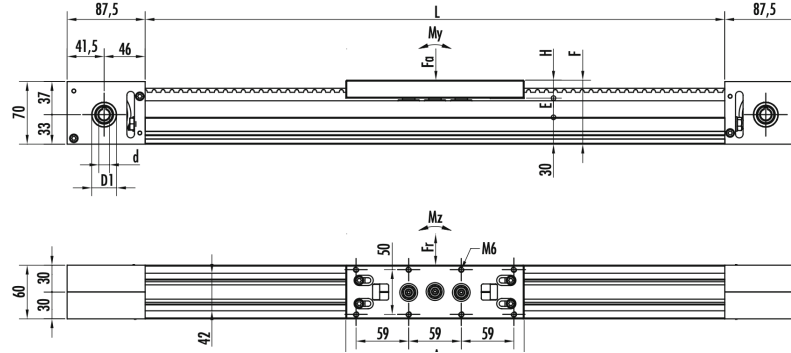


Figure 4: Disegno della guida.

2.3 Scelta del motore

Per il dimensionamento del motore sono stati ricavati i seguenti parametri:

- *forza generata durante la movimentazione del carrello F :*

$$F = m \cdot a + \mu \cdot m \cdot g = 5 \cdot 0.8 + 0.02 \cdot 5 \cdot 9.81 = 4.981 \text{ N}$$

- *coppia motrice fornita dal motore sotto carico C_m :*

$$C_m = R \cdot F = 0.02865 \cdot 4.981 = 0.1427 \text{ Nm}$$

- *velocità massima di rotazione del motore ω_{max} :*

$$\omega_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{1}{0.02865} = 34.9 \text{ rad/s} \simeq 335 \text{ rpm}$$

dove :

- R è il raggio della puleggia.

A partire da queste specifiche, si è scelto di utilizzare per questo progetto il motoriduttore a corrente continua con spazzole ‘ROK 311M’ con rapporto di riduzione 7. Un motoriduttore è un’unità compatta formata da un riduttore e da un motore elettrico. Il riduttore diminuisce la velocità di rotazione del motore e allo stesso tempo trasmette coppie proporzionalmente maggiori rispetto a quelle che potrebbe fornire il solo motore elettrico. Questa caratteristica è vantaggiosa per le specifiche richieste.

Di seguito viene riportato il datasheet del motore, utile per informazioni su parametri elettrici e meccanici:

ROK 311M

WATT Motore-motor 70	Nm Riduttore-gear 10
--	--

CARATTERISTICHE GENERALI - Performance characteristics													
MOTORE Motor		POTENZA - Power 70 W					VELOCITÀ - Speed 3000 RPM				COPPIA - Torque 0.22 Nm		
RAPPORTO RIDUZIONE Ratio	I :	7	10	12	15	18	24	30	38	55	75	100*	
VELOCITÀ USCITA Output speed	RPM	429	300	250	200	167	125	100	79	55	40	30*	
COPPIA NOMINALE Rated Torque	Nm	1.2	1.5	1.8	2.2	2.6	2.5	3.1	3.8	4.8	4.3	6.2	
COPPIA MASSIMA Max. Torque	Nm-max.	(A) (B)	9.7 14.5	9.5 14.2	12.1 18	10.7 16	10.3 15.5	9.2 13.8	10.3 15.4	11.4 17.1	10.4 15.6	7.3 12	7.4 12
TENSIONE NOMINALE Rated Voltage	VOLT	48	24				(2)						
CORRENTE NOMINALE Rated Current	AMP	1.95	3.65										
RESIST. ARMATURA Armature resistance	Ohm	2.33	0.85										
INDUTT. ARMATURA Armature inductance	mH	4	1.34										
COST. TENSIONE Voltage constant	Ke V/Krpm	13.2	7.3										
COST. TEMPO Elett. Elect. time constant	Te ms	1.7	1.58										
COST. TEMPO MECC. Mech. time constant	Tm ms	6.5	6										
COST. TEMPO TERMICO Thermal time constant	Tt min	25	25										

* Solo su richiesta only by request (2) Altre tensioni a richiesta-other voltages by request (A) Coppia massima riduttore continuativa (A) Max. gear continuous torque
(B) Massima coppia impulsiva riduttore (B) Max. gear pulse torque

DATI MECCANICI - Mechanical data		
CARICO RADIALE Radial Load	N	120
CARICO ASSIALE Axial Load	N	80
PESO MOTORIDUTTORE Gearmotor weight	Kg	2
LUBRIFICAZIONE Lubrication	GRASSO Long life grease	
CORONA Worm	BRONZO Bronze	
VITE Screw	ACCIAIO Steel	

DATI ELETTRICI - Winding data		
CLASSE ISOLAMENTO Insulation class		F
FATTORE DI SERVIZIO Duty cycle		S1
FATTORE DI FORMA Form Factor	FF	1
TEMPERATURA AMBIENTE Room temperature	T rif °C	40°
GRADO DI PROTEZIONE Protection	IP	54
INERZIA ROTORE Rotor inertia	Jm Kgcm²	0.47

Figure 5: Datasheet motore

Il motore ci consente di soddisfare le specifiche, avendo:

- potenza nominale $P_{nom} = 70 \text{ W}$
- velocità nominale $n_{nom} = 429 \text{ rpm}$
- coppia nominale $C_{nom} = 1.2 \text{ Nm}$

Inoltre, dal datasheet ricaviamo le seguenti informazioni:

R_a [Ω]	L_a [H]	k_v	k_t	J_m [Kg/m^2]	I_{nom} [A]	T_s [s]
2.33	$4e^{-3}$	0.1261	0.1261	$0.47e^{-4}$	1.95	1.25

Table 2: Valori estratti dal datasheet del motore.

A partire dalle equazioni statiche del motore, si possono poi determinare i valori nominali delle grandezze elettriche.

