

# **Azionamenti Elettrici**

**Parte 4**

**Scelta e  
dimensionamento  
dell'Azionamento**

**Prof. Alberto Tonielli**

**Lezioni del Corso di Perfezionamento:**

**Macchine Automatiche  
per il Confezionamento e l'Imballaggio**

**DEIS - Università di Bologna**

**Tel. 051-2093024**

**E-mail: [atonielli@deis.unibo.it](mailto:atonielli@deis.unibo.it)**

# Indice generale del corso

---

## ■ Parte 1

- Introduzione, richiami di Controlli Automatici ed Elettrotecnica
- Generazione elettromagnetica di coppia

## ■ Parte 2

- Tipologie dei motori elettrici e dei relativi azionamenti
  - Motori ed azionamenti C.C.
  - Motori ed azionamenti Brushless (sincroni a magneti permanenti)
  - Motori ed azionamenti Asincroni ad Induzione
  - Motori passo-passo e coppia

## ■ Parte 3

- Introduzione al controllo assi

## ■ Parte 4

- **Scelta dell'azionamento**
- **Dimensionamento del motore e dell'amplificatore**
- Esempi di dimensionamento

- **Schede riassuntive delle caratteristiche dei diversi azionamenti**
- **Scelta dell'azionamento**
  - **albero decisionale**
  - **scelta della tipologia**
  - **scelta del costruttore**
  - **scelta del modello**
    - **moti uniformi**
    - **moti ciclici**
      - + **calcolo della coppia efficace (r.m.s.)**
      - + **rapporto di riduzione ottimo**
  - **problemi termici**
  - **scelta del convertitore**
  - **esempio numerico**

# Azionamenti per motore a collettore a MP

■ Regolazione	■ ottima
■ Inseguimento	■ ottimo
■ Risposta dinamica	■ eccellente
■ Extra coppia	■ 6 ÷ 8 con motori speciali
■ Extra velocità	■ No
■ Taglie	■ fino a qualche MW (non per MP)
■ Diffusione	■ ampia, in calo. No per nuovo
■ Costo	■ contenuto a bassa potenza

# Azionamenti per motore sincrono Trapezoidale

■ Regolazione	■ ottima, buona ad alta velocità
■ Inseguimento	■ buono
■ Risposta dinamica	■ buona
■ Extra coppia	■ 2 ÷ 4
■ Extra velocità	■ No
■ Taglie	■ < 5 kW
■ Diffusione	■ ampia, in calo
■ Costo	■ contenuto

# Azionamenti per motore sincrono Sinusoidale

■ Regolazione	■ ottima, cogging a bassissima veloc.
■ Inseguimento	■ eccellente
■ Risposta dinamica	■ massima (con motore a bassa inerzia)
■ Extra coppia	■ $4 \div 6$
■ Extra velocità	■ No
■ Taglie	■ $< 10$ kW
■ Diffusione	■ ampia, standard industriale
■ Costo	■ elevato, in calo

# Azionamenti per motore asincrono con Inverter

■ Regolazione	■ scadente, catena aperta
■ Inseguimento	■ scadente
■ Risposta dinamica	■ discreta, dipende dal carico
■ Extra coppia	■ 2 ÷ 4
■ Extra velocità	■ Si
■ Taglie	■ 0.5 kW ÷ 1MW
■ Diffusione	■ amplissima, standard industriale
■ Costo	■ minimo per kW

# Azionamenti per motore asincrono Vettoriale

■ Regolazione	■ eccellente
■ Inseguimento	■ eccellente
■ Risposta dinamica	■ eccellente, legg. infer. a sincro
■ Extra coppia	■ 4 ÷ 6
■ Extra velocità	■ Si
■ Taglie	■ < 500 kW
■ Diffusione	■ modesta, in grande crescita
■ Costo	■ elevato, in calo. ⇒ +15% Inverter



# Azionamenti per motore Passo passo

■ Regolazione	■ buona
■ Inseguimento	■ buono
■ Risposta dinamica	■ discreta
■ Extra coppia	■ No
■ Extra velocità	■ No, problemi alta velocità
■ Taglie	■ < 5 kW
■ Diffusione	■ ampia per piccole potenze
■ Costo	■ contenuto

