

Università degli Studi di Bologna
Università degli Studi di Firenze

Facoltà di Ingegneria



CONTROLLO DELLA TENSIONE SULLA LAMIERA NEI TRENI DI LAMINAZIONE A CALDO

Mirko Rinchi

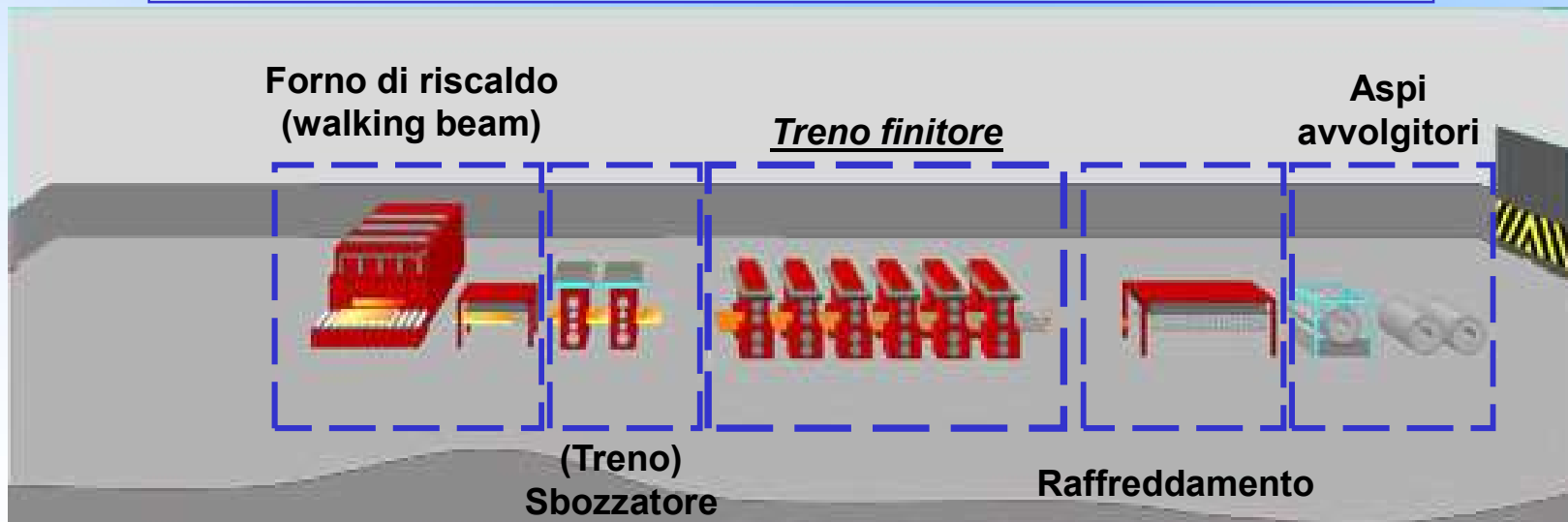
Modello di un treno finitore per la laminazione a caldo per la simulazione dinamica

OBIETTIVO: Ridurre le vibrazioni alle frequenze medio-basse (0÷50 Hz) che determinano la produzione di lamiere con spessori e proprietà ottiche disuniformi.

Fasi della ricerca:

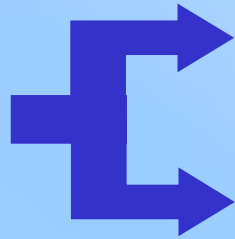
- Sintesi di un modello non lineare di un singolo stadio di laminazione dinamicamente interagente con gli stadi adiacenti;
 - Analisi dinamica dei sottosistemi componenti il modello globale;
 - Simulazioni numeriche;
- Confronto tra le prestazioni di due sistemi di controllo del tiro nella zona di interstand (tra due stadi di laminazione consecutivi).

Schema di un tipico impianto per la laminazione a caldo



Vibrazioni nei laminatoi finitori a caldo

• Forzate:

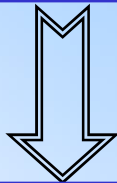


Interazioni dinamiche tra i vari stand

Giunti del sistema di trasmissione della potenza

• Autoeccitate (chatter):

Third-Octave Mode Chatter
Frequenze tipiche 120-180 Hz



Vibrazioni rapidamente crescenti dei cilindri di lavoro.

- La lamiera può venire facilmente tranciata.
- I cilindri di lavoro possono essere gravemente danneggiati.

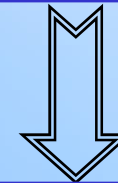
Fifth-Octave Mode Chatter
Frequenze tipiche 500-700 Hz



Vibrazioni che determinano danni superficiali sui cilindri di lavoro.

- Le irregolarità superficiali si ‘stampano’ sul nastro.
- Presenza di velocità critiche.

First Torsional Mode Chatter
Frequenze tipiche 10-20 Hz



Vibrazioni torsionali dei componenti del sistema di trasmissione della potenza.

- Sono causa di irregolari fluttuazioni del tiro forza e coppia di laminazione.

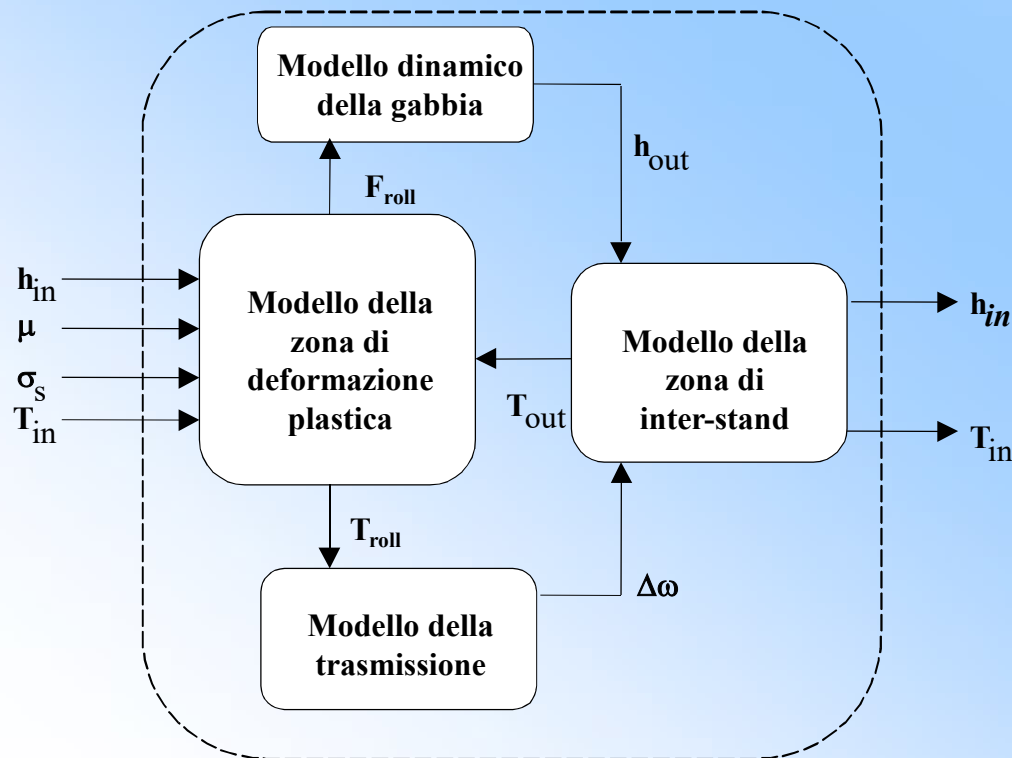
Effetti indesiderati:

Variazioni nello spessore e nella forma del nastro, proprietà ottiche non omogenee

MODELLO DINAMICO DI UN SINGOLO STADIO DI LAMINAZIONE

Il modello completo può essere suddiviso nei seguenti sottosistemi:

- *Gabbia (vibrazioni verticali dei cilindri di lavoro);*
- *Trasmissione della potenza (fluttuazioni della velocità di laminazione);*
- *Zona di deformazione plastica (coppia e componente verticale della forza di laminazione);*
- *Sistemi di controllo (della velocità di laminazione e del tiro) e zona di inter-stand.*



Ulteriori sistemi di controllo

- *Controllo dello spessore della lamina AGC (Automatic Gauge Control).*

(Ignorato nel modello a causa di una dinamica estremamente lenta)

La tensione di snervamento del materiale e il coefficiente di attrito con i cilindri di lavoro possono essere utilizzati come ulteriori grandezze in input (o disturbi)

Sottosistema 1: vibrazioni verticali della gabbia

E' necessario per analizzare i problemi derivanti dalle vibrazioni verticali dei cilindri di lavoro che possono determinare variazioni di spessore del laminato.