Lo schema di calcolo per la determinazione del modello del motore è:

- *velocità massima di rotazione del motore dato il rapporto di riduzione*

$$\omega_{max} = \frac{V_{max}}{R} \cdot 7 = 34.9 \text{ rad/s} \cdot 7 = 244.33 \text{ rad/s} \simeq 2335 \text{ rpm}$$

- *coppia massima che deve essere fornita dal motore, considerando anche l'inerzia del rotore:*

$$C_{tot} = C_m + J_m \cdot \frac{\omega_{max}}{T_s} = 0.1427 + 0.47e^{-4} \cdot \frac{244.33}{1.25} = 0.1519 \text{ Nm}$$

- *inerzia equivalente che il motore vede collegata al suo albero + inerzia del rotore J_{tot} :*

$$C_{tot} = J_{tot} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{max}}{T_s} \implies J_{tot} = \frac{C_m \cdot T_s}{\omega_{max}} = 7.77e^{-4} \text{ Kg} \cdot m$$

- *corrente di armatura I_{amax} :*

$$I_{amax} = \frac{C_{tot}}{k_t} = \frac{0.1519}{0.1261} = 1.2045 \text{ A}$$

- *forza contro-elettromotrice E_g :*

$$E_g = k_v \cdot \omega_{max} = 0.1261 \cdot 244.33 = 30.8 \text{ V}$$

- *tensione di alimentazione V_a :*

$$V_a = E_g + R_a \cdot I_a = 30.8 + 2.33 \cdot 1.2045 = 33.606 \text{ V}$$

Si costruisce il bilancio delle potenze:

$$P_{tot} = P_{att} + P_{dissRa} + P_{mecc}$$

- *potenza meccanica necessaria a soddisfare le specifiche in condizioni massime di lavoro considerando anche l'inerzia del motore P_{mecc} :*

$$P_{mecc} = C_{tot} \cdot \omega_{max} = 0.1519 \cdot 244.33 = 37.11 \text{ W}$$

- *potenza elettrica totale che deve essere fornita P_{tot} :*

$$P_{tot} = V_a \cdot I_{amax} = 33.606 \cdot 1.2045 = 40.5 \text{ W}$$

- *parte della potenza elettrica in ingresso viene dissipata per effetto Joule sulla resistenza d'armatura:*

$$P_{dissRa} = R_a \cdot I_a^2 = 2.33 \cdot 1.2045 = 2.8 \text{ W}$$

- *parte della potenza elettrica in ingresso viene dissipata per attrito viscoso:*

$$P_{att} = P_{tot} - P_{dissRa} - P_{mecc} = 40.5 - 2.8 - 37.11 = 0.6 \text{ W}$$

- *è possibile poi ricavare il coefficiente di attrito β :*

$$P_{att} = \beta \cdot \omega^2 \implies \beta = \frac{P_{att}}{\omega^2} = 1.0051e^{-5} \text{ Nms/rad}$$

3 Modello del motore

Dai parametri ricavati nella sezione precedente, è stato possibile determinare le funzioni di trasferimento relative al dominio elettrico e meccanico:

$$P_{elet}(s) = \frac{1}{L_a s + R_a}$$

$$P_{mec}(s) = \frac{1}{J_{tot} s + \beta}$$

Ed il modello del motore, implementato successivamente in Simulink, riportato in figura 6

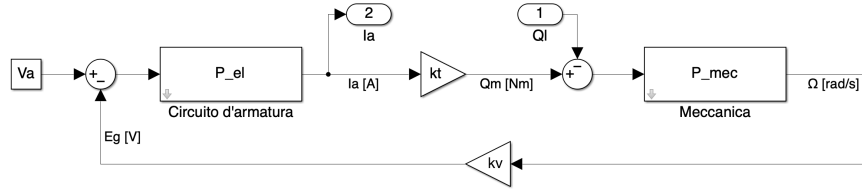


Figure 6: Modello motore in corrente continua in Simulink

Scegliendo i parametri calcolati in precedenza, eseguiamo la simulazione del modello applicando una tensione nominale $V_a = 33.6 \text{ V}$. In figura 7-8 sono riportati gli andamenti della velocità angolare ω , della coppia motrice Q_m e della corrente di armatura I_a .

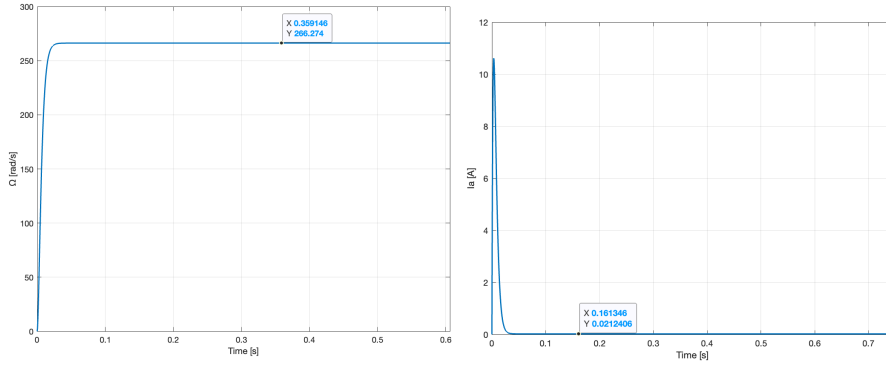


Figure 7: Andamenti di velocità angolare e corrente di armatura

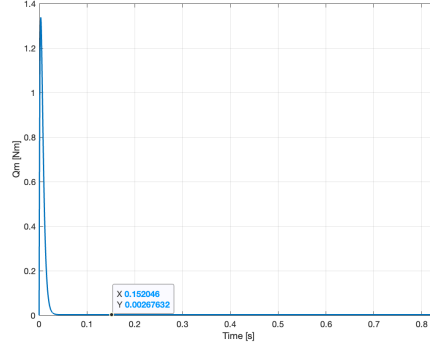


Figure 8: Andamento coppia

Facendo riferimento alle equazioni statiche del motore in condizioni di regime, e assumendo coppia esterna nulla, calcoliamo le grandezze relative al motore e verifichiamo se i risultati della simulazione sono coerenti:

$$\omega = \frac{v_a}{k_v} = \frac{33.606}{0.1260} = 266.7 \text{ rad/s}$$

$$Q_m = \beta \cdot \omega = 1.0051e^{-5} \cdot 266.7 = 0.0027 \text{ Nm}$$

$$Q_m = k_t \cdot I_a \implies I_a = \frac{Q_m}{k_t} = \frac{0.0025}{0.1260} = 0.02 \text{ A}$$

Si osserva circa la coerenza delle grandezze simulate con i calcoli effettuati.

