

Progetto di Azionamenti ed Elettronica Industriale

Natale Marco, Sagliocco Davide

1° anno Magistrale Ingegneria Informatica curriculum Robotica e Automazione a.a. 2024/2025

Indice

1	Introduzione	2
2	Scelta delle Componenti	3
2.1	Specifiche di progetto	4
2.2	Vite a ricircolo di sfera e chiocciola	4
2.3	Scelta del Motore	6
2.3.1	Parametri del motore	9
3	Modello del motore	11
3.1	Amplificatore di potenza	12
3.2	Limitatore di corrente	13
3.3	Dinamo tachimetrica	15
4	Progetto del controllore	17
4.1	Regolatore PI	17
4.1.1	Progetto parametro K_p	17
4.1.2	Progetto parametro K_i	19
4.2	Correzione fenomeno Wind-up	21
4.3	Feed Forward	21
5	Asservimento in Posizione e Risultati	23

1 Introduzione

Si vuole progettare un controllore per l'azionamento di un motore elettrico in corrente continua con spazzole, per un meccanismo di slittamento del carrello porta utensile (lungo un asse) per un tornio. La slitta porta utensile è montata su una chiocciola traslante lungo una vite senza fine a ricircolo di sfere. Il pezzo da tornire, che si suppone sia realizzato in acciaio inossidabile, è messo in rotazione e viene bloccato il suo asse di rotazione tramite un autocentrante dall'esterno. L'asse di rotazione della vite è disassato rispetto all'asse di rotazione del motore e la trasmissione tra i due alberi avviene per mezzo di una coppia di ruote dentate.

La tecnica di controllo permette di agire sulla tensione d'armatura del motore al fine di raggiungere una velocità desiderata e quindi una posizione finale dell'utensile. Si ha come obiettivo ultimo la modellazione in MATLAB e Simulink dell'intero sistema controllato e la verifica delle specifiche iniziali, utilizzando la tecnica dell'asservimento di posizione.

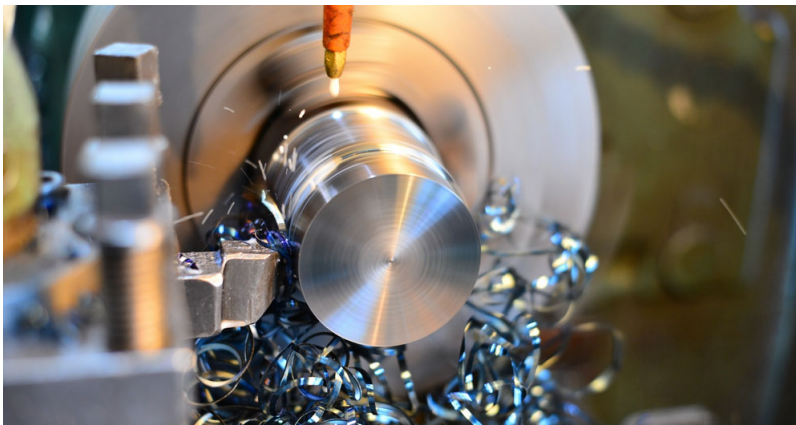


Figura 1: Operazione di tornitura lungo l'asse longitudinale.

2 Scelta delle Componenti

Le viti a ricircolo di sfere sono costituite da un albero filettato, da una chiocciola con sfere integrate e da un meccanismo di ricircolo delle sfere, queste sono i tipi di trasmissione del moto più comunemente utilizzati nelle macchine industriali e di precisione. Si usano per trasformare il moto rotatorio in moto lineare e viceversa, in quanto offrono grande precisione ed elevata efficienza.

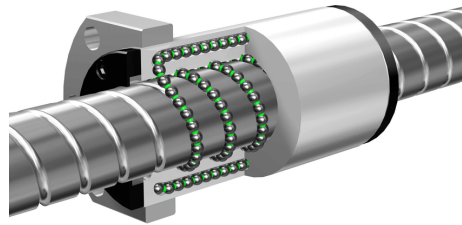
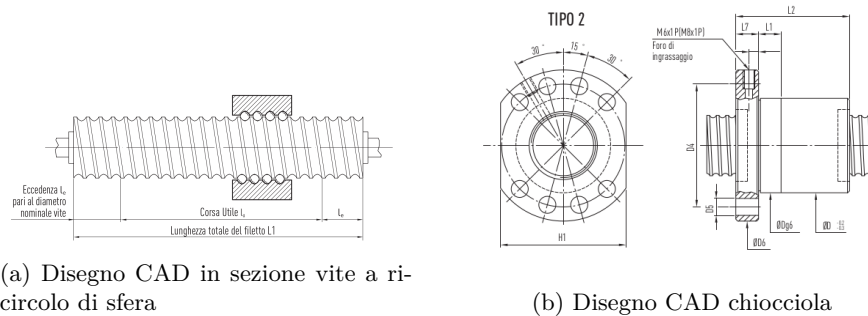


Figura 2: Modello vite a ricircolo di sfera

Questa tipologia di viti permettono un movimento preciso e a basso attrito, con una coppia ridotta, rigidità elevata e movimento uniforme, e ne esistono di varie tipologie: rullata, pelata e rettificata, e trovano applicazione in svariati ambiti industriali.



(a) Disegno CAD in sezione vite a ricircolo di sfera

(b) Disegno CAD chiocciola

Figura 3: Schema CAD Vite e Chiocciola

È previsto anche l'utilizzo di ruote dentate, con rapporto di 1 : 1, per la trasmissione di moto tra i due alberi disassati, le quali sono caratterizzate da un momento d'inerzia $J_g = 2.1 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

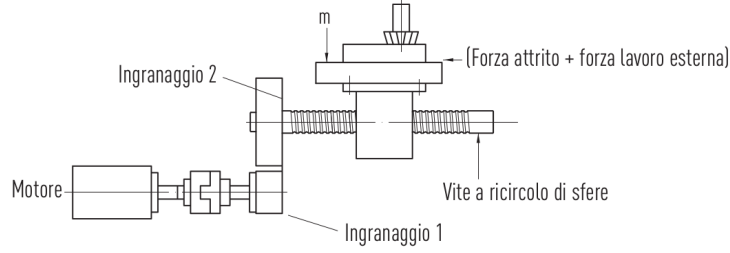


Figura 4: Schema semplificato di un sistema a vite a ricircolo di sfere

2.1 Specifiche di progetto

Si vuole spostare un utensile montato sulla chiocciola che scorre lungo la vite, allo scopo di tornire un pezzo cilindrico lungo 300 mm; in particolare si vuole effettuare un'operazione di sgrossatura. Pertanto, il movimento complessivo dell'utensile avverrà tra la posizione iniziale $x_0 = 0$ mm e quella finale $x_f = 300$ mm, escludendo i tratti necessari per portarsi alla velocità atta alla lavorazione e a rallentare fino all'arresto. Le specifiche di progetto nel dettaglio sono:

- velocità di regime : $v_f = 25 \text{ mm/s}$
- tempo di accelerazione : $t_a = 1.5 \text{ s}$
- massa totale utensile e porta utensile : $m = 2.5 \text{ kg}$
- lunghezza di lavorazione : $l = 300 \text{ mm}$
- forza di avanzamento per sgrossatura (stimata) : $F_w = 670 \text{ N}$

2.2 Vite a ricircolo di sfera e chiocciola

Per il progetto sono state scelte da catalogo una vite senza fine a ricircolo di sfera di tipo rullata ed una chiocciola associata della *HIWIN*. Sono stati estrapolati dal catalogo fornito dall'azienda i parametri in Tabella 1 in merito alla chiocciola:

Modello	$d_n \text{ [mm]}$	$P \text{ [mm]}$	$m_r \text{ [kg]}$	μ	$C_{dyn} \text{ [N]}$	η_1	η_2
R20-5K4-FSCEW	20	5	2	0.005	1560	0.9	0.85

Tabella 1: Valori estratti dal catalogo della vite.

Dove:

- d_n è il diametro nominale della chiocciola

- P è il passo della vite
- μ è una stima del coefficiente di attrito vite-chiocciola
- C_{dyn} rappresenta il coefficiente di carico dinamico
- m_r è la massa della vite
- η_1 è l'efficienza meccanica diretta
- η_2 è l'efficienza meccanica inversa

Calcolo delle Forze e Inerzie

Si considera la forza di avanzamento F_w come carico applicato lungo l'asse della vite, che deve essere superato per muovere la slitta in modo controllato. Ai fini della progettazione del sistema di azionamento, è necessario determinare le forze e le coppie in gioco durante il moto uniforme e in fase di accelerazione, tali valori saranno poi utili per la scelta del motore.

- *Velocità lineare della chiocciola*, indichiamo con n_2 la velocità finale del motore pari a $300rpm$:

$$v_{lineare} = \frac{P \cdot n_2}{60} = 25 \quad [\text{mm/s}]$$

- *Forza di precarico*, è una forza applicata tra vite e chiocciola per eliminare i giochi meccanici e aumentare la rigidità del sistema, migliorando precisione e stabilità durante il movimento, pari ad una percentuale f_{pr} (in questo caso il 5%) del carico dinamico

$$F_{pr} = \left(\frac{f_{pr}}{100} \right) \cdot C_{dyn} = 0.7800 \quad [\text{N}]$$

- *Coefficiente equivalente per precarico*:

$$K_p = \left(\frac{1}{\eta_1} \right) - \eta_2 = 0.2611$$

- *Coppia di precarico*:

$$T_d = \frac{K_p \cdot F_{pr} \cdot P}{2000 \cdot \pi} = 1.6207 \cdot 10^{-4} \quad [\text{Nm}]$$

Gran parte delle formulazioni utilizzate nell'analisi del sistema meccanico sono state fornite dal catalogo tecnico HIWIN, con riferimento ai modelli di viti a ricircolo di sfere rullate, al fine di garantire coerenza con i dati reali dei componenti selezionati.

2.3 Scelta del Motore

Si ricavano poi i parametri confrontabili con le specifiche per la scelta del motore, in :

- *Coppia motore in moto uniforme:*

$$T_a = \frac{F_w \cdot P}{2000 \cdot \pi \cdot \eta_1} = 0.5954 \quad [\text{Nm}]$$

- *Coppia totale in moto uniforme, riportata al motore:*

$$T_M = (T_a + T_b + T_d) \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) = 0.6155 \quad [\text{Nm}]$$

dove $T_b = 0.02$ [Nm] rappresenta l'attrito generato nei supporti rotanti del sistema, in particolare nei cuscinetti che alloggianno l'albero della vite a ricircolo di sfere. Questo valore viene considerato costante e viene sommato alle altre coppie resistenti per determinare la coppia totale richiesta al motore durante il moto uniforme

- *Accelerazione richiesta al motore:*

$$\alpha = \frac{2\pi(n_2 - n_1)}{60 \cdot t_a} = 20.9440 \quad [\text{rad/s}^2]$$

- *Inerzia totale del sistema riportata al motore*, che tiene conto di tutte le componenti in rotazione e traslazione convertite all'albero motore.

$$J = J_{G1} + J_{G2} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 + \frac{1}{2} m_r \left(\frac{d_n}{2000} \right)^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 + m_l \left(\frac{P}{2000\pi} \right)^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = 0.0043 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

dove:

- J_{G1} e J_{G2} : momenti d'inerzia delle ruote dentate dell'ingranaggio, rispettivamente sul lato motore e sul lato carico;
- $\left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$: fattore di riduzione quadratico che consente di riportare le inerzie dalla parte meccanica (carico) alla parte motore, secondo il rapporto di trasmissione;
- m_r : massa della vite a ricircolo di sfere, modellata come un cilindro in rotazione;
- d_n : diametro nominale della vite;
- m_l : massa traslante complessiva (utensile e supporto), riportata in termini rotazionali tramite il passo della vite P
- *Coppia richiesta per accelerazione:*

$$T_{a,acc} = J \cdot \alpha = 0.0901 \quad [\text{Nm}]$$

- *Coppia totale richiesta al motore:*

$$T_{M,a} = T_M + T_{a,acc} = 0.7056 \quad [\text{Nm}]$$

Dai calcoli effettuati risulta necessario impiegare un motore in grado di fornire una coppia nominale pari a $T_{M,a} = 0,70 \text{ Nm}$ e una velocità angolare nominale pari a $n_2 = 300 \text{ rpm}$, al fine di soddisfare le specifiche di progetto e garantire il corretto funzionamento dell'azionamento.

Quindi si è scelto di utilizzare un motoriduttore a corrente continua *ROK 311M* con rapporto di riduzione pari a 10. Il motoriduttore, composto da motore e riduttore integrato, permette di ottenere un'unica unità compatta con una coppia desiderata ampiamente sufficiente per l'azionamento, riducendo la velocità, ma raggiungendo comunque quella nominale richiesta dalle specifiche di progetto.