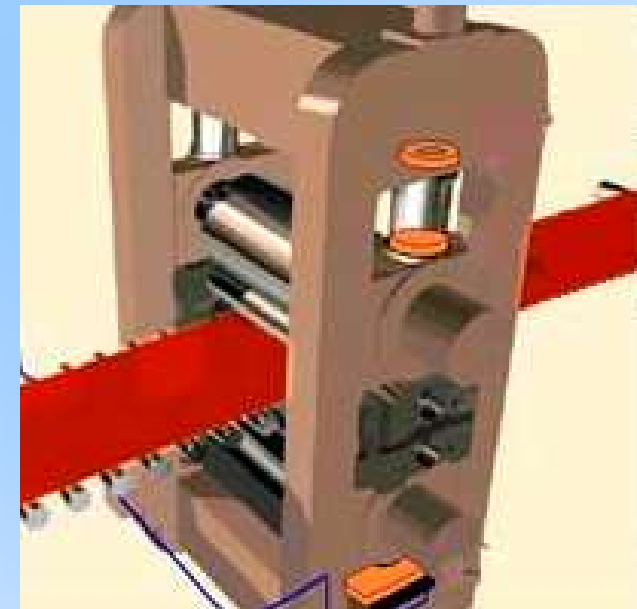
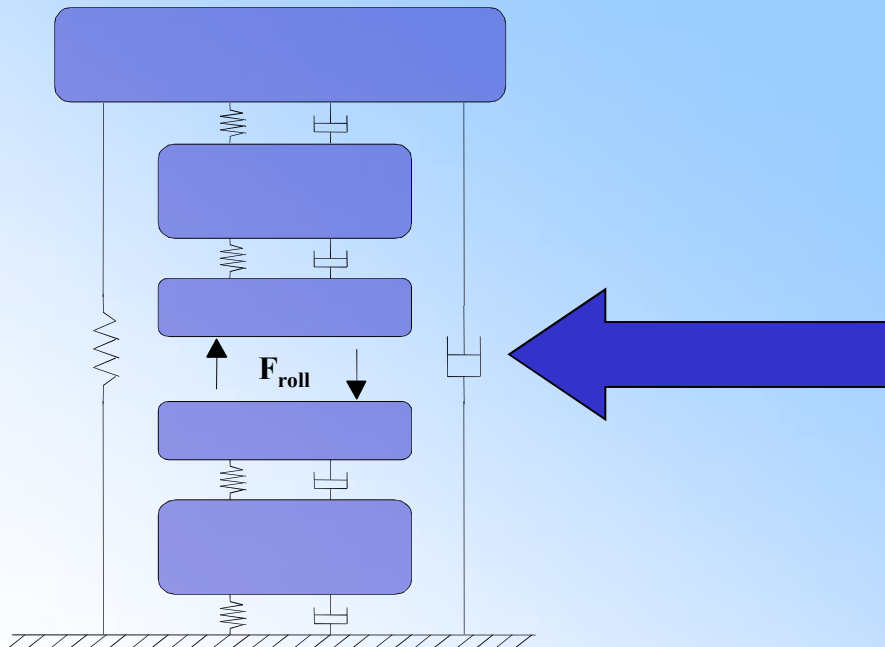
Considera: le proprietà elastiche e inerziali della gabbia, la rigidità di contatto tra i cilindri di lavoro, cuscini a strisciamento e gli altri componenti meccanici dello stand.

Modelli lineari:

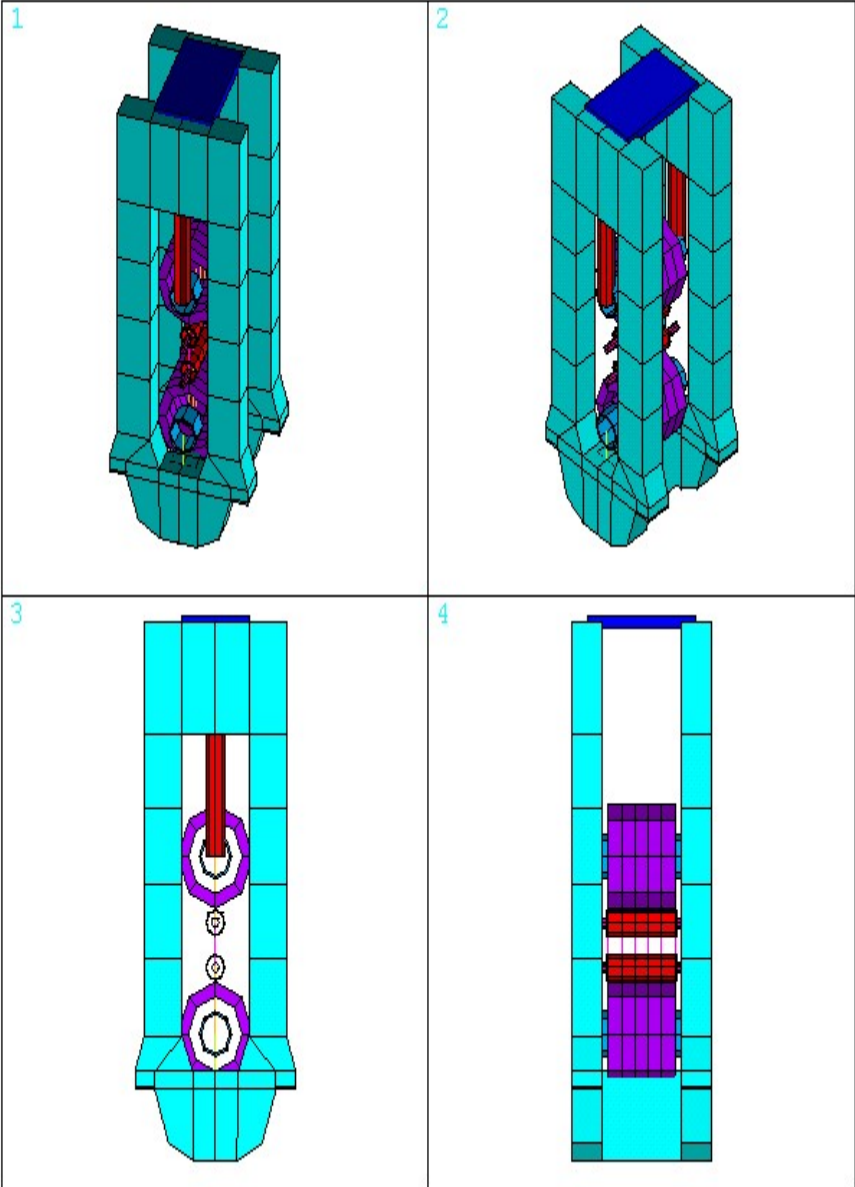
- modello a parametri concentrati con 5 gradi di libertà;
- modello FEM.

Risultati dell'analisi modale: frequenze naturali (Hz)

Modello	I freq.	II freq.	III freq.	IV freq.	V freq.
Modello con 5 GdL	85,11	128,03	270,04	430,79	531,36
Modello FEM	79,74	120,14	250,07	314,05	537,94

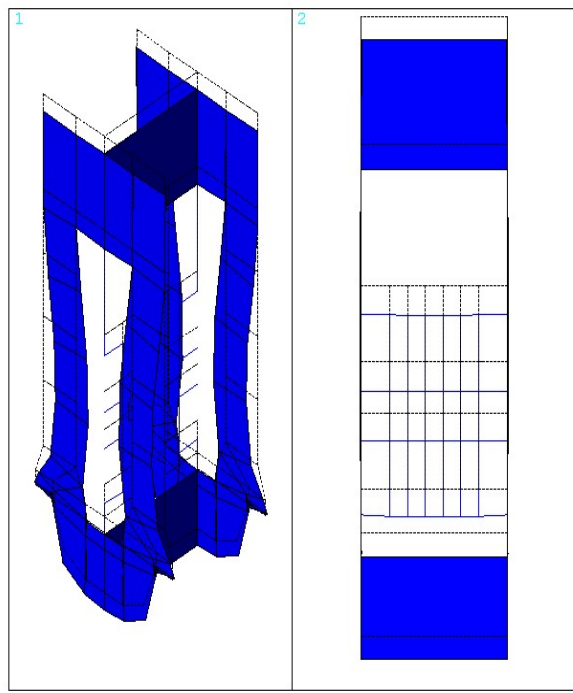


Modello FEM 3D dello stand di laminazione



ANSYS 5.5.1
AUG 26 1999
11:09:45
ELEMENTS
REAL NUM

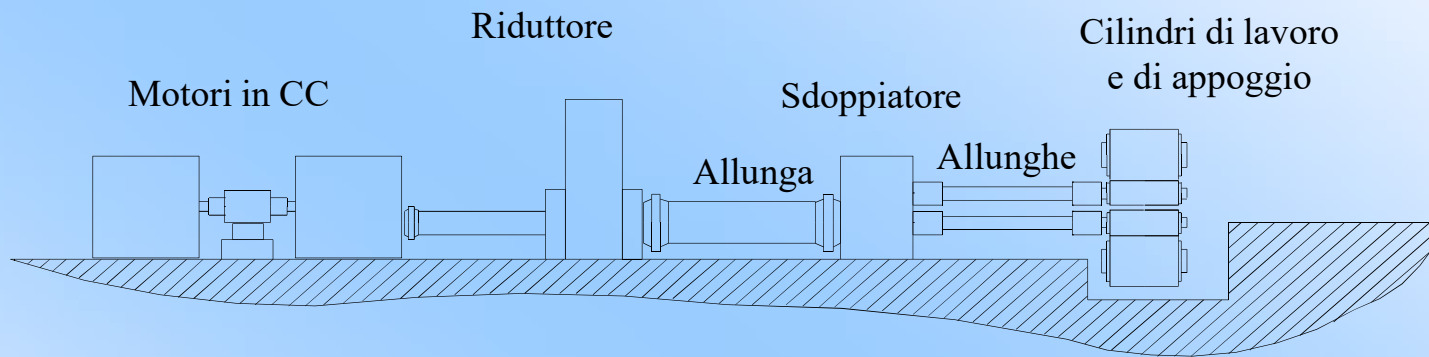
Deformata relativa alla prima frequenza propria della gabbia (79.75 Hz)