3.1 Amplificatore di potenza

In ingresso al sistema motore va applicata la tensione d'armatura V_a . Questa è di solito fornita da un amplificatore di potenza che non è mai di tipo lineare, ma è costituito da un convertitore DC/DC. Si ipotizza lineare il comportamento dell'amplificatore di potenza. Dunque, è stato modellato con un guadagno lineare. È stato progettato tale guadagno K_{amp} supponendo che il segnale di attuazione posto in ingresso all'amplificatore di potenza assuma un valore massimo di 5 V, e di poter forzare il motore con tensioni di valore massimo pari al 20% in più della tensione nominale $V_a = 33.6 \text{ V}$;

$$V_{lim} = V_a + 20\%V_a = 40.32 \text{ V}$$

In questo modo è stato possibile far lavorare il motore al di fuori della propria regione di sicurezza per brevi intervalli di tempo, ottenendo così prestazioni dinamiche più spinte. Lo schema dell'amplificatore di potenza realizzato su SIMULINK è riportato in Figura 9, dove in serie al guadagno è posto un blocco di saturazione:

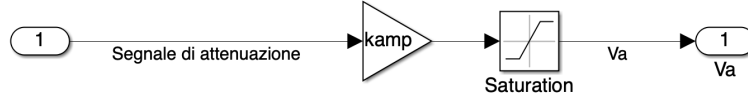


Figure 9: Schema Simulink amplificatore

dove :

$$K_{amp} = \frac{V_{lim}}{5} = 8.064$$

3.2 Limitatore di corrente

Si è introdotto un sistema necessario a limitare la corrente di armatura per ovviare al picco di corrente all'avvio del motore, il cui valore supera ben oltre il valore nominale. Nei primi istanti di funzionamento, dato che il motore parte da fermo, la *forza contro-elettromotrice* $E_g = 0 V$. Mentre, al circuito d'armatura è applicata una tensione massima pari a V_a ; di conseguenza, si avrà una corrente di armatura all'avvio superiore a quella di funzionamento nominale. In queste condizioni si danneggia il motore. Per questo motivo è stato necessario dotare il sistema amplificatore-motore di un limitatore di corrente. Lo schema del limitatore di corrente realizzato in SIMULINK è riportato in Figura 10

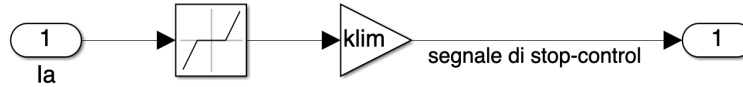


Figure 10: Schema Simulink limitatore di corrente

Il limitatore è costituito da un blocco soglia e da un guadagno. Il blocco soglia fornisce una uscita nulla per valori di ingresso interni all'intervallo di valori compresi tra le due soglie. Se l'ingresso assume valori al di fuori delle soglie, il blocco fornisce in uscita la quantità fuori soglia con guadagno unitario. Le soglie sono state fissate al valore della corrente di armatura nominale $I_{amax} = 1.95 A$, consentito dal motore. Mentre il guadagno è stato scelto in modo tale che, quando la corrente nel circuito di armatura supera del 20% il valore della soglia, la tensione in uscita dal trasduttore zittisce completamente il segnale di attuazione in modo tale che il segnale in ingresso all'amplificatore sia nullo.

$$K_{lim} = \frac{5}{20\%I_{amax}}$$

In Figura 11-12-13 sono riportati gli andamenti delle grandezze relative al motore con l'aggiunta del limitatore di corrente e amplificatore di potenza:

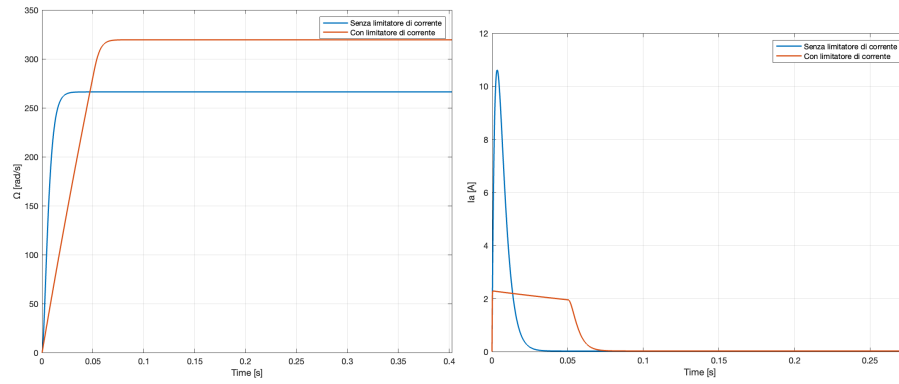


Figure 11: Andamento di velocità angolare e corrente di armatura con limitatore e amplificatore