Figura 5: Motoriduttore ROK 311M

ROK 311M

WATT Motore-motor	Nm Riduttore-gear
70	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 Kgcmm²	0.47

Figura 6: Datasheet motore ROK 311M

2.3.1 Parametri del motore

Dopo la scelta del motore, sono stati ricavati dal datasheet i seguenti parametri rilevanti del motoriduttore:

Parametro	Simbolo	Valore
Potenza nominale	P_{nom}	70 W
Velocità nominale	ω_{nom}	300 rpm
Resistenza armatura	R_a	0.85Ω
Induttanza arm.	L_a	$1.34 \times 10^{-3} \text{ H}$
Costante velocità	k_v	7.3 V/krpm
Inerzia rotore	J_m	$4.7 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$
Coppia nominale	C_{nom}	1.5 Nm
Tensione nominale	V_{nom}	24 V
Corrente nominale	I_{nom}	3.65 A

Tabella 2: Parametri elettrici e meccanici del motore rilevanti

Il motoriduttore scelto presenta una coppia nominale $C_{nom} = 1.5 \text{ [Nm]}$ ed una velocità nominale $\omega_{nom} = \omega_{max} = 300 \text{ rpm}$, che sono congruenti con le specifiche di progetto. È stata approssimata la costante di coppia k_t del motore pari a k_v per semplicità.

Successivamente sono stati effettuati i seguenti calcoli, a partire dalle equazioni statiche del motore, per la determinazione delle grandezze principali viste dal motore a monte del riduttore:

- *Coppia richiesta al motore, dove T_{loss} è stata stimata essere la perdita di coppia causata dal riduttore :*

$$C_{tot} = \frac{T_{Ma}}{10} + T_{loss} + J_m \frac{\omega_{max}}{t_a} = 0.1524 \text{ Nm}$$

- *Inerzia totale vista dal motore a monte del riduttore J_{tot} :*

$$C_{tot} = J_{tot} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_{max}}{t_a} \implies J_{tot} = \frac{C_m \cdot T_s}{\omega_{max}} = 0.00072 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

- *Corrente di picco con coppia C_{tot} :*

$$I_{max} = \frac{C_{tot}}{k_t} = \frac{0.1524}{0.00697} = 2.1863 \text{ A}$$

- *forza contro-elettromotrice:*

$$E_g = k_v \omega_{max} = 0.00697 \times 314.1593 = 21.9 \text{ V}$$

Dopodiché ci si è occupati del bilancio delle potenze in gioco (meccaniche ed elettriche), al fine di stimare il coefficiente di attrito viscoso B del motore:

$$P_{el} = P_J + P_{mecc} + P_{mecc_{loss}}$$

- *Potenza elettrica nominale:*

$$P_{el} = V_{nom} I_{nom} = 87.6 \text{ W}$$

- *Potenza meccanica:*

$$P_{mecc} = C_{nom} \omega_{nom} = 0.22 \times 314.16 = 69.1 \text{ W}$$

- *Perdite elettriche per effetto Joule:*

$$P_J = R_a I_{nom}^2 = 0.85 \times 3.65^2 = 11.3 \text{ W}$$

- *Perdite per attrito viscoso:*

$$P_{mecc_{loss}} = P_{el} - P_J - P_{mecc} = 7.2 \text{ W}$$

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

$$P_{mecc_{loss}} = B \cdot \omega_{nom}^2 \implies B = \frac{P_{mecc_{loss}}}{\omega_{nom}^2} = 7.3 \times 10^{-5} \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad/s}}$$

Si osservi che la potenza richiesta risulta essere lievemente inferiore alla potenza effettiva del motore.

3 Modello del motore

A partire dai parametri ottenuti, sono state determinate le funzioni di trasferimento del motore relative alla parte elettrica e meccanica del sistema:

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

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

Il sistema presenta due poli a parte reale negativa, pertanto risulta essere stabile. E' possibile individuare le costanti di tempo elettrica e meccanica, associate ai due poli a parte reale negativa ed evincere che il polo meccanico è dominante rispetto a quello elettrico perché più vicino all'asse immaginario. Il modello complessivo del motore, successivamente implementato in ambiente Simulink, è mostrato in figura 7.

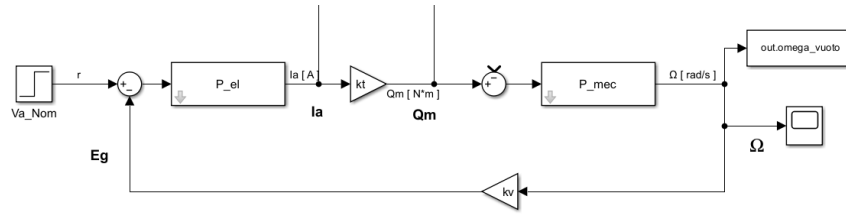


Figura 7: Modello motore in corrente continua in Simulink

Utilizzando i parametri precedentemente calcolati, si è proceduto alla simulazione del sistema applicando una tensione nominale pari a $V_a = 23.76$ V. In figura 8-9 sono illustrati gli andamenti della velocità angolare ω , della coppia motrice Q_m e della corrente di armatura I_a .

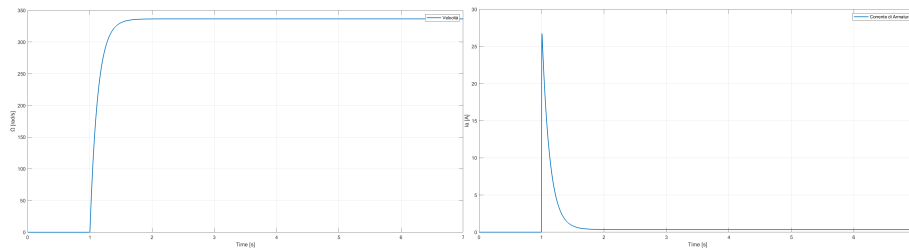


Figura 8: Andamenti di velocità angolare e corrente di armatura

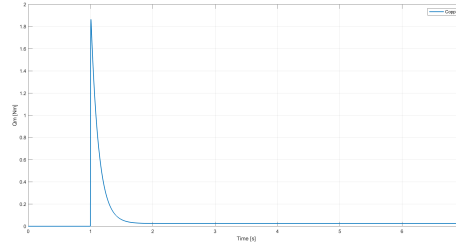


Figura 9: Andamento coppia

Facendo riferimento alle equazioni statiche del motore in condizioni di regime stazionario e assumendo una coppia esterna nulla, è possibile stimare le principali grandezze elettriche e meccaniche del sistema, da cui si riscontra una buona coerenza, confermando la correttezza del modello adottato.