# Azionamenti per motore Coppia a RV

■ Regolazione	■ ottima. posizion. $<10^{-5}$ rad
■ Inseguimento	■ ottimo
■ Risposta dinamica	■ buona. Presa diretta
■ Extra coppia	■ No
■ Extra velocità	■ No
■ Taglie	■ $< 300$ Nm
■ Diffusione	■ bassissima, Robotica
■ Costo	■ molto elevato

## Albero decisionale

Fase 1



Scelta della tipologia

**Specifiche sul movimento**  
**Classe di potenza/coppia**  
**Vincoli di costo**

Fase 2



Scelta del costruttore

**Vincoli di costo**  
**Ragioni commerciali**  
**Richieste del cliente**

Fase 3



Scelta del modello

**Dettagli sul movimento**  
**Dimensionamento motore**  
**Dimensionamento convertitore**  
**Verifiche termiche**

La scelta dell'azionamento va fatta il più presto possibile

■ vanno valutati in anticipo

- ➔ lo spazio per allocare il motore
- ➔ la necessità di raffreddarlo
- ➔ il miglior compromesso tra meccanica e azionamento
  - masse
  - momenti di inerzia
  - attriti
  - sistemi di trasmissione

# Scelta della tipologia di Azionamento

---

## Specifiche sul movimento

### ■ **Variazione di velocità' (senza retroazione)**

→ nastri, ventole, pompe, mulini, forni, trazione,..

- asincrono con Inverter o controllo diretto di coppia
- c.c. per le piccole potenze o la trazione
- passo-passo per piccole potenza

### ■ **Regolazione di velocità' (con retroazione)**

→ tessile, mandrini, macchine automatiche mono-attuatore,..

- sincrone sia trapezoidale che sinusoidale
- asincrono con Inverter, con controllo diretto di coppia o con controllo vettoriale
- c.c. per applicazioni a basso costo

# Scelta della tipologia di Azionamento

---

## Specifiche sul movimento

### ■ Regolazione di posizione ad asse singolo

- ➔ stampanti, pick and place, semplici manipolatori,..
  - sincro trapezoidale
  - sincro e asincro a controllo vettoriale
  - passo-passo per piccole potenze
    - + controllo di posizione senza sensore
- ➔ di solito serve anche una scheda assi

### ■ Inseguimento di posizione ad asse singolo

- ➔ posizionatori a singolo asse
  - sincro e asincro a controllo vettoriale
  - passo-passo per piccole potenze
- ➔ serve anche una scheda assi esterna

# Scelta della tipologia di Azionamento

---

## Specifiche sul movimento

- **Inseguimento di posizione multiasse coordinato**
  - robot, macchine utensili,...
  - sincro, asincro a controllo vettoriale
  - motore coppia a riluttanza variabile in presa diretta
  - passo passo per piccole potenze
  - serve una scheda assi esterna
- **Inseguimento di posizione multiasse sincronizzato**
  - macchine automatiche multiattuatore,...
  - sincro, asincro a controllo vettoriale
  - passo passo per le piccole potenze
  - le funzioni di sincronizzazione possono essere implementate sull'azionamento o su scheda esterna

# Scelta della tipologia di Azionamento

---

## Classe di potenza dei motori

### ■ potenza $< 1\text{kW}$

- passo passo
- sincro trapezoidale/sinusoidale
- asincrono
- motore coppia a RV

### ■ potenza $1 \div 10\text{kW}$

- sincro sinusoidale/trapezoidale
- asincrono

### ■ potenza $> 10\text{kW}$

- asincrono
- a collettore



# Scelta della tipologia di Azionamento

---

## Classe di potenza dei convertitori

- potenza  $< 1\text{kW}$  (alimentazione monofase 230V)
  - MOS-FET o IGBT
- potenza  $< 1\text{kW}$  (alimentazione trifase 400V)
  - IGBT
- potenza  $1 \div 500\text{kW}$ 
  - IGBT
- potenza  $500 \div 1000\text{kW}$ 
  - IGBT
  - GTO
- potenza  $> 1000\text{kW}$ 
  - GTO