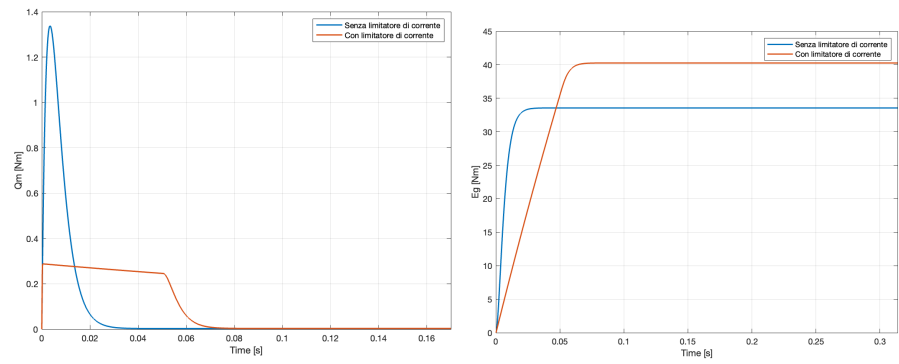


Figure 12: Andamento di coppia ed E_g con limitatore e amplificatore

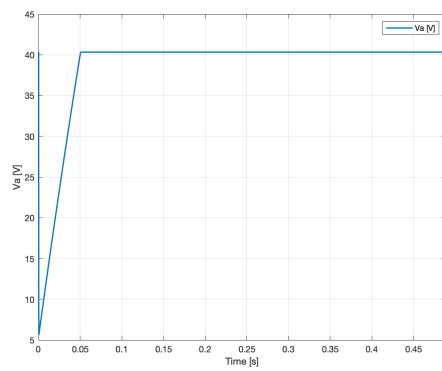


Figure 13: Andamento di V_a con limitatore e amplificatore

3.3 Dinamo tachimetrica

L'obiettivo del progetto è controllare la velocità del motore variando opportunamente la tensione di armatura V_a , in modo tale che il motore possa funzionare con la velocità di rotazione desiderata indipendentemente dalla coppia esterna. Pertanto, è necessario misurare la velocità di rotazione del motore e convertirla in una tensione. A tale scopo viene utilizzato come sensore di velocità la dinamo tachimetrica rumorosa:

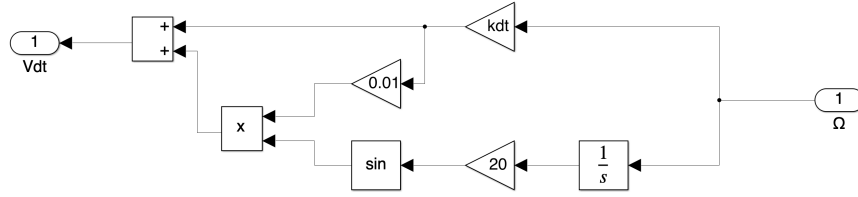


Figure 14: Schema Simulink dinamo tachimetrica rumorosa

Il guadagno di trasduzione K_{dt} del sensore è stato calcolato a partire dal riferimento di tensione corrispondente alla velocità nominale ω_{max} del motore:

$$K_{dt} = \frac{r_v}{\omega_{max}} = \frac{3.823}{244.33} = 0.0156 \text{ Vs/rad}$$

Per questo caso di studio si lavora con un numero di lamelle presenti sul collettore della dinamo $N = 20$.

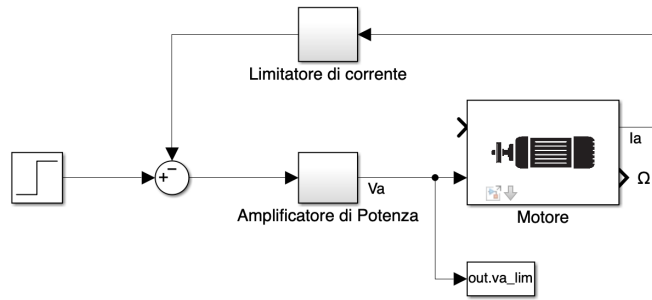


Figure 15: Schema Simulink del modello del motore con amplificatore di potenza, limitatore di corrente e dinamo tachimetrica

4 Progetto del controllore

L'obiettivo di questo lavoro è controllare la velocità del motore, al fine di portare il carrello posto sulla guida lineare nella posizione desiderata, con velocità ω nulla, nel minor tempo possibile. Assumendo la velocità massima v_{max} , l'accelerazione massima a_{max} e la massa da trasportare m , definite nella sezione 2.1. Tale approccio prende il nome di "Asservimento a tempo minimo".

4.1 Regolatore PI

Per il controllo di velocità del motore è stato utilizzato il regolatore PI, che rende il sistema stabile, permettendo di non amplificare eccessivamente il rumore al fine di raggiungere la velocità desiderata con errore a regime nullo, essendo astatico rispetto al gradino. La funzione di trasferimento del controllore PI è riportata di seguito:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Per la scelta dei parametri K_p e K_i del regolatore PI sono state imposte delle specifiche:

- Ripple della corrente di armatura I_a intorno al 5% del valore nominale.
 $\Rightarrow ripple = 5\%I_{amax} \simeq 0.1 \text{ A}$
- Sovraelongazione percentuale massima $S_{max}\%$ del 20% della risposta del sistema rispetto ad una variazione infinitesima del riferimento a gradino in ingresso.

4.2 Progetto parametro K_p

Per la scelta del valore di K_p , sono state eseguite diverse simulazioni, con diversi valori di K_p , con azione integrale scollegata, coppia esterna di disturbo nulla e riferimento pari al 90% della velocità nominale. Il vincolo su K_p è legato alla specifica sul ripple di corrente. In Tabella 3 è riportato il valore del ripple di corrente di armatura I_a al variare di K_p :

K_p	Ripple [A]
3	0.08
3.5	0.108
4	0.12
4.5	0.14
5	0.155
5.5	0.17

Table 3: Ripple di corrente al variare di K_p .