3.1 Amplificatore di potenza

L'ingresso al sistema motore è rappresentato dalla tensione di armatura V_a , generalmente fornita da un amplificatore di potenza. Quest'ultimo, nella pratica, non presenta un comportamento lineare in quanto realizzato mediante un convertitore DC/DC.

In fase di modellazione, si è assunta un'approssimazione lineare del comportamento dell'amplificatore di potenza, rappresentandolo tramite un guadagno costante. A tal fine, è stato progettato un guadagno K_{amp} sulla base dell'ipotesi che il segnale di controllo in ingresso all'amplificatore possa raggiungere un massimo di 5 V, e che il motore possa essere alimentato con una tensione massima pari al 20% in più rispetto alla sua tensione nominale, $V_{nom} = 24$ V:

$$V_{lim} = 1.2 \cdot V_{nom} = 28.8 \text{ V}$$

Questa scelta consente di spingere il motore oltre la sua zona di sicurezza per brevi periodi, al fine di ottenere migliori prestazioni dinamiche.

Il modello dell'amplificatore di potenza implementato in Simulink è mostrato in figura 10, dove al guadagno lineare è stato affiancato un blocco di saturazione, posto in serie, per limitare l'uscita entro i valori di sicurezza.

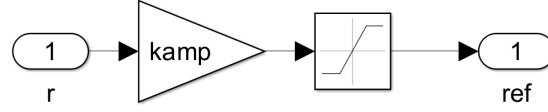


Figura 10: Schema Simulink amplificatore

dove :

$$K_{amp} = \frac{V_{lim}}{5} = 5.76$$

3.2 Limitatore di corrente

È stato introdotto un sistema di limitazione della corrente di armatura al fine di evitare i picchi di corrente che si verificano all'avvio del motore, i quali risultano notevolmente superiori al valore nominale.

Nei primi istanti di funzionamento, poiché il motore è inizialmente fermo, la forza contro-elettromotrice risulta nulla, ovvero $E_g = 0$ V. Tuttavia, al circuito di armatura viene applicata la tensione massima V_a , causando una corrente iniziale che eccede ampiamente quella prevista in regime. Questo fenomeno, se non controllato, può compromettere l'integrità del motore.

Per evitare tali condizioni critiche, si è reso necessario dotare il sistema di un limitatore di corrente. Il modello di questo componente, realizzato in ambiente Simulink, è mostrato in figura 11.

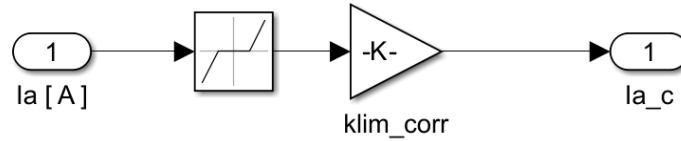


Figura 11: Schema Simulink limitatore di corrente

Il limitatore di corrente è costituito da un blocco soglia e da un guadagno. Il blocco soglia è progettato per fornire un'uscita nulla quando l'ingresso si mantiene all'interno di un intervallo definito tra due soglie preimpostate. Qualora l'ingresso superi tali limiti, il blocco restituisce in uscita il valore eccedente, mantenendo un guadagno unitario.

Le soglie sono state impostate al valore della corrente nominale di armatura, pari a $I_{nom} = 3.65$ A. Il guadagno associato è stato determinato in modo tale che, qualora la corrente nel circuito di armatura ecceda del 20% la soglia impostata, la tensione in uscita dal trasduttore sia sufficiente a disattivare completamente il segnale di attuazione, azzerando quindi l'ingresso all'amplificatore.

Il valore del guadagno K_{lim} risulta:

$$K_{lim} = \frac{5}{0,2 \cdot I_{amax}}$$

Nelle figure 12, 13 e 14 sono riportati gli andamenti delle principali grandezze del motore in presenza del limitatore di corrente e dell'amplificatore di potenza.

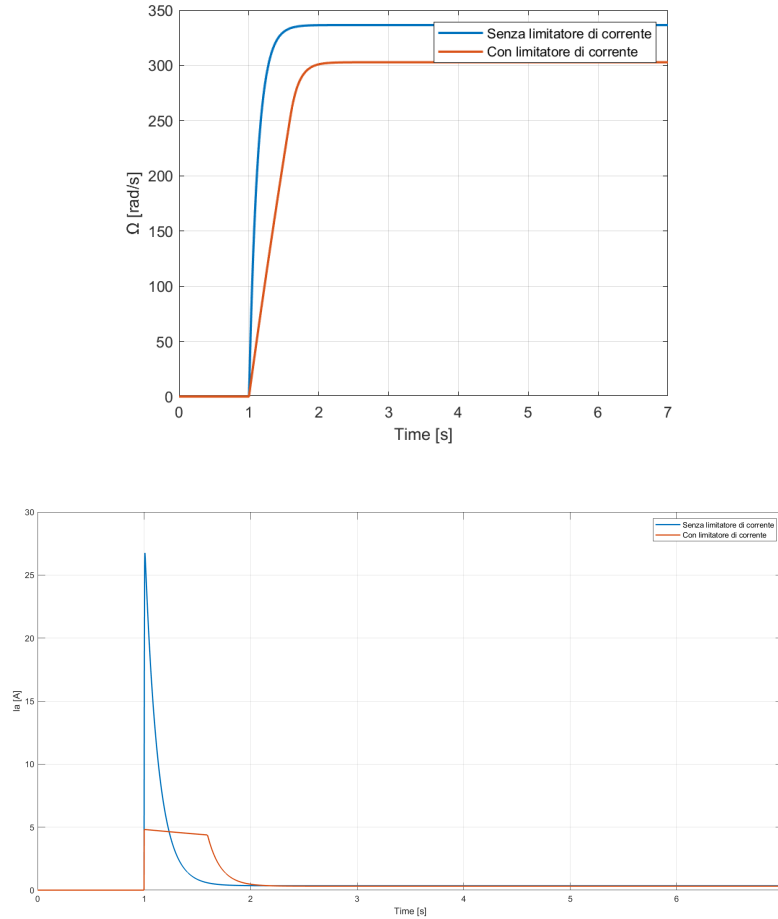


Figura 12: Andamento di velocità angolare e corrente di armatura con limitatore e amplificatore