ANSYS 5.5.1
AUG 26 1999
10:37:08
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =23
FREQ=79.747
RSYS=0
DMX =.002125
SEPC=88.792

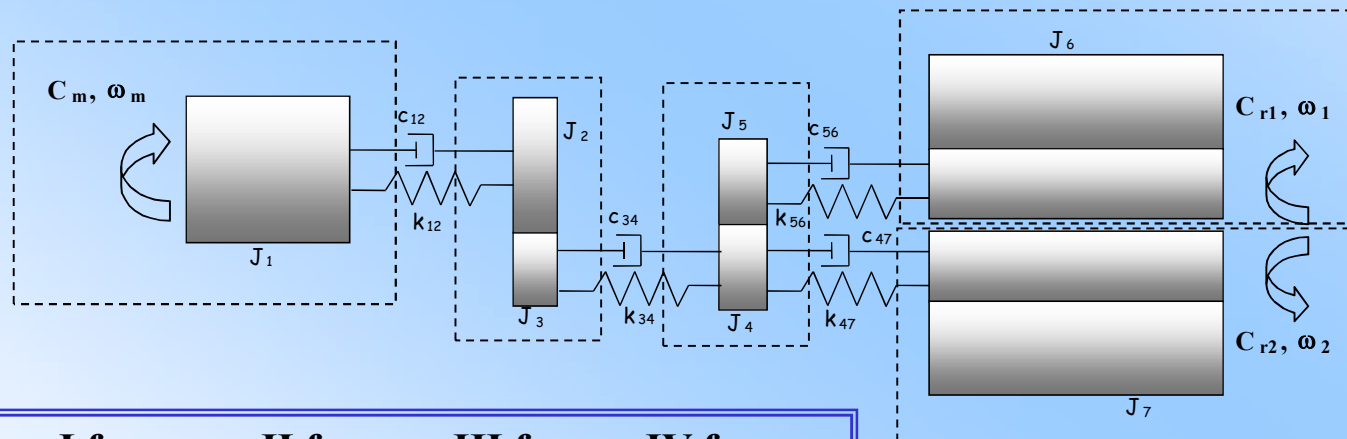
Sottosistema 2: sistema di trasmissione della potenza

Generalmente uno o due motori in CC in serie movimentano un riduttore, collegato tramite una allunga ad uno sdoppiatore. La coppia di laminazione è trasmessa ai cilindri di lavoro tramite due allunghe quasi-parallele.



Modellato con sistemi a parametri concentrati con 5 e 14 gradi di libertà

Modello con
5 gradi di libertà



Frequenze naturali (Hz)

Modello	I freq.	II freq.	III freq.	IV freq.
14 GDL	13,1	21,9	44,1	48,3
5 GDL	13	21,8	43,5	47,8

Sottosistema 3: zona di deformazione plastica

Basato sulla teoria non lineare inomogenea di Orowan

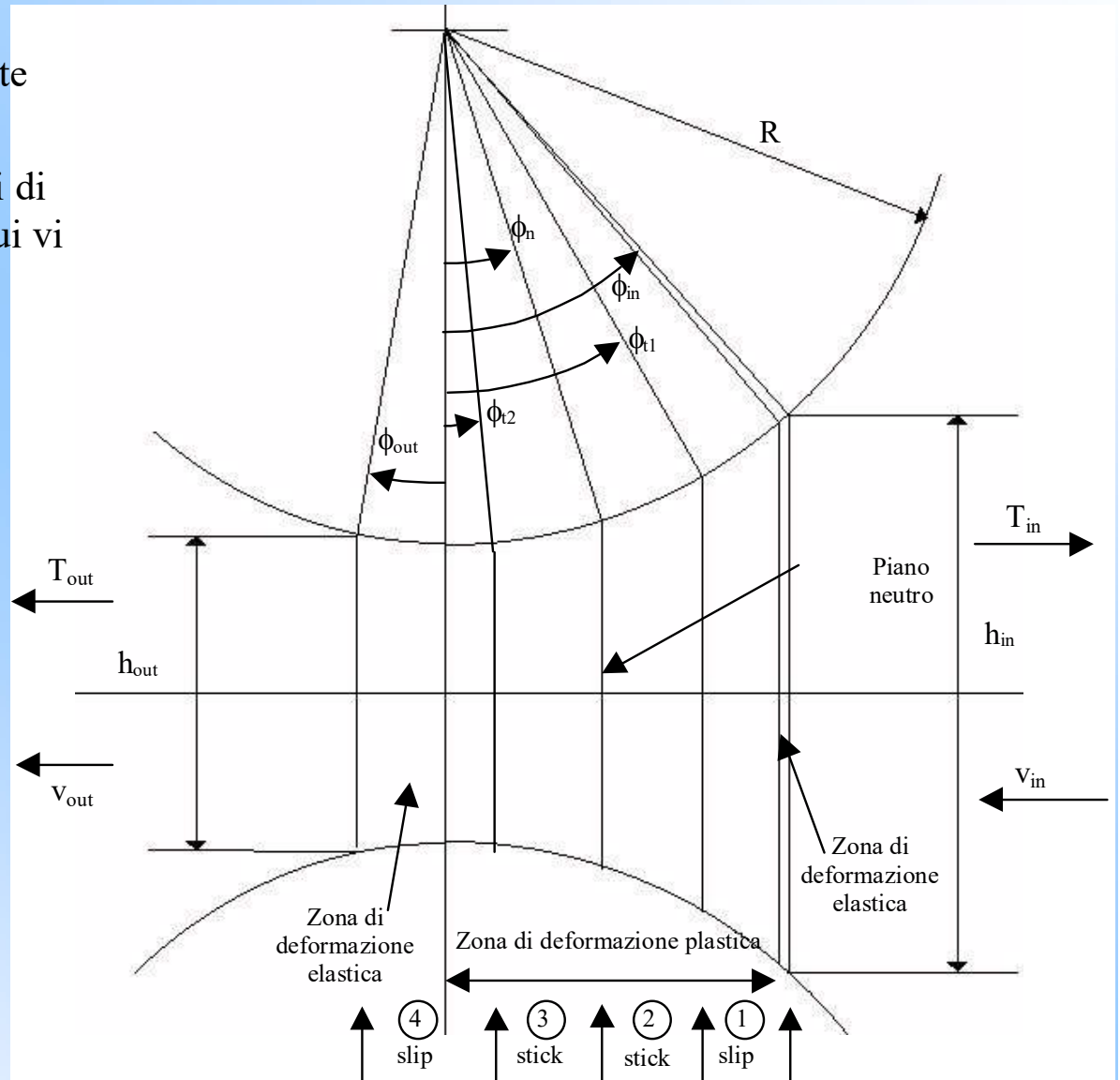
Ipotesi: Tensione di snervamento costante

Conseguenze: presenza di zone in cui l'acciaio slitta sui cilindri di lavoro (slip) ed altre in cui vi aderisce (stick)

Equazione di continuità:

$$V_{in}h_{in} = V_{out}h_{out} = V_{\phi}h_{\phi}$$

- Zona 1 (slip): la velocità del materiale in laminazione è minore della componente orizzontale della velocità periferica dei cilindri di lavoro.
 - Zona 4 (slip): (di uscita) l'acciaio è più veloce dei cilindri e le azioni di attrito cambiano verso.
 - Zone 2-3 (stick): c'è adesione tra la superficie dei cilindri di lavoro e quelle più esterne del laminato.
- La transizione tra zone di stick e slip si ha quando $\mu_s/(\sigma_s/2)=1$.