L'azienda si serve di fornitori selezionati

- ragioni di diffusione sul mercato

- pezzi di ricambio
- assistenza

- richieste del cliente

- mercato europeo
- mercato americano
- mercato asiatico

- disponibilità dell'azionamento desiderato

- non tutti gli azionamenti sono disponibili dallo stesso costruttore

- costi

# Dimensionamento dell'azionamento

---

## Albero decisionale

- **descrizione del tipo di movimento**
  - ➔ movimenti uniformi
  - ➔ movimenti ciclici
- **dimensionamento del motore**
  - ➔ velocità massima/extravelocità
  - ➔ potenza
- **dimensionamento del convertitore**
  - ➔ corrente/extracorrente

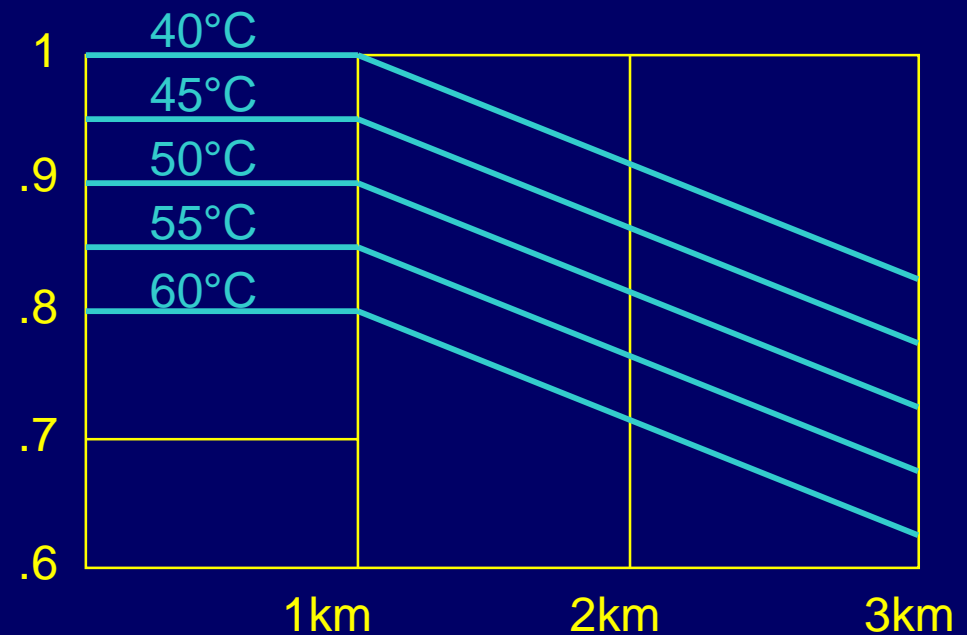
# Dimensionamento dell'azionamento

## Utilizzo di azionamenti in condizioni operative non standard

- altezza (H) e temperatura ambiente (T) condizionano il raffreddamento del motore. Occorre tenerne conto con coefficienti correttivi ( $\leq 1$ ) della potenza (coppia).

$$K_H \cong \begin{cases} 1 & H < 1km \\ \left(1 - \frac{H - 1000}{10000}\right) & H > 1km \end{cases}$$

$$K_T \cong \begin{cases} 1 & T < 40^\circ C \\ \left(1 - \frac{T - 40}{100}\right) & T > 40^\circ C \end{cases}$$



# Dimensionamento dell'azionamento

---

## Descrizione del tipo di movimento

### ■ Moto quasi uniforme

#### → variazione/regolazione di velocità

- il funzionamento a regime domina sui transitori
- il carico è prevalentemente dissipativo
- dimensionamento a regime (potenza)
- verifica nei transitori (coppia)