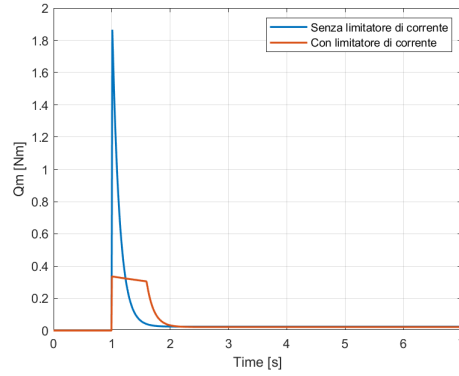


Figura 13: Andamento della coppia con limitatore e amplificatore

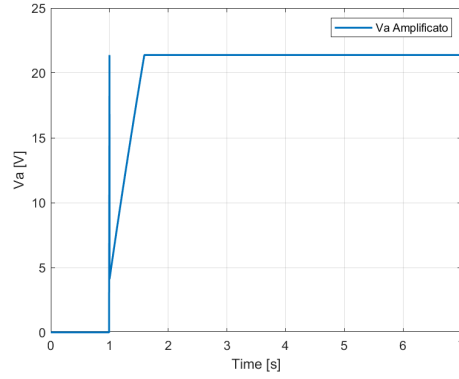


Figura 14: Andamento di V_a con limitatore e amplificatore

3.3 Dinamo tachimetrica

L'obiettivo del progetto consiste nel controllare la velocità di rotazione del motore tramite la regolazione della tensione di armatura V_a , in modo da garantire il funzionamento del motore alla velocità desiderata, indipendentemente dalla coppia esterna applicata.

Per realizzare tale controllo, è indispensabile misurare la velocità angolare del motore e convertirla in un segnale di tensione. A questo scopo, viene impiegata una dinamo tachimetrica rumorosa come sensore di velocità.

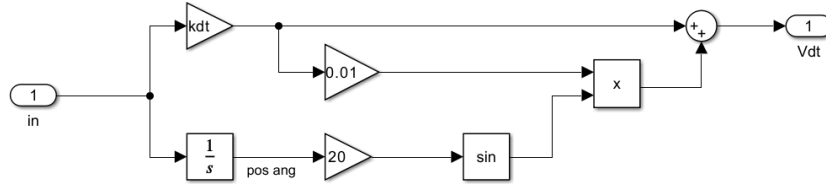


Figura 15: Schema Simulink dinamo tachimetrica rumorosa

Il guadagno di trasduzione K_{dt} del sensore è stato determinato a partire dal valore di tensione di riferimento corrispondente alla velocità nominale ω_{max} del motore, secondo la seguente relazione:

$$K_{dt} = \frac{V_{ctr}}{\omega_{max}} = \frac{4.1247}{314.1593} = 0.0131 \text{ Vs/rad}$$

In questo caso di studio, si considera una dinamo tachimetrica dotata di $N = 20$ lamelle sul collettore. In questo modo si ottiene un'armonica sinusoidale ad una frequenza che dipende dalla velocità a cui si trova il motore, moltiplicata per N . L'ampiezza dell'armonica viene scalata, del 10% della velocità del motore. Inoltre, la tensione di controllo da applicare all'ingresso dell'amplificatore di potenza, al fine di ottenere la tensione desiderata al terminale del motore, è data da:

$$V_{ctr} = \frac{V_a}{K_{amp}} = 4,1247 \text{ V}$$

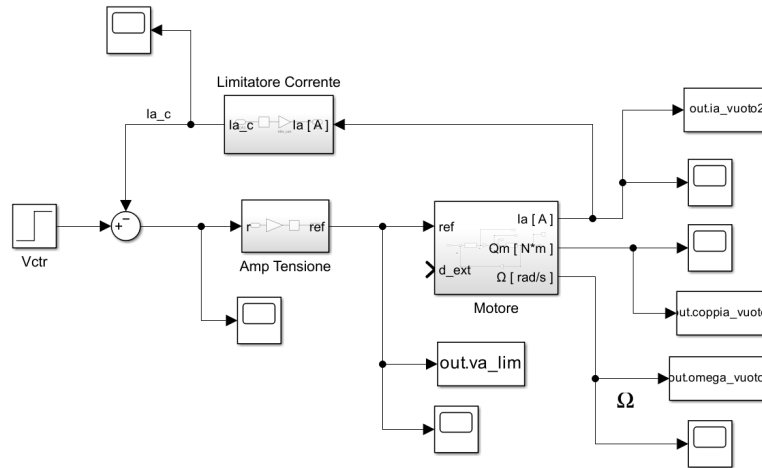


Figura 16: Schema Simulink del modello del motore con amplificatore di potenza e limitatore di corrente

4 Progetto del controllore

L'obiettivo di questo lavoro consiste nel controllare la velocità del motore al fine di movimentare un sistema porta utensile montato su una vite senza fine, con lo scopo di tornire un pezzo su un autocentrante esterno, mantenendo una velocità ω desiderata.

Assumendo come parametri la velocità massima v_{max} , l'accelerazione massima a_{max} e la massa del sistema porta utensile m_l , definiti nella sezione 2.1, tale metodologia viene denominata *Asservimento di Posizione*.

4.1 Regolatore PI

Per il controllo della velocità del motore è stato adottato un regolatore PI, che garantisce la stabilità del sistema e limita l'amplificazione del rumore, consentendo di raggiungere la velocità desiderata con errore a regime nullo grazie alla proprietà di astaticità rispetto all'ingresso a gradino.

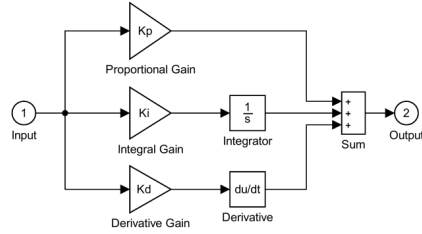


Figura 17: Schema completo Simulink PID

La funzione di trasferimento del controllore PI è espressa come:

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

Per la determinazione dei parametri K_p e K_i sono state definite le seguenti specifiche:

- Ripple della corrente di armatura I_a intorno al 5% del valore nominale, ovvero:

$$ripple = 5\% \cdot I_{amax} \approx 0,11 \text{ A}$$

- Sovraelongazione percentuale massima $S_{max}\%$ pari al 20% della risposta del sistema a seguito di una variazione infinitesimale del riferimento a gradino in ingresso.