(quando la forza di attrito per unità di superficie (μ_s) assume un valore superiore alla metà della tensione di snervamento)

Distribuzione della pressione di laminazione

• **Nelle zone di slip**
$$s = \frac{f}{h} + \sigma_s \left[\omega(\phi, 1) \pm \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\tan \phi} \right) \right]^{-1}$$

• **Nelle zone di stick**
$$s = \left(\frac{f}{h} + \sigma_s \omega \right) + \left[1 \pm \mu \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\tan \phi} \right) \right]^{-1}$$

(il segno meno si riferisce alle zone comprese tra la sezione di entrata e il piano neutro)

s = pressione di laminazione

f = tensione del nastro per unità di larghezza

$$\frac{df}{d\phi} = Ds \cos \phi (\tan \phi \pm \mu)$$

$$\omega(\phi, a) = \frac{1}{\sin \phi} \int_0^\phi \sqrt{1 - \frac{a^2 \varphi^2}{\phi^2}} \cos \varphi d\varphi$$



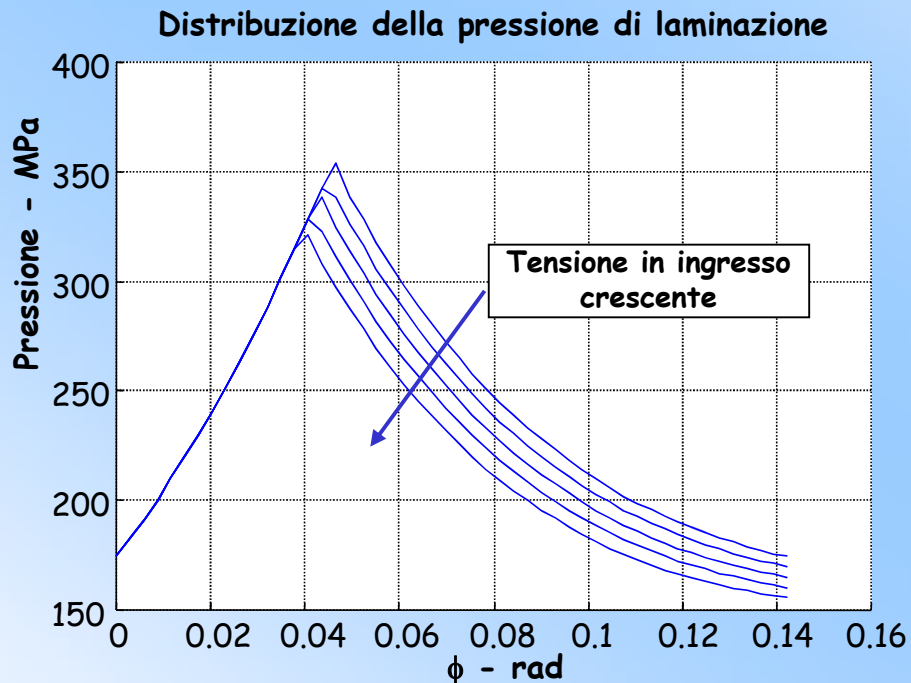
Forza di laminazione

$$F_{roll} = \int_{\phi_{in}}^{\phi_{out}} s d\phi$$

Coppia di laminazione

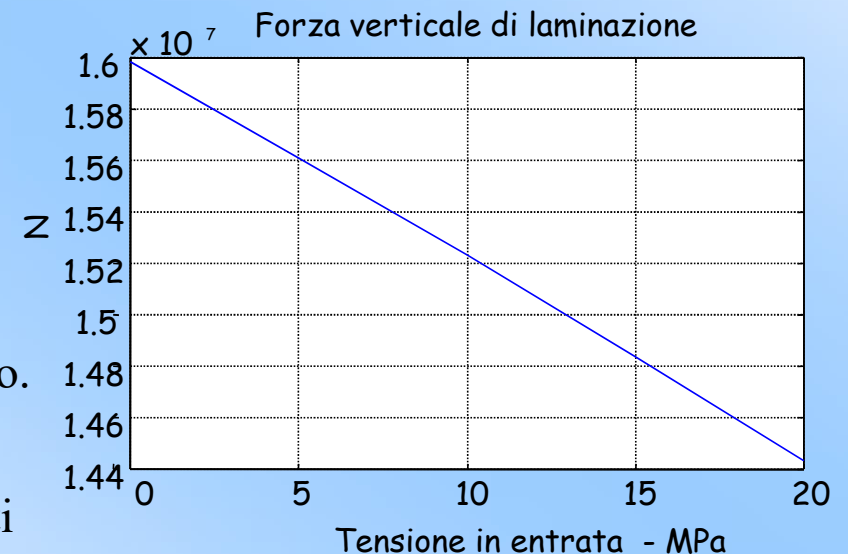
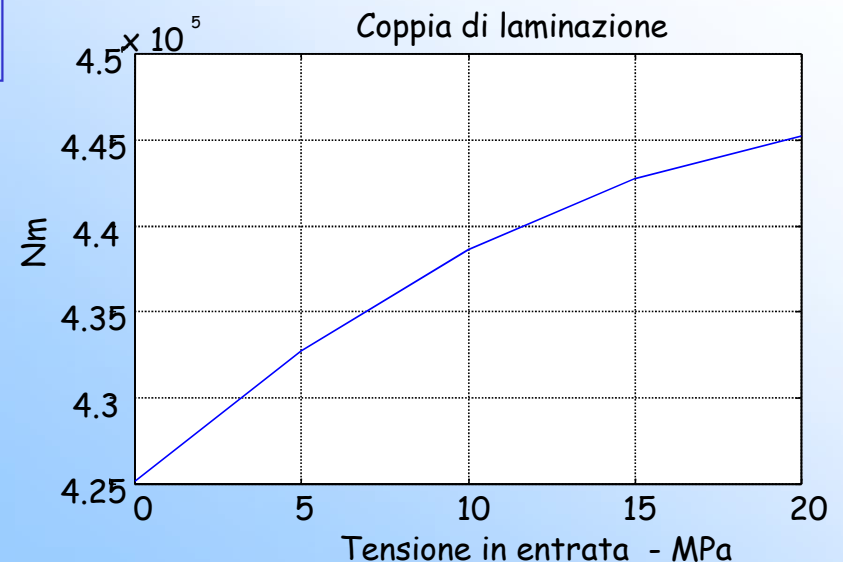
$$T_{roll} = \frac{D^2}{2} \left[\mu \left(\int_{\phi_{t1}}^{\phi_{in}} s d\phi - \int_{\phi_{out}}^{\phi_{t2}} s d\phi \right) + \frac{1}{2} \left(\int_{\phi_n}^{\phi_{t1}} \sigma_s d\phi - \int_{\phi_{t2}}^{\phi_n} \sigma_s d\phi \right) \right]$$

Distribuzione della pressione di laminazione nella zona di deformazione plastica



Le simulazioni numeriche effettuate sul modello ottenuto assemblando i sottomodelli della gabbia e della zona di deformazione plastica confermano l'importanza di un efficace sistema di controllo del tiro.

Disturbi armonici alla frequenza di 170 Hz determinano, in questo modello, fluttuazioni crescenti ed instabili dell'intergabbia (spessore del nastro).



Instabilità e cicli limite della gabbia e della trasmissione

Modello vibrazioni verticali gabbia + Forza di laminazione

- Linearizzazione dell'espressione della forza di laminazione ($F_{lam} = F_{lam}(x, v_{lam})$) per l'analisi di stabilità del modello:

$$M \{\ddot{x}\} + C \{\dot{x}\} + K \{x\} = \{F_{lam}\}$$

Solo le fluttuazioni del tiro possono determinare instabilità del processo.

- Possibilità di instaurazione di cicli limite (Metodo della prima Armonica): la monolateralità della rigidità di contatto tra cilindri e materiale in laminazione non può determinare cicli limite.

Modello vibrazioni torsionali della trasmissione + Coppia di laminazione

- Linearizzazione dell'espressione della coppia di laminazione ($C_{lam} = C_{lam}(x, \theta)$) per l'analisi di stabilità del modello:

$$J \{\ddot{\theta}\} + C_T \{\dot{\theta}\} + K_T \{\theta\} = \{C_{lam}\} \quad d = f \cdot k^* \cdot R \left\{ \frac{-2}{\sqrt{1 - \left(\frac{R + h_{out}}{R} - \frac{h_{in} v_{in}}{\omega R^2} \right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R + h_{out}}{R} - \frac{h_{in}}{R} \right)^2}} \right\}$$

Fenomeni di instabilità si possono innescare se c'è proporzionalità tra la frequenza delle oscillazioni torsionali degli organi della trasmissione e delle vibrazioni dei cilindri di lavoro.

L'effettiva insorgenza di instabilità si ha per particolari valori del parametro $\chi = d \cdot x$ (quanto maggiori sono le vibrazioni della gabbia, tanto minore deve essere il coefficiente d - attenzione a: coefficiente di attrito, tensione di snervamento e diametro cilindri di lavoro).

- Possibilità di instaurazione di cicli limite: la saturazione della coppia resistente di laminazione (il piano neutro deve tra sezione di ingresso e di uscita) non può determinare cicli limite (in condizioni di laminazione reali).