### ■ Moto ciclico

#### → inseguimento di velocità

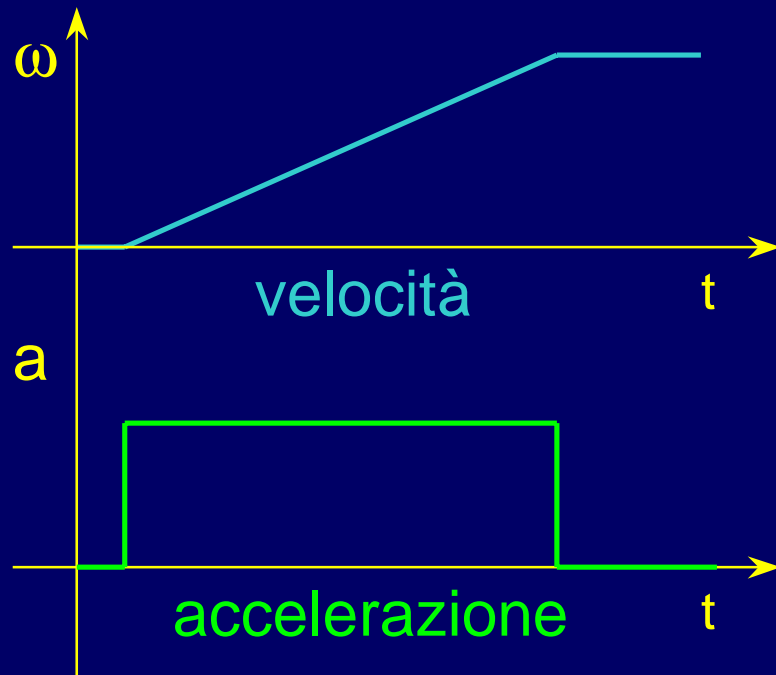
#### → regolazione/inseguimento di posizione

#### → camme/assi elettrici

- i transitori dominano il movimento
- il carico è prevalentemente inerziale
- dimensionamento in transitorio (coppia)
- verifica sul ciclo (potenza)

# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

## Profili di moto al carico



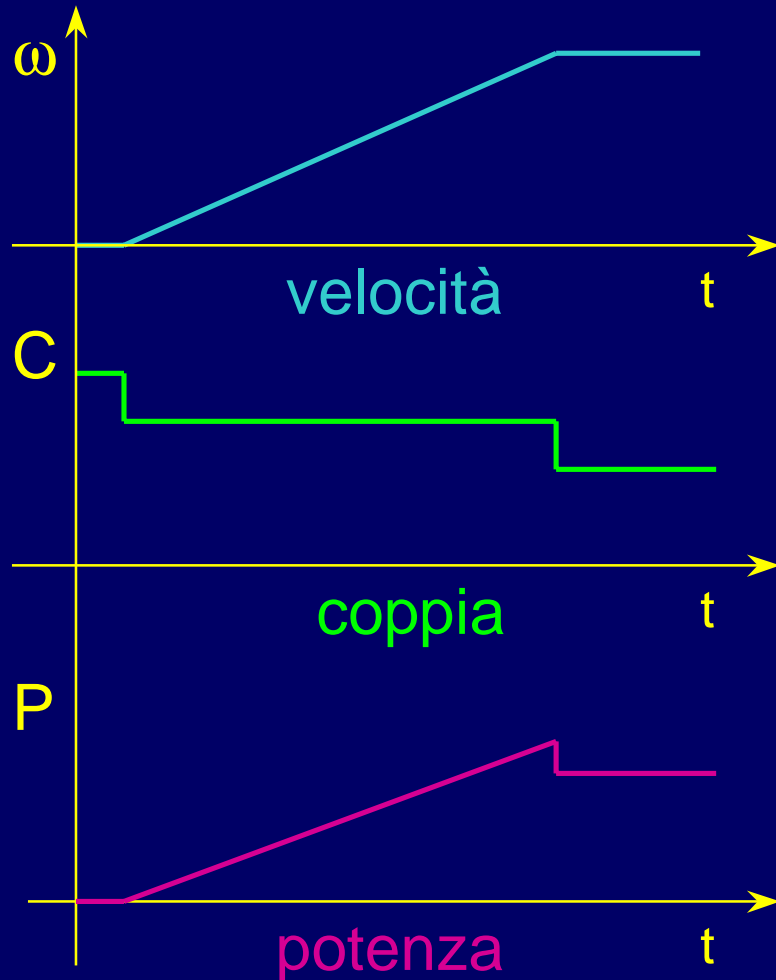
**Caso A**  
i transitori non interessano  
il carico principale  
è dissipativo