4.1.1 Progetto parametro K_p

Per la progettazione del parametro K_p , sono state effettuate simulazioni variando K_p con l'azione integrale disabilitata, considerando una coppia esterna di disturbo nulla e un riferimento impostato al 90% della tensione di alimentazione.

Il vincolo sul valore di K_p deriva dalla specifica relativa al ripple della corrente.

In Tabella 3 sono riportati i valori del ripple della corrente di armatura I_a in funzione di diversi valori di K_p :

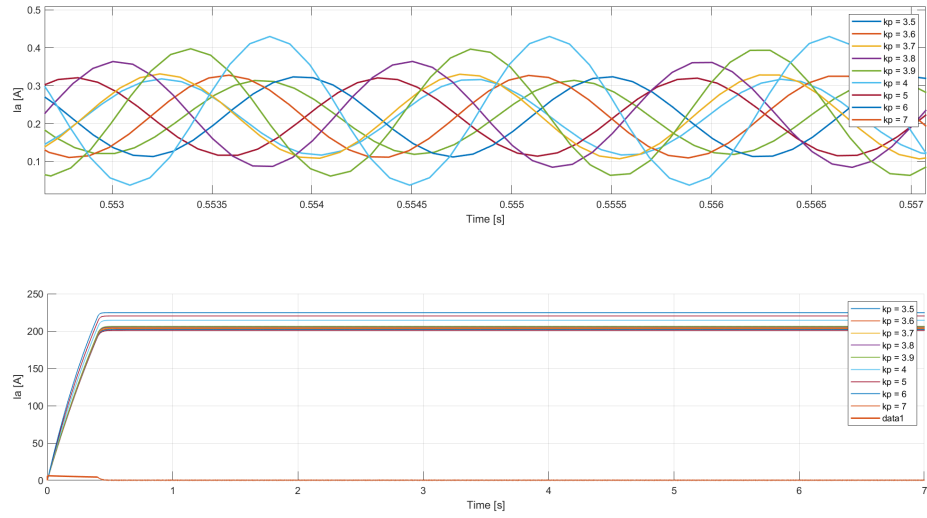


Figura 18: Andamento della corrente di armatura al variare di K_p

K_p	$Ripple$ [A]
3.5	0.0977
3.6	0.1005
3.7	0.1033
3.8	0.1061
3.9	0.1089
4	0.1117
5	0.1398
6	0.1679

Tabella 3: Ripple di corrente al variare di K_p .

Si è scelto $K_p = 3.9$ per soddisfare la prima specifica. In figura è riportato l'andamento della corrente di armatura

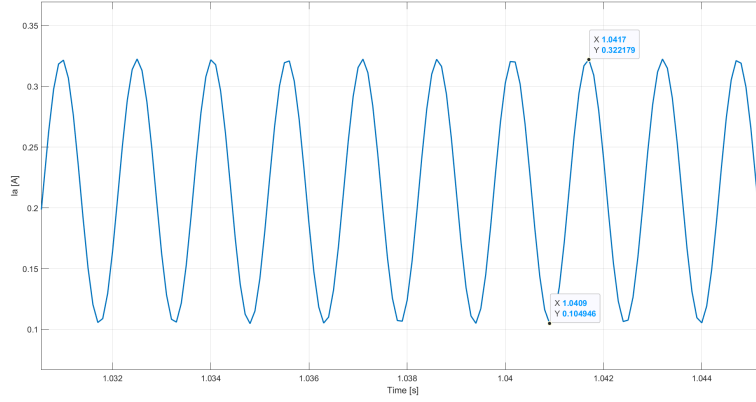


Figura 19: Andamento della corrente di armatura con K_p scelto

4.1.2 Progetto parametro K_i

Il vincolo relativo alla scelta del parametro K_i è associato alla sovralongazione della velocità angolare del motore.

Per determinare K_i , è stato mantenuto costante il valore di K_p e sono stati condotti test al variare del parametro K_i stesso. Il sistema, in condizioni di regime, è stato perturbato mediante un gradino di ampiezza pari all'1 % dell'80 % del valore nominale di alimentazione applicato al riferimento. È stato quindi calcolato il valore della sovralongazione percentuale $S\%$ al variare di K_i .

In Tabella 4 sono riportati i valori della sovralongazione percentuale $S\%$ in funzione dei diversi valori di K_i :

K_i	S [%]
56	6.15
61	7.53
68	8.86
75	10.27
83	11.78
91	13.34
100	14.84
110	16.39
134	19.87
142	20.90

Tabella 4: Sovralongazione percentuale al variare di K_i .

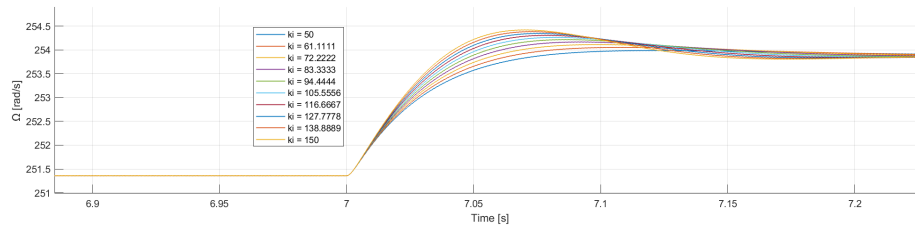


Figura 20: Andamento della velocità angolare al variare di K_i

Si è scelto $K_i = 134.7$ per soddisfare la seconda specifica. In figura 21 è riportato l'andamento della velocità angolare.