Sottosistema 4: la zona di inter-stand

Comprende:

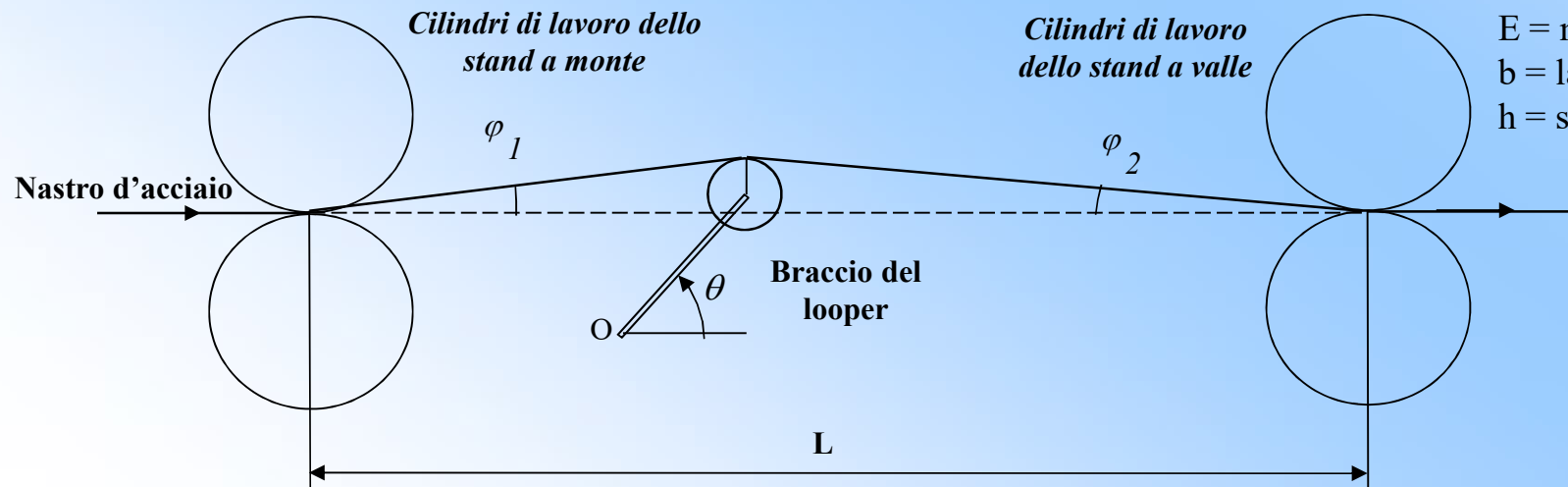
- 1) Modello per il trasferimento dello spessore tra le gabbie adiacenti;
(In sostanza riproduce il ritardo, variabile con la velocità di laminazione, tra lo spessore in uscita dalla gabbia a monte e quello in ingresso alla gabbia a valle)
- 2) Modello per il calcolo del tiro e della tensione del nastro.

Il tiro del nastro dipende da:

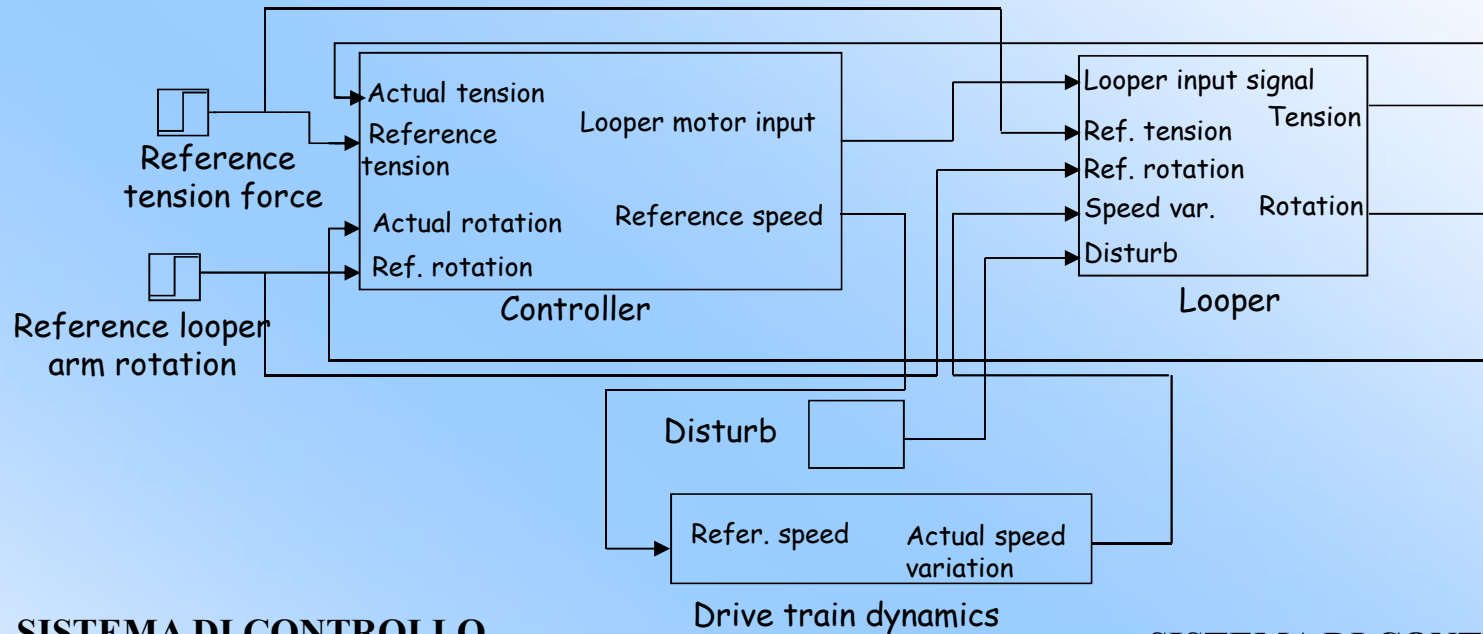
- velocità della lamiera in entrata allo stand a valle (v_{in}^{i+1});
- velocità della lamiera in uscita dallo stand a monte (v_{out}^i);
- variazioni della lunghezza totale della lamiera compresa nella zona di inter-stand introdotte dalla rotazione del looper (θ).

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Ebh}{L} \left(v_{in}^{i+1} - v_{out}^i + \frac{dL}{dt} \right) = \frac{Ebh}{L} \left(v_{in}^{i+1} - v_{out}^i + \frac{dL}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \right)$$

T = Tiro
E = modulo di Young
b = larghezza del nastro
h = spessore del nastro

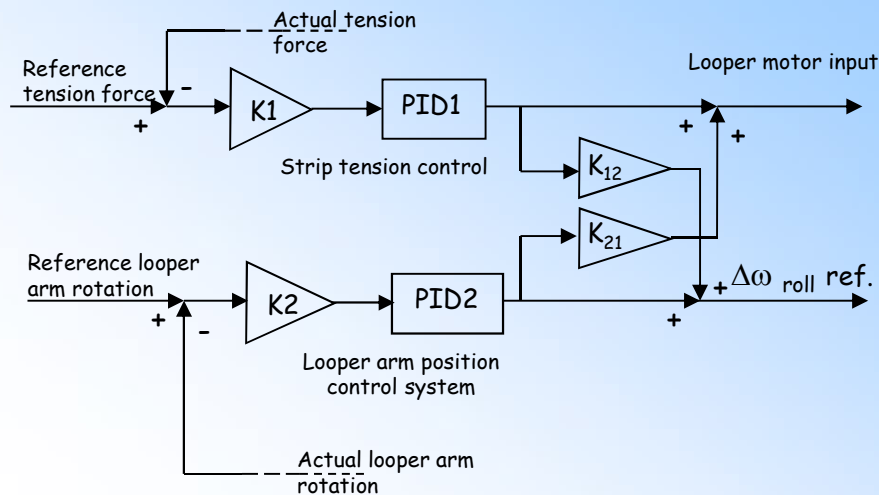


Tecniche di controllo del tiro nella regione di inter-stand



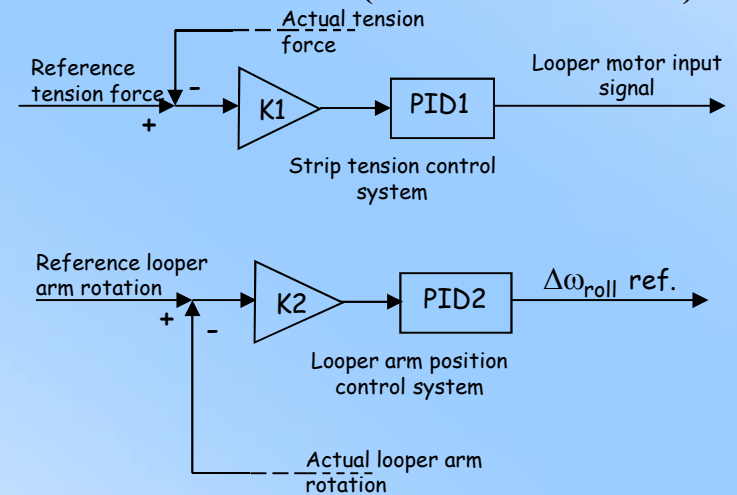
SISTEMA DI CONTROLLO

NIC (*Non Interactive Control*)