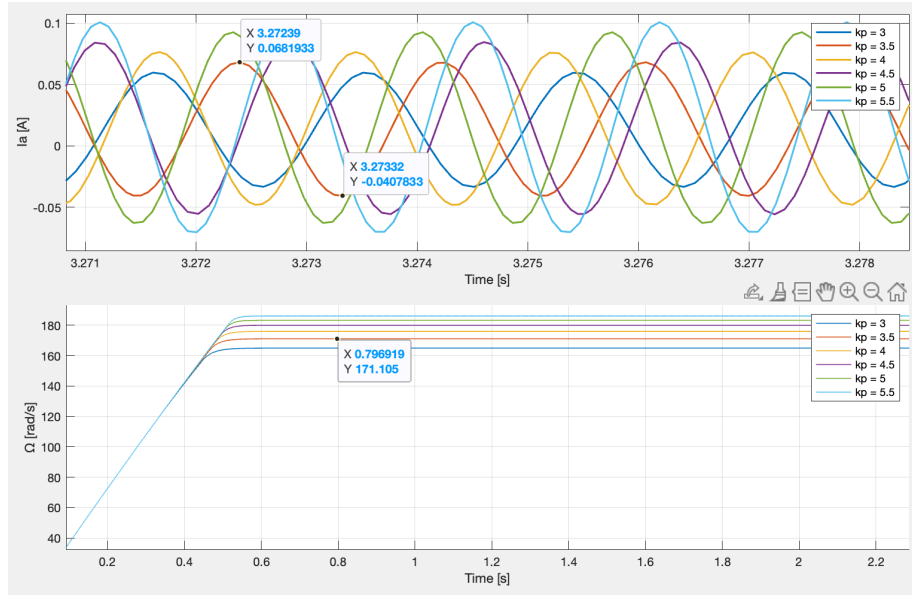


Figure 16: Andamento della corrente di armatura al variare di K_p

Si è scelto $K_p = 3.5$ per soddisfare la prima specifica. In figura è riportato l'andamento della corrente di armatura

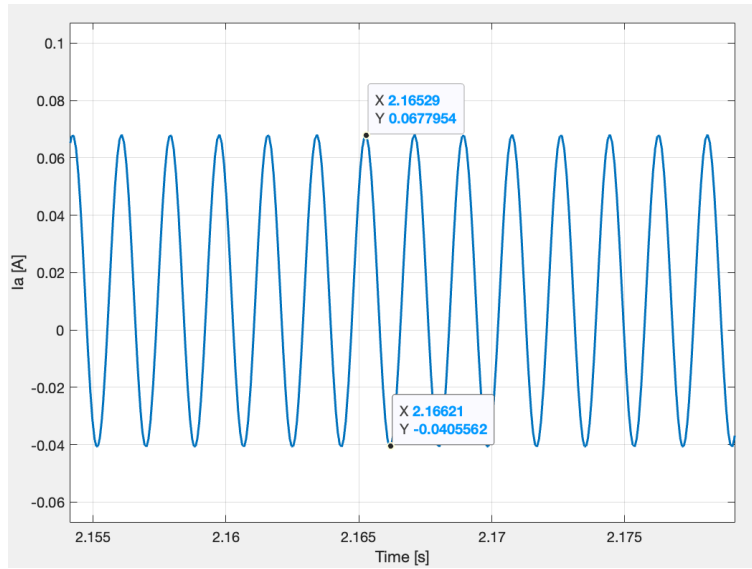


Figure 17: Andamento della corrente di armatura con K_p scelto

4.3 Progetto parametro K_i

Il vincolo sul K_i è legato alla sovraelongazione della velocità angolare. Per la scelta di tale parametro, è stato fissato K_p e sono stati effettuati test per piccole variazioni. È stato perturbato il sistema, in condizioni di regime, con gradino di ampiezza unitaria rispetto al riferimento di velocità pari al 90% del riferimento ottenuto in fase di progetto, e calcolato il valore della sovraelongazione percentuale $S\%$ al variare di K_i . In Tabella 4 è riportato il valore della sovraelongazione percentuale $S\%$ al variare di K_i :

K_i	S [%]
50	5
61	8
72	10
83	13
95	15
105	17
117	19
127	21
138	23
150	25

Table 4: Sovraelongazione percentuale al variare di K_i .

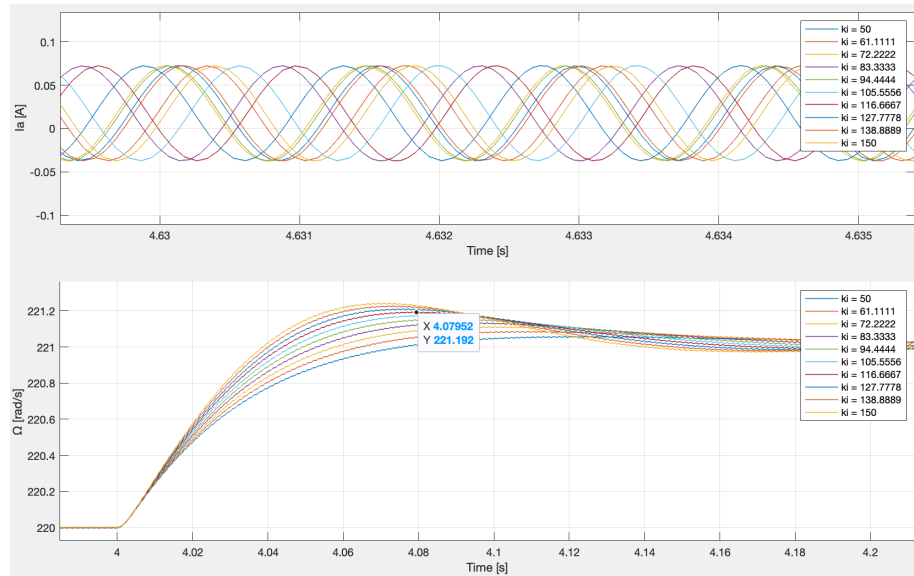


Figure 18: Andamento della velocità angolare al variare di K_i

Si è scelto $K_i = 120$ per soddisfare la seconda specifica. In figura 19 è riportato l'andamento della velocità angolare.

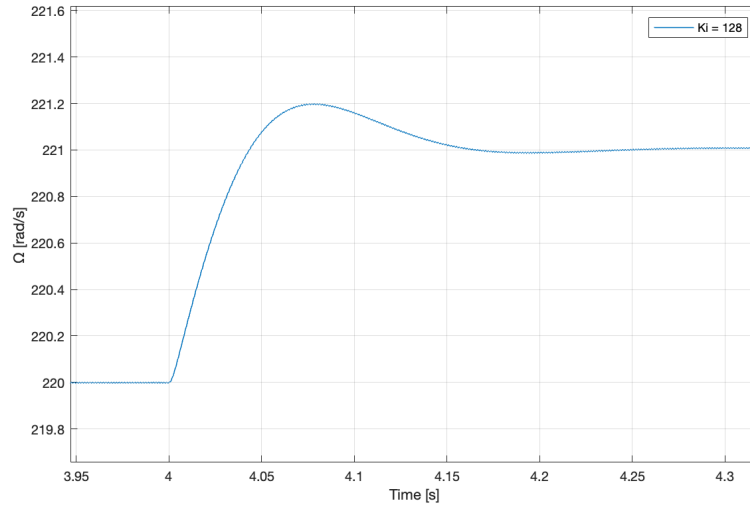


Figure 19: Andamento della velocità angolare con $K_i = 120$

Di seguito è riportato il diagramma di Bode della funzione di trasferimento a ciclo chiuso del motore con controllo in retroazione:

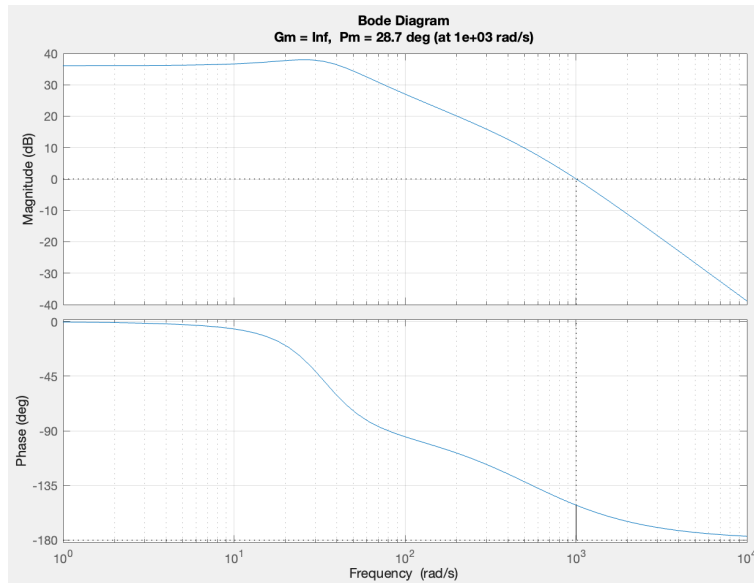


Figure 20: Diagramma di Bode del sistema a ciclo chiuso

E il diagramma di Nichols. Si nota che la curva della risposta in frequenza sfiora i 6dB, confermando quindi la sovraelongazione desiderata in uscita del circa 20%.

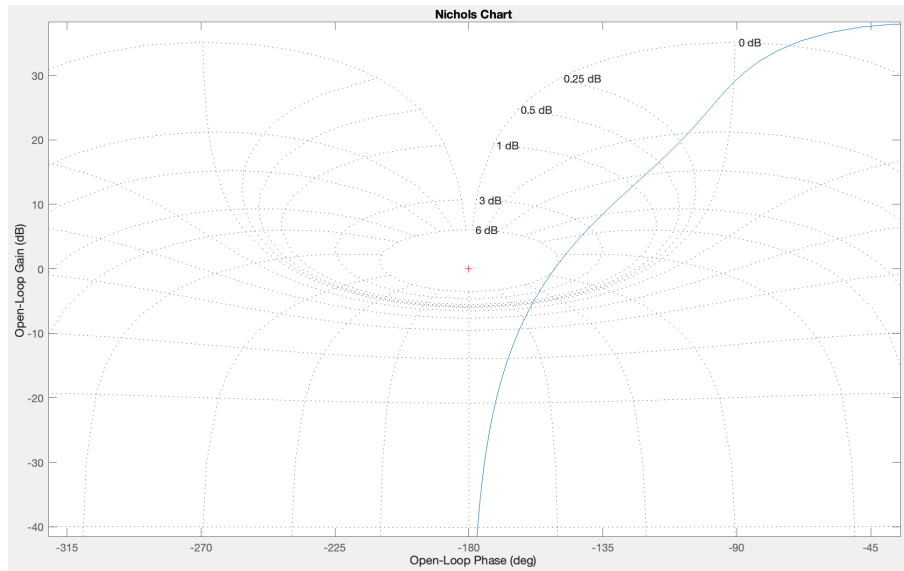


Figure 21: Diagramma di Nichols del sistema a ciclo chiuso

4.4 Correzione fenomeno Wind-up

Un problema rilevante del controllore PI è il fenomeno del Wind-Up. Data la presenza dell'integratore, se l'errore si mantiene sempre dello stesso segno, la rampa in uscita dall'integratore cresce sempre di più e quando il segno cambia, c'è bisogno di più tempo per la sua scarica.

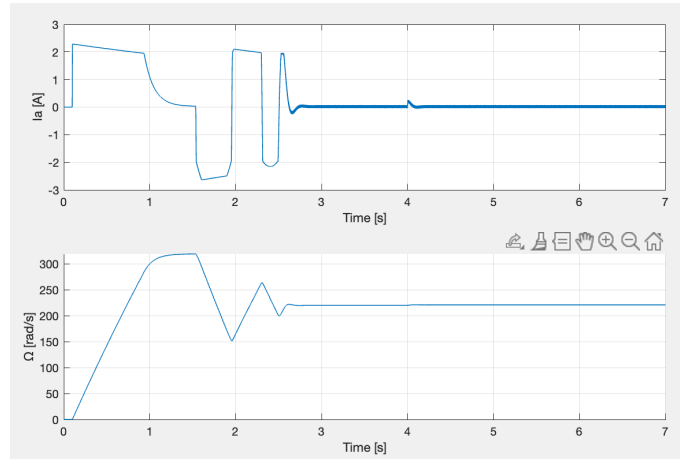


Figure 22: Andamento della corrente di armatura e velocità angolare con fenomeno Wind-up

È stato corretto inserendo la saturazione dell'integratore sul valore massimo del segnale di attuazione; ± 5 V:

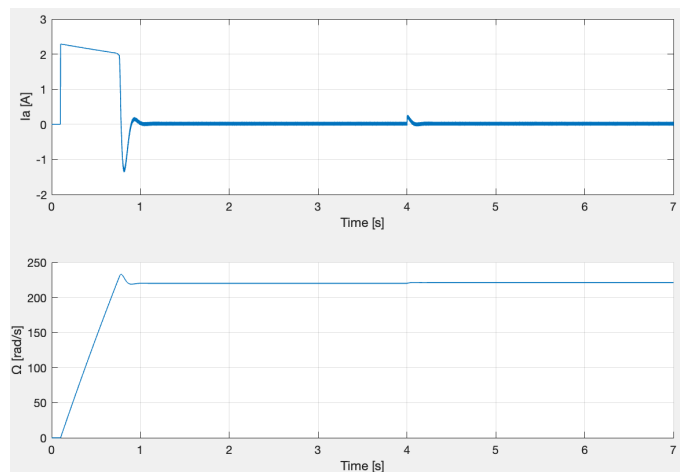


Figure 23: Andamento della corrente di armatura e velocità angolare con fenomeno Wind-up corretto

4.5 Feed Forward

Un altro problema del regolatore PI è che non riesce ad inseguire un riferimento a rampa con errore a regime finito non nullo. Per rendere il controllo di velocità astatico anche rispetto ad un riferimento a rampa è stata aggiunta la componente Feed Forward. Esso prende il riferimento di velocità desiderato e lo riporta, tramite un puro guadagno K_{ff} , direttamente in uscita al controllo. Il guadagno K_{ff} è stato calcolato come di seguito:

$$K_{ff} = \frac{K_v}{K_{amp} \cdot K_{dt}} = \frac{0.126}{8.064 \cdot 0.0156} = 0.9986$$

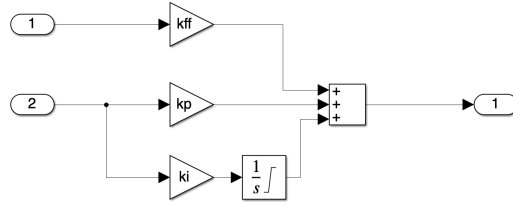


Figure 24: Schema controllore PI(s) + Feed Forward

Dopodichè, sono state ricalcolate le soglie per la correzione del fenomeno di Wind-up:

$$S_{new} = \pm(1 + 0.2) \cdot \frac{I_{amax} \cdot R_a}{K_{amp}} = \pm 0.676$$

Come si può notare dalla Figura 25, il sistema segue perfettamente il riferimento a rampa.

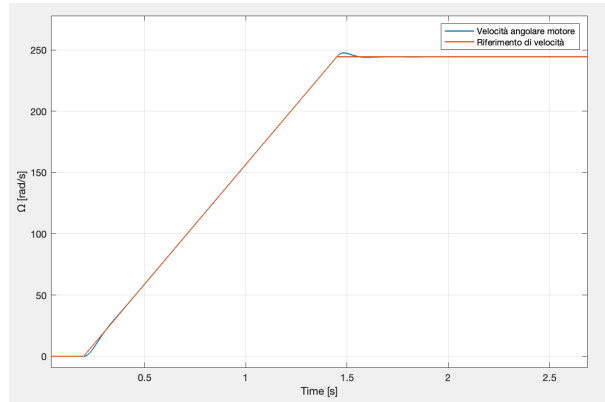


Figure 25: Confronto tra velocità angolare del motore e riferimento di velocità a rampa con Feed Forward e correzione soglie anti Wind-up

5 Risultati

A seguito della progettazione del controllore PI, con l'aggiunta dell'azione Feed Forward, in Figura 26 è riportato il modello del sistema a ciclo chiuso:

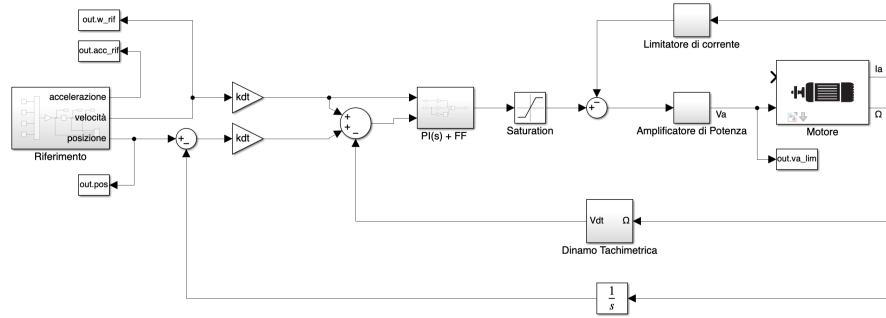


Figure 26: Schema di controllo Simulink a ciclo chiuso

Dopodichè, sono stati realizzati i riferimenti di accelerazione, velocità e posizione. Essi sono stati costruiti in modo che il sistema potesse raggiungere la velocità v_{max} in un tempo $T_s = 1.25$, mantenerla per un tempo $T_{hold} = 2.75$ s, e decelerare raggiungendo una velocità nulla in un tempo $T_f = T_s$, al fine di raggiungere la posizione finale $x_f = 4$ m.

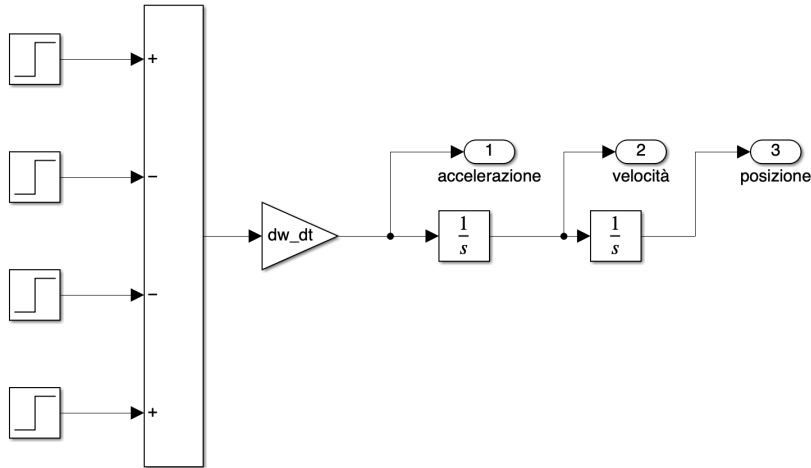


Figure 27: Schema Simulink per riferimenti di accelerazione, velocità e posizione