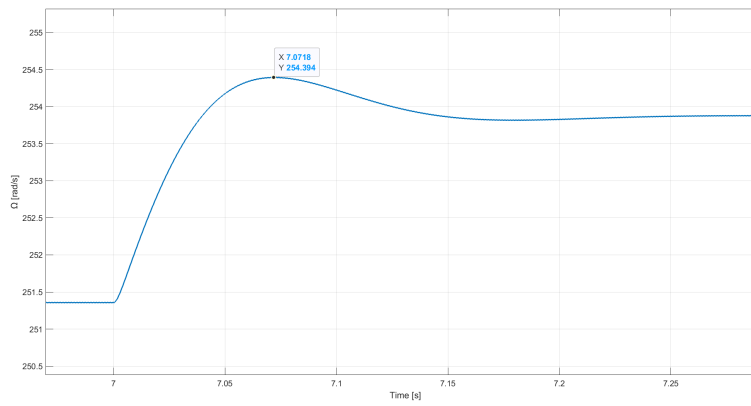


Figura 21: Andamento della velocità angolare con $K_i = 134.7$

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

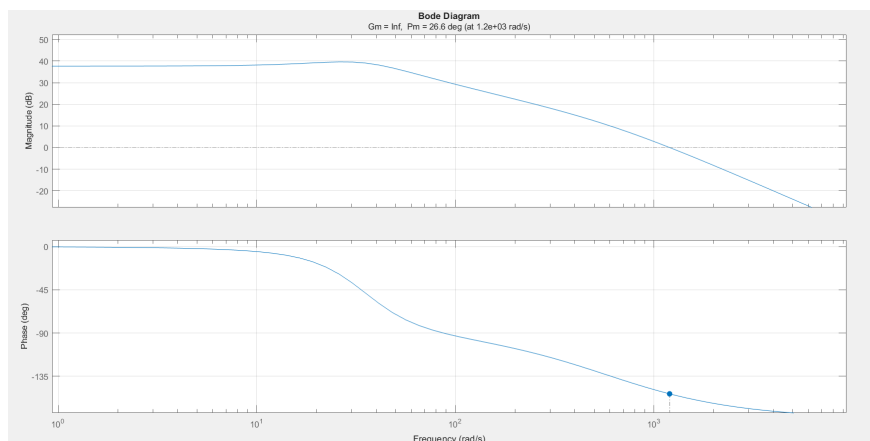


Figura 22: Diagramma di Bode del sistema a ciclo chiuso

4.2 Correzione fenomeno Wind-up

Un problema rilevante associato all'utilizzo del controllore PI è rappresentato dal fenomeno di *Wind-Up*. A causa della presenza del termine integrativo, se l'errore tra riferimento e uscita si mantiene costantemente dello stesso segno, il contributo dell'integratore cresce indefinitamente. Quando successivamente il segno dell'errore si inverte, l'uscita dell'integratore richiede un intervallo di tempo significativo per scaricarsi, ritardando la risposta del sistema e compromettendo le prestazioni dinamiche del controllo.

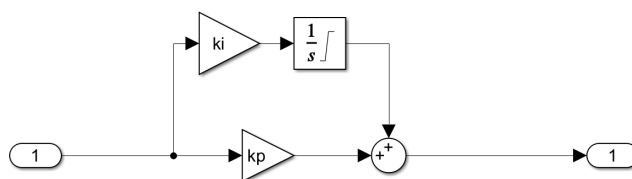


Figura 23: Controllore PI con correzione anti Wind Up

Il fenomeno è stato corretto introducendo una saturazione sull'uscita dell'integratore, limitandola al valore massimo ammissibile del segnale di attuazione, pari a ± 5 V.

4.3 Feed Forward

Un'ulteriore limitazione del regolatore PI è l'incapacità di inseguire un riferimento a rampa senza incorrere in un errore a regime finito. Per rendere il

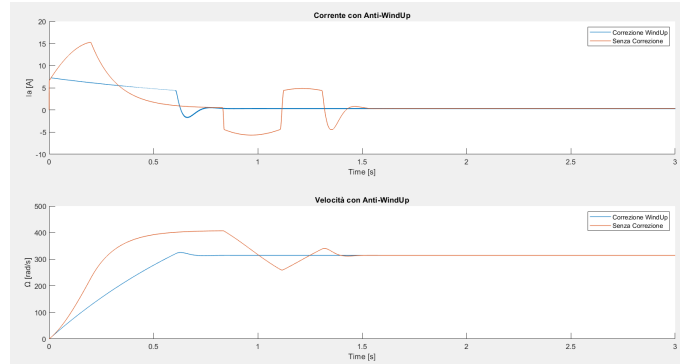


Figura 24: Confronto di corrente di armatura e velocità angolare con fenomeno Wind-up corretto

controllo di velocità astatico anche rispetto a ingressi di tipo rampa, è stata introdotta una componente di *Feed Forward*.

Questa componente preleva direttamente il riferimento di velocità desiderato e lo invia, tramite un guadagno statico K_{ff} , all'uscita del controllo. Il guadagno K_{ff} è stato calcolato come segue:

$$K_{ff} = \frac{K_v}{K_{amp} \cdot K_{dt}} = \frac{0.0697}{5.76 \cdot 0.0131} = 0.9218$$

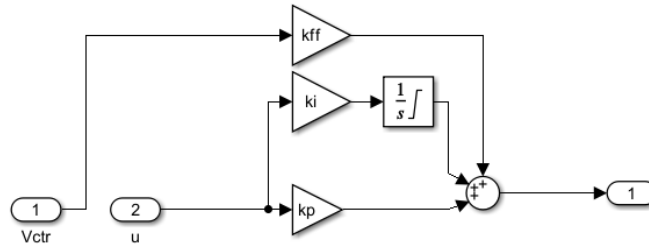


Figura 25: Schema controllore PI(s) + Feed Forward

Successivamente, sono state ricalcolate le soglie di saturazione dell'integratore al fine di correggere efficacemente il fenomeno di *Wind-Up*, tenendo conto del margine di sovracorrente:

$$S_{wu} = \pm \frac{1.2 \cdot R_a \cdot I_{amax}}{K_{amp}} = \pm 0.3872$$

Come si può osservare dalla Figura 27, il sistema è in grado di seguire con precisione il riferimento a rampa.

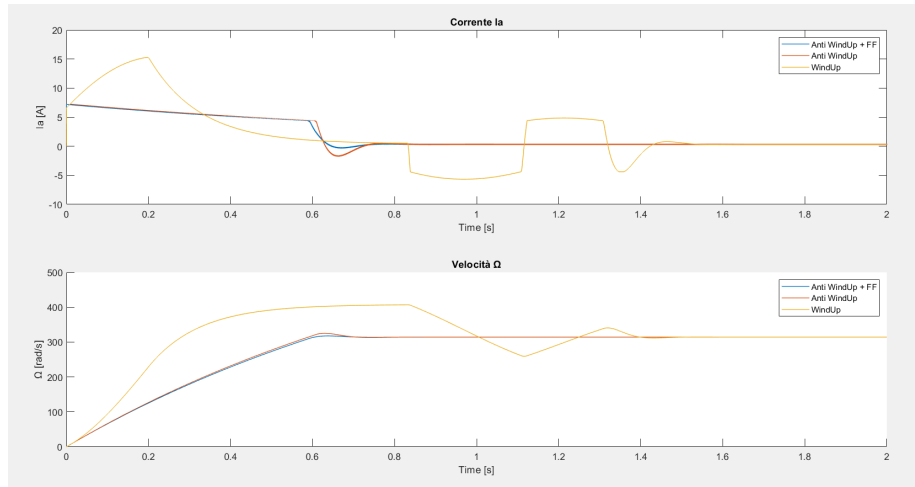


Figura 26: Corrente e Velocità con Feedforward e anti Wind-up a confronto con solo anti Wind-up e in presenza di Wind-up