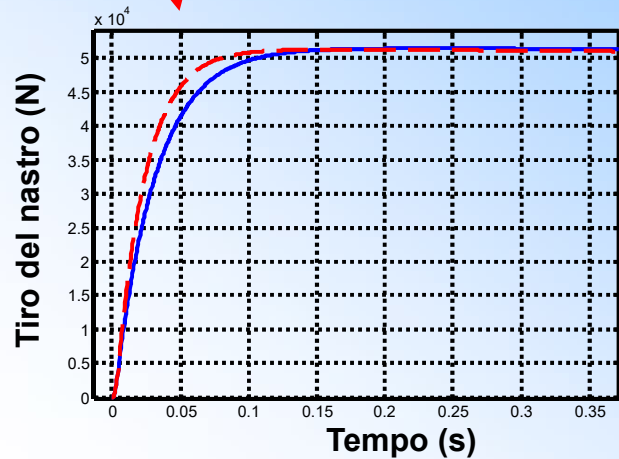
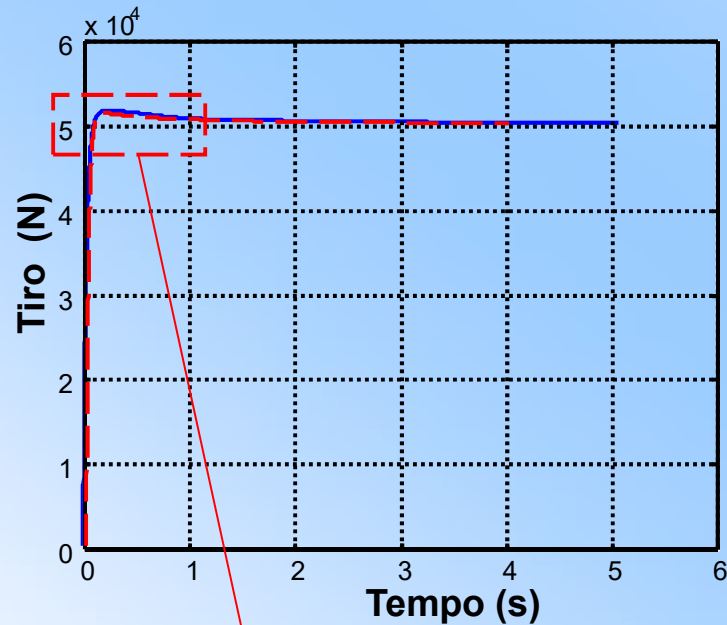
SISTEMA DI CONTROLLO

CLASSICO (DISACCOPIATO)

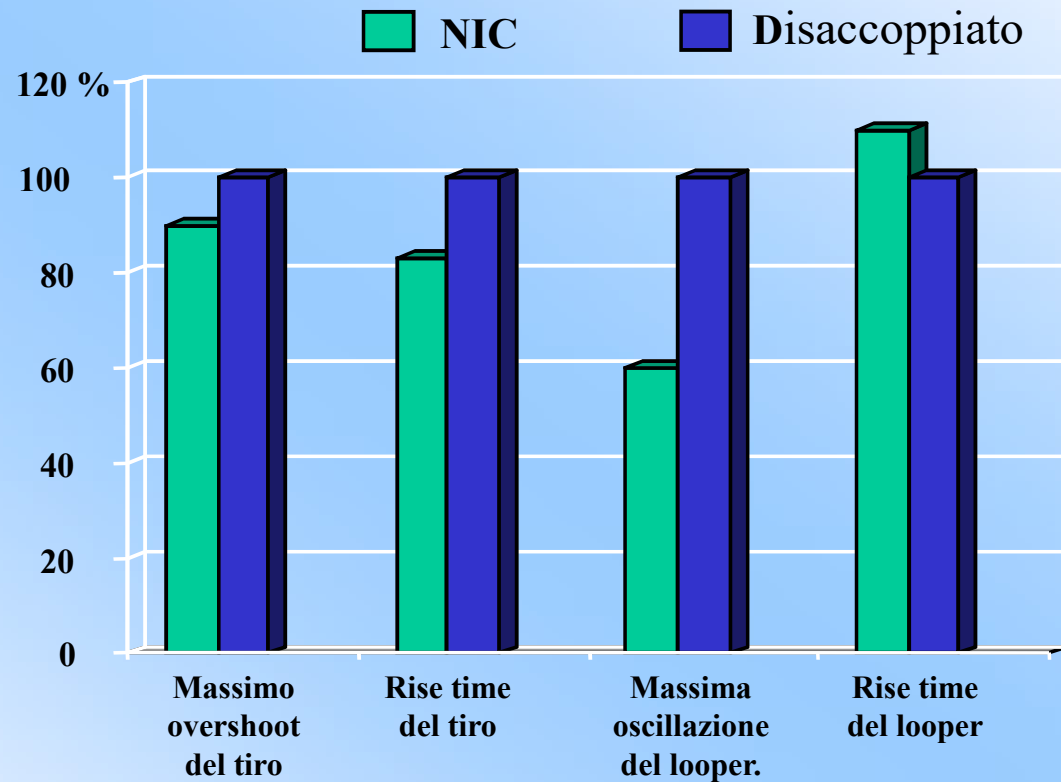


Simulazioni numeriche sul modello linearizzato di un singolo stand

Confronto tra le prestazioni dei sistemi di controllo del tiro di tipo NIC e disaccoppiato