In seguito vengono riportati i risultati della simulazione:

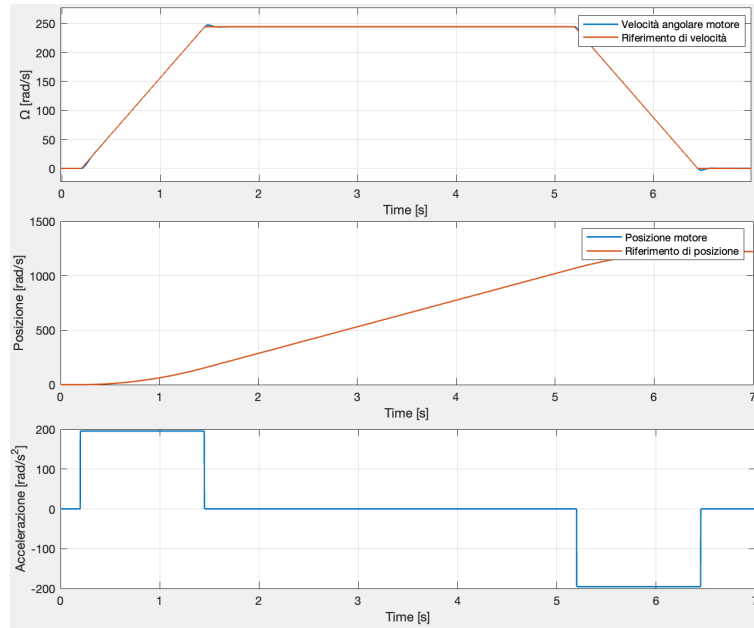


Figure 28: Simulazione del sistema con ingresso i riferimenti costruiti.

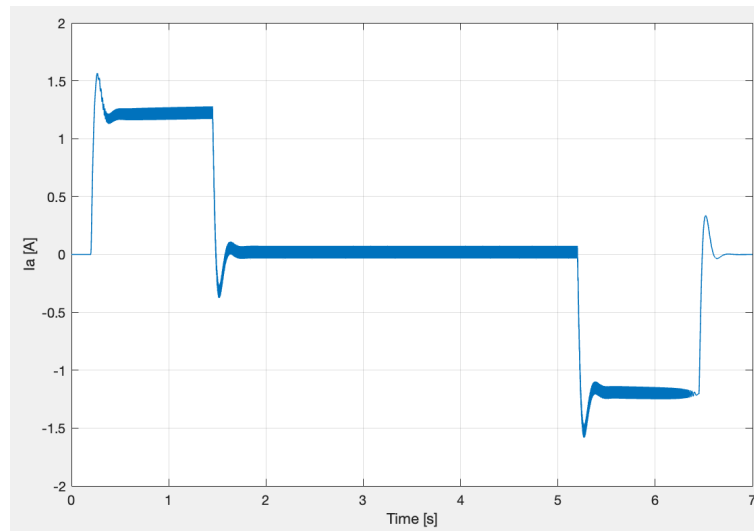


Figure 29: Andamento della corrente di armatura I_a

Come si nota dalla Figura 28, i riferimenti di velocità e posizione vengono seguiti molto bene. Inoltre, dalla Figura 30, si vede che la corrente di armatura I_a rispetta la specifica sul ripple, definito in Sezione 4.1.

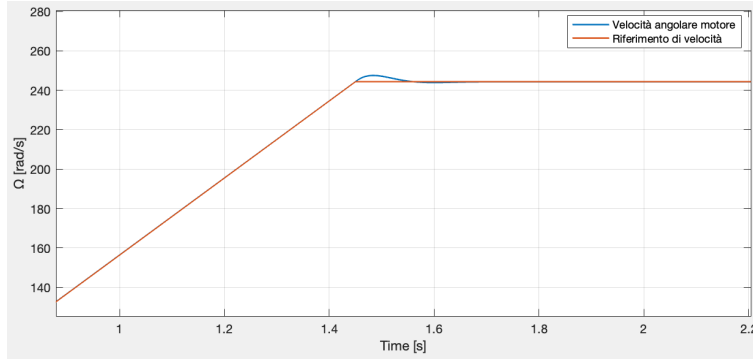


Figure 30: Andamento velocità angolare in dettaglio

È stata effettuata una simulazione supponendo che dopo un tempo $t = 3\text{ s}$ venga posizionata un'altra massa $m_2 = 2\text{ Kg}$ sul carrello.

Eseguendo i calcoli effettuati nella Sezione 2.3, è stato calcolato il valore di coppia resistente esterna $C_{ext} = 0.057\text{ Nm}$

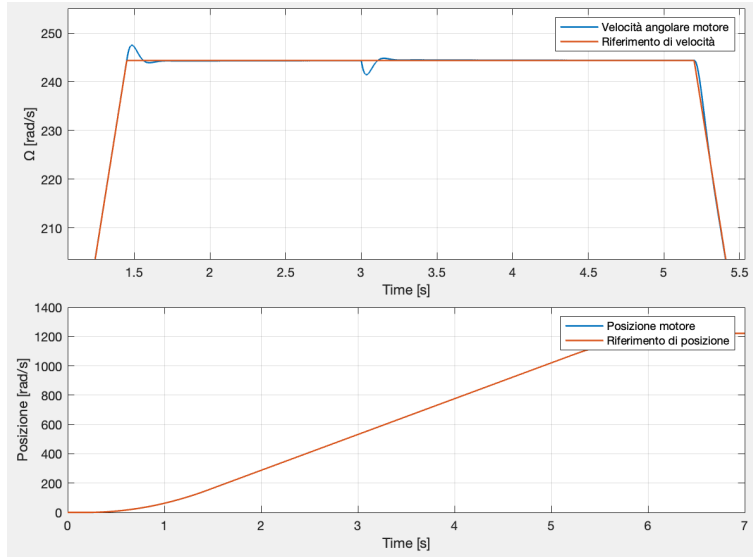


Figure 31: Andamento velocità angolare con un disturbo al tempo $t = 3\text{ s}$