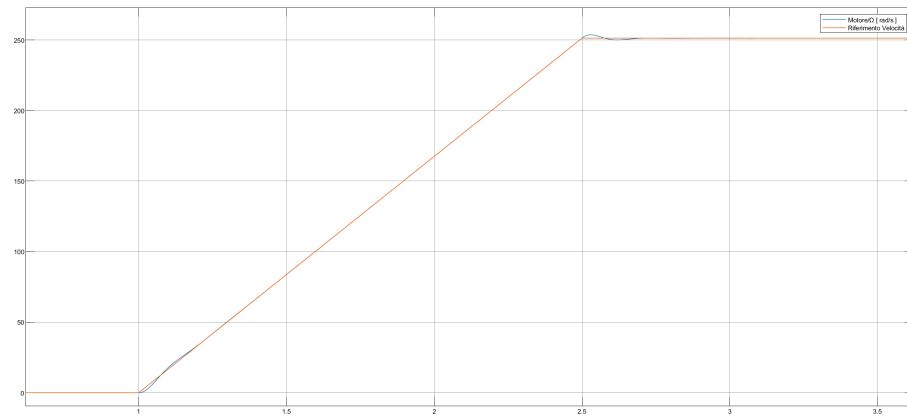


Figura 27: Confronto tra velocità angolare del motore e riferimento di velocità a rampa con Feed Forward e correzione soglie anti Wind-up

5 Asservimento in Posizione e Risultati

A seguito della progettazione del controllore PI, integrato con l'azione di *Feed Forward*, il modello completo del sistema a ciclo chiuso è riportato in Figura 28.



In seguito vengono riportati i risultati della simulazione:

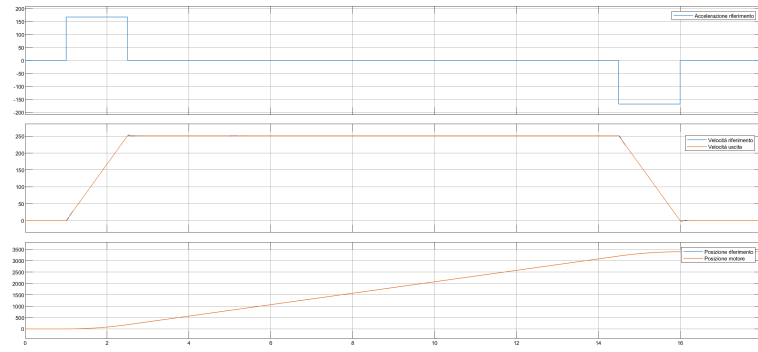


Figura 30: Simulazione del sistema con ingresso i riferimenti costruiti.

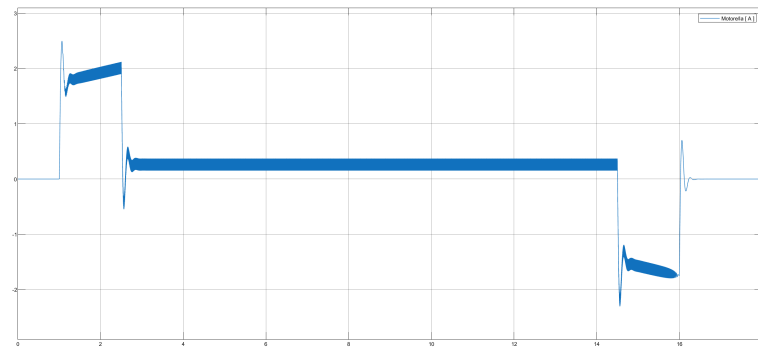


Figura 31: Andamento della corrente di armatura I_a

Come si può osservare dalla Figura 30, i riferimenti di velocità e posizione vengono seguiti con elevata precisione. Inoltre, dalla Figura 32 si evince che la corrente di armatura I_a rispetta la specifica relativa al ripple, così come definita nella Sezione 4.1.

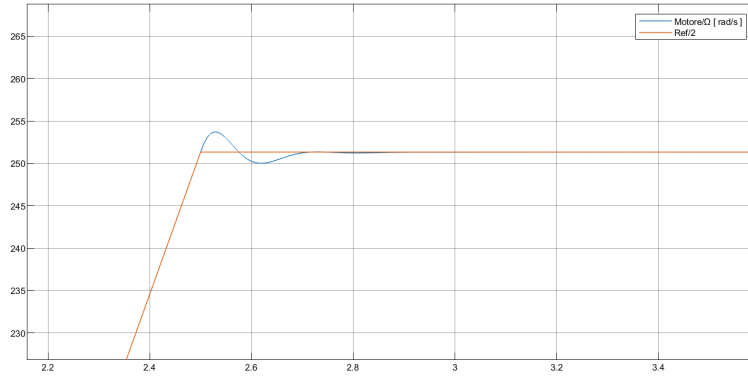


Figura 32: Andamento velocità angolare in dettaglio

È stata condotta una simulazione ipotizzando la presenza di un disturbo applicato al sistema a partire dall'istante $t = 5$ s, dovuto a un'imperfezione dell'oggetto da tornire. Tale disturbo è stato modellato come una coppia resistente esterna di valore $C_{ext} = 0.033$ Nm.

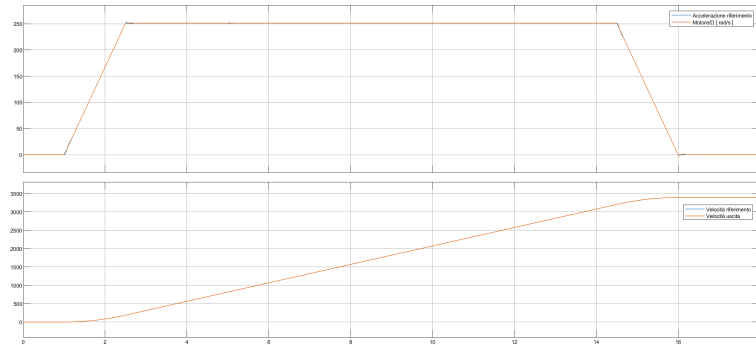


Figura 33: Andamento velocità angolare con un disturbo al tempo $t = 5$ s