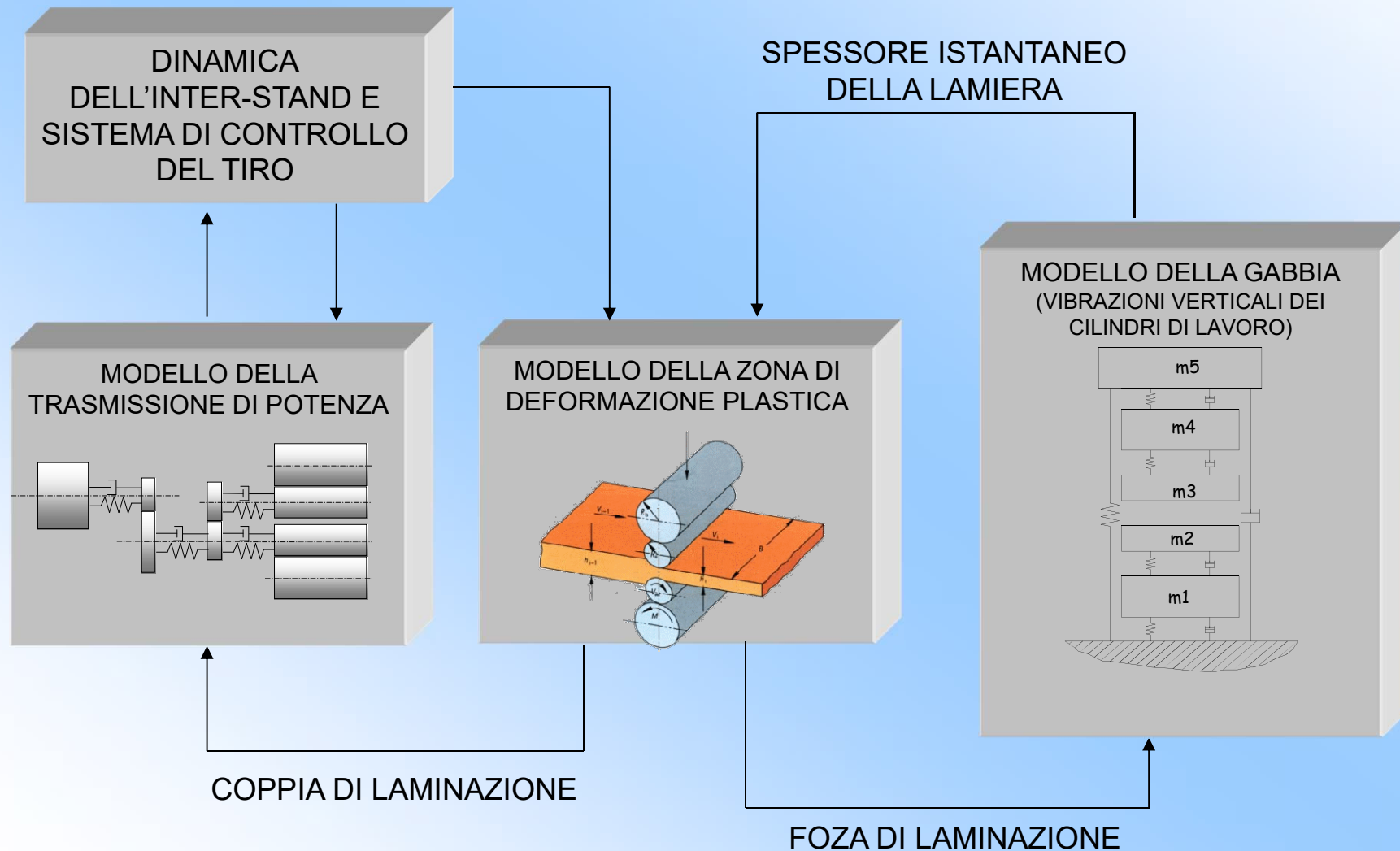


Risposta del sistema ad una variazione a gradino del tiro

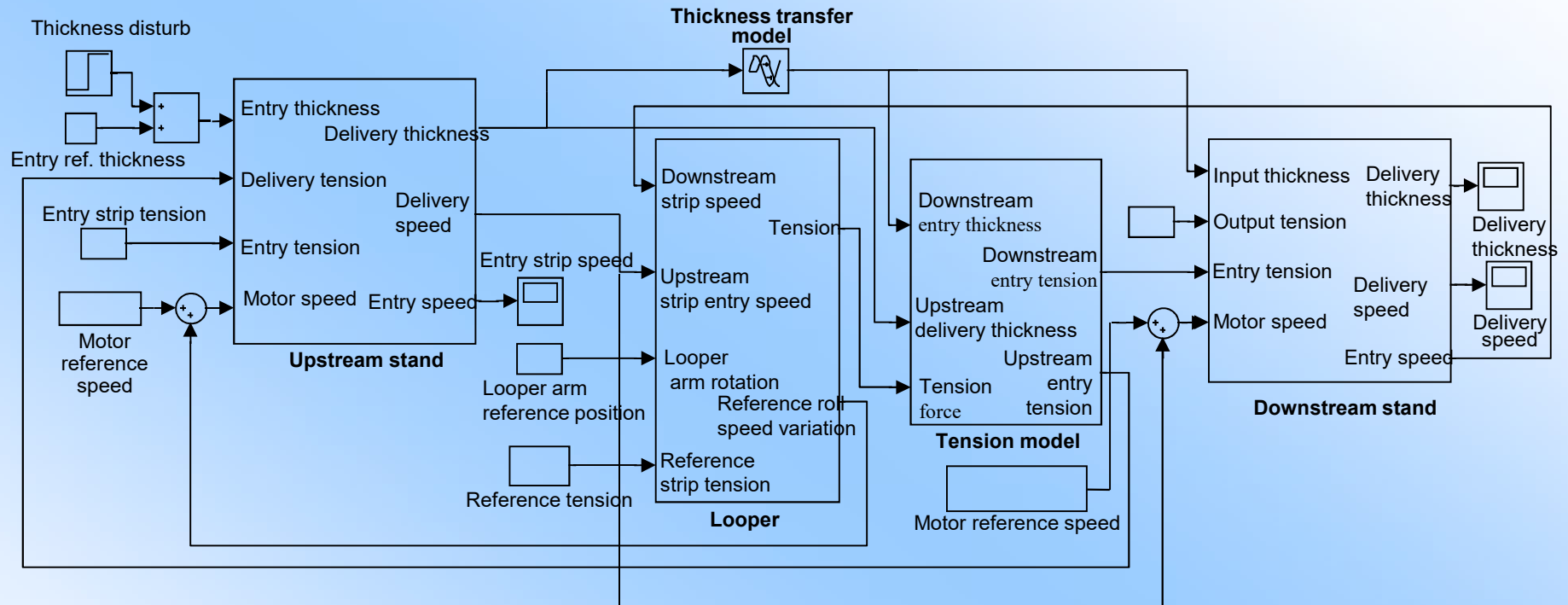


MODELLO COMPLETO NON LINEARE DELLO STAND

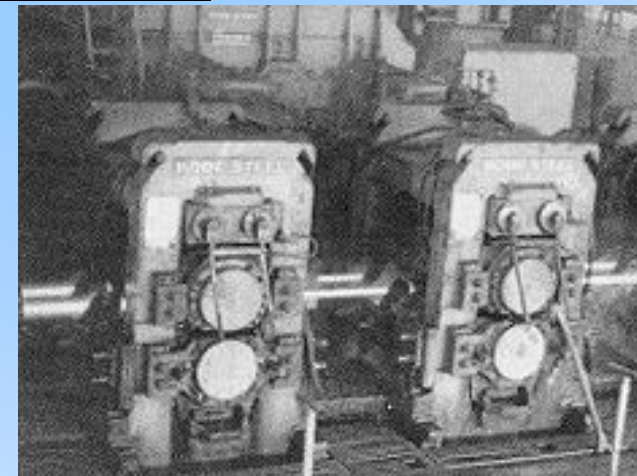
INTERAZIONI TRA I SOTTOSISTEMI



Modello SIMULINK di due stand consecutivi e del relativo inter-stand con sistema di controllo del tiro

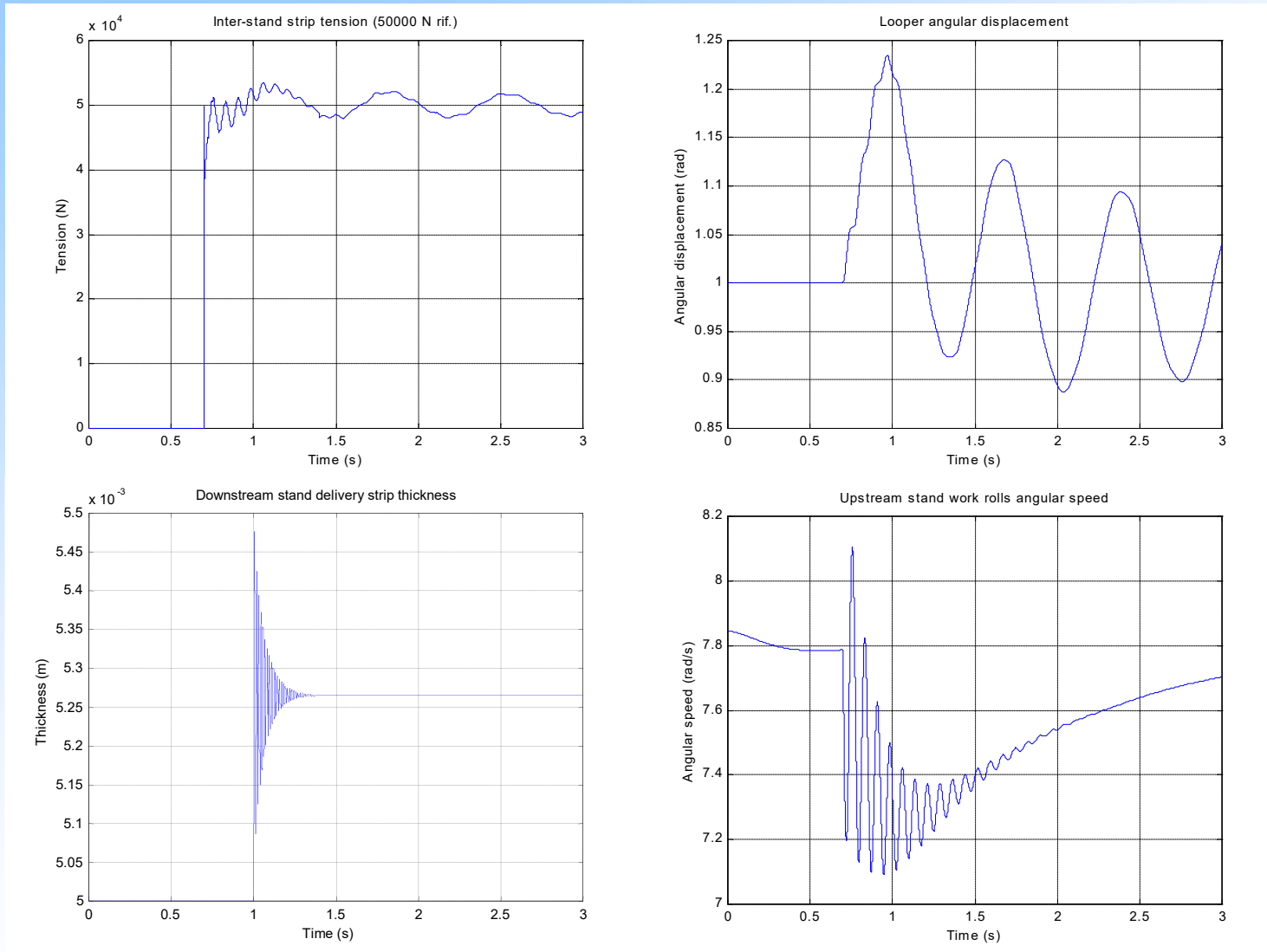


Modello con struttura modulare



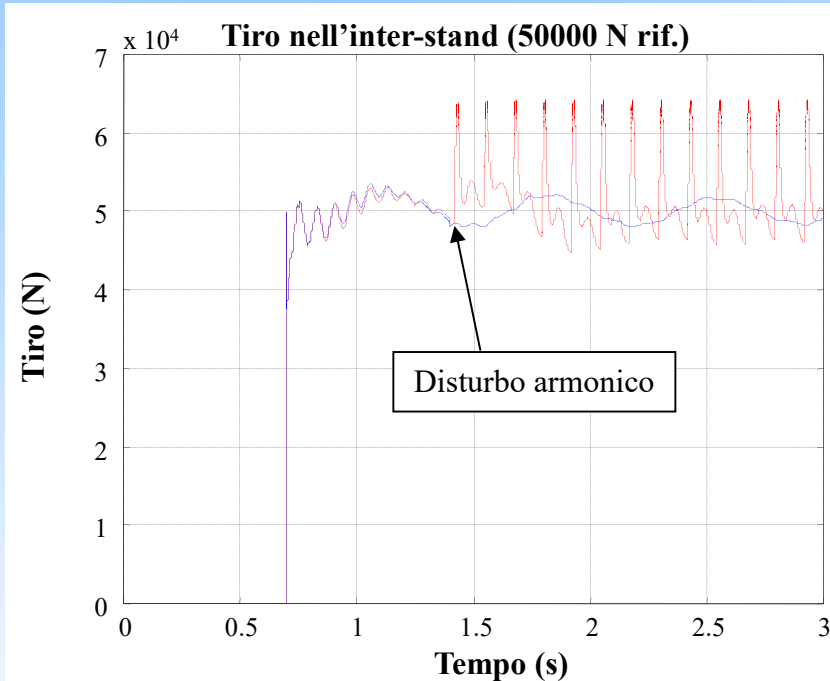
Risultati di una simulazione dinamica del comportamento delle due gabbie accoppiate in presenza del sistema di controllo del tiro di tipo disaccoppiato.

Transitorio di ingresso alla gabbia - nessun disturbo.



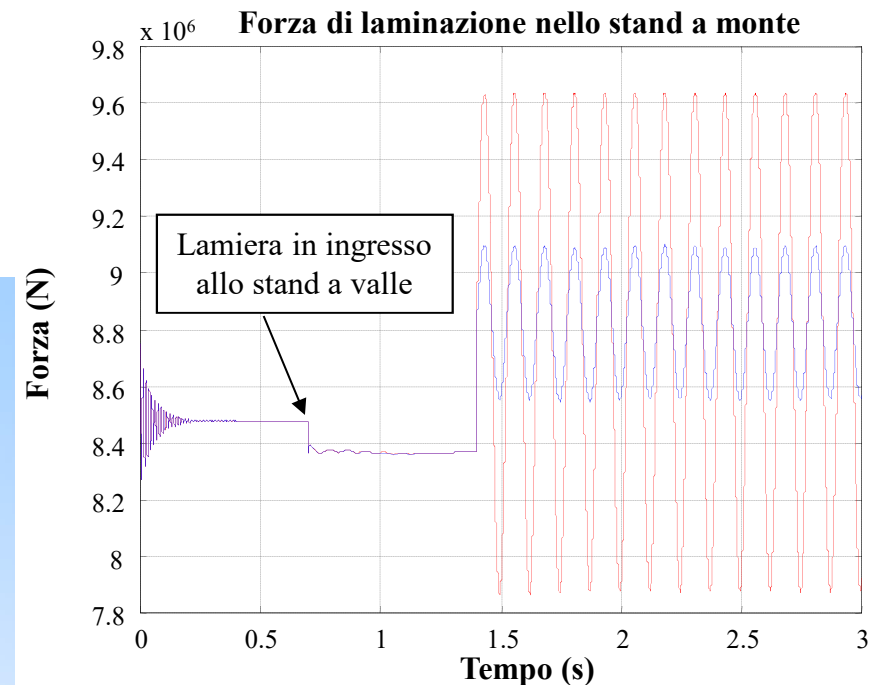
Confronto tra le prestazioni dei sistemi di controllo NIC e disaccoppiato

- Disturbi:**
- variazione a gradino dello spessore in entrata allo stand a monte (+5% spess. rif.)
 - disturbo armonico (8 Hz, $\pm 10\%$ spess. rif.) dello spessore della lamiera in entrata

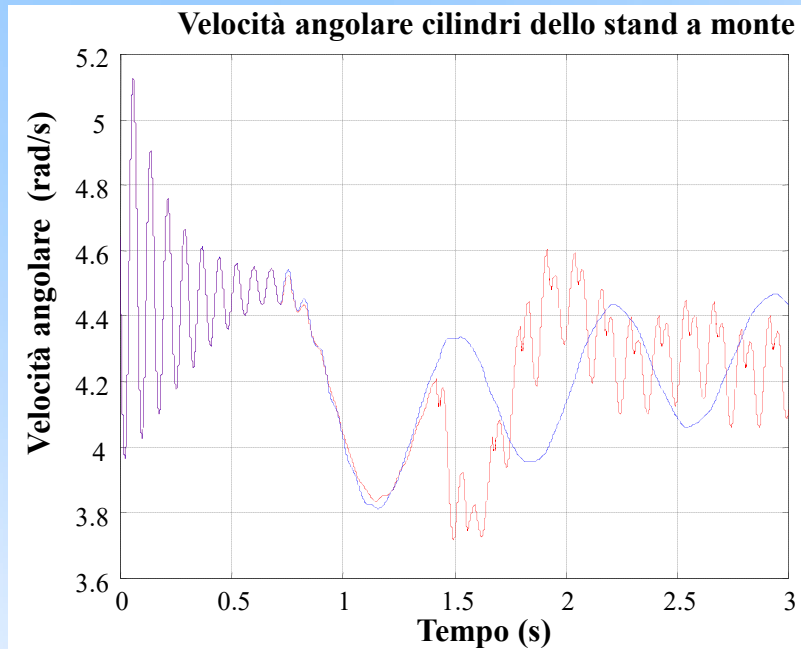


Il sistema di controllo NIC (**rosso**) determina fluttuazioni del tiro maggiori rispetto a quello disaccoppiato (**blu**). Il controllore NIC è molto sensibile a disturbi armonici a frequenze comprese tra i 5 ed i 20 Hz.

Il sistema di controllo NIC (**rosso**) determina fluttuazioni della forza di laminazione maggiori rispetto a quello disaccoppiato (**blu**): queste determinano la presenza di più ampie variazioni dello spessore del laminato.

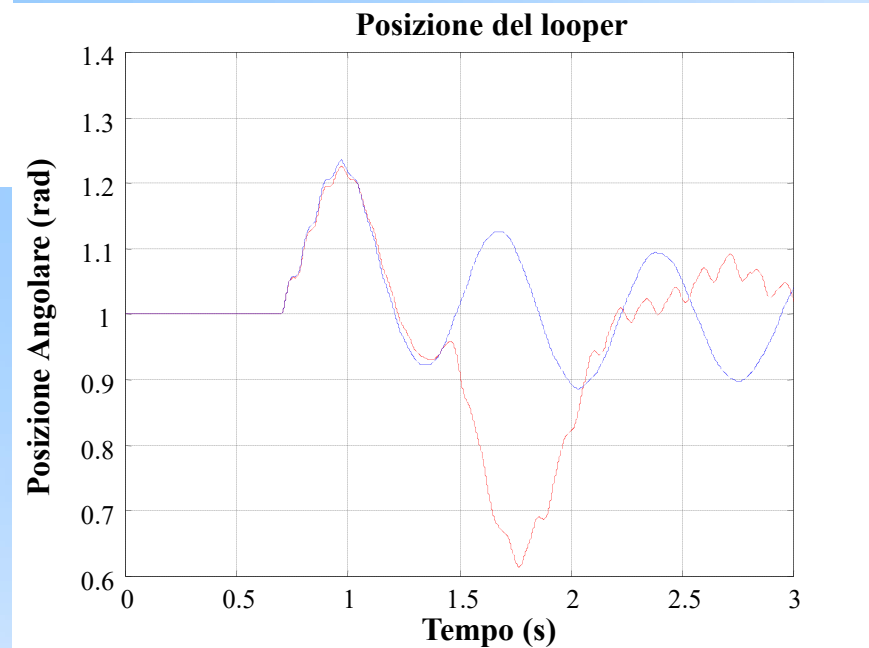


Confronto tra le prestazioni dei sistemi di controllo NIC e disaccoppiato



Il sistema di controllo del tiro di tipo NIC amplifica gli effetti dei negativi dei disturbi di tipo armonico sulla velocità dei cilindri di lavoro.

Il controllore NIC non è in grado di ridurre significativamente le oscillazioni del looper durante l'azione di controllo del tiro.



Conclusioni

- **E' stato proposto un modello non lineare di un singolo stand di laminazione;**
- **In ragione della sua struttura modulare, è possibile assemblare facilmente più stadi di laminazione ed ottenere quindi un modello per la simulazione del comportamento dinamico di un intero treno di laminazione;**
- **L'analisi modale e i risultati delle simulazioni dinamiche effettuate sui singoli sottosistemi sono in buon accordo con i risultati di analisi precedentemente effettuate sugli impianti e con i dati riportati nella letteratura scientifica;**
- **I risultati delle simulazioni confermano che, come già noto in letteratura, le fluttuazioni del tiro possono rendere instabile il processo di laminazione;**
- **Sono state verificate le prestazioni di due tipi di sistemi di controllo del tiro nell'inter-stand: quello usuale (disaccoppiato) sembra assicurare prestazioni superiori rispetto al controllore NIC;**
- **Le notevoli incertezze su alcuni parametri di laminazione (ad es. il coefficiente di attrito tra cilindri di lavoro e acciaio in laminazione e modulo di Young del materiale in laminazione variabile in funzione della temperatura) suggeriscono l'adozione di controllori MIMO di tipo più complesso per la zona di inter-stand. Per la sintesi sembra indicato l'uso di tecniche di controllo di tipo robusto.**