**Soluzione**  
da  
velocità max e tipo di motore  
↓  
rapporto di riduzione totale

# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

## Profili di moto

### Profili di moto al motore



**Caso A**  
i transitori non interessano  
il carico principale  
è dissipativo

**Soluzione**  
da  
velocità max e tipo di motore



rapporto di riduzione totale

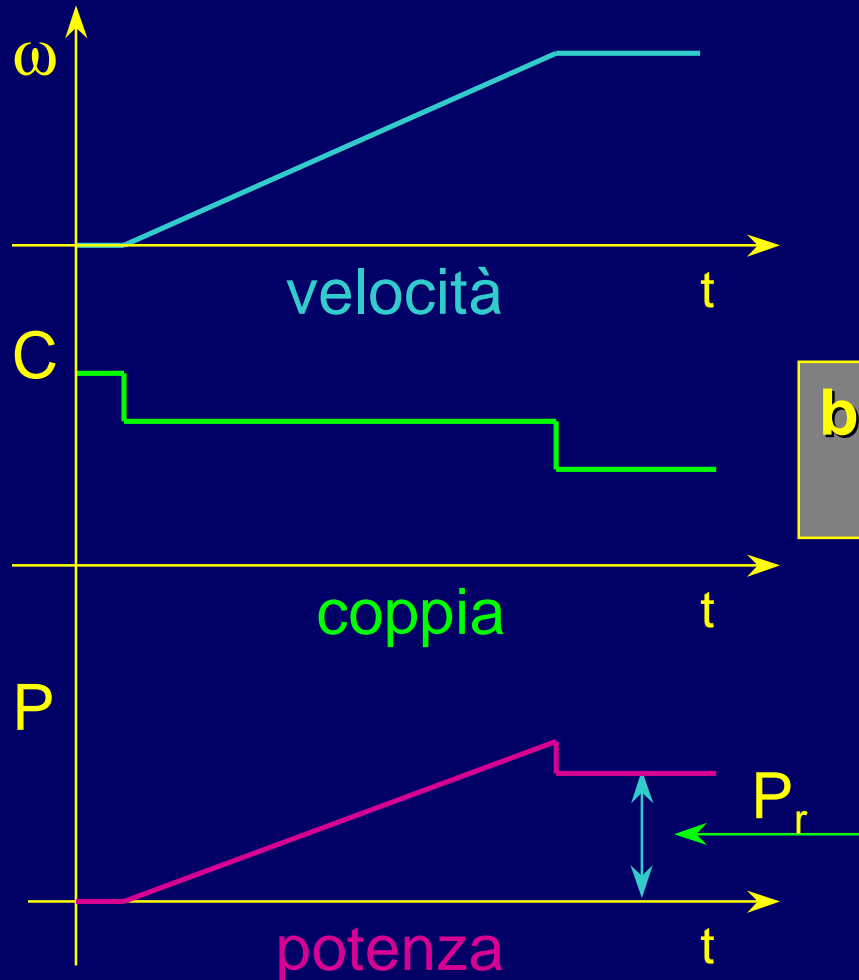


profili di coppia/potenza  
all'asse

# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

## Profili di moto

### Profili di moto al motore



### Caso A

i transitori non interessano  
il carico principale  
è dissipativo

bisogna considerare i rendimenti  
della catena cinematica

dimensionamento meccanico  
del motore

$$P_{\text{nomM}} \geq P_r / (K_H K_T)$$



# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

Il convertitore deve essere in grado di funzionare alla tensione nominale del motore e **va dimensionato per la corrente che deve erogare**  $\Rightarrow$  coppia

**Caso A**  
i transistori non interessano

$$C_{\max} < (1.5 - 2) C_{\text{nom}}$$



Il convertitore si dimensiona sul valore di coppia nominale



$$I_{n\text{ om conv}} = \frac{C_{n\text{ om}}}{k_c}$$

## Profilo di coppia al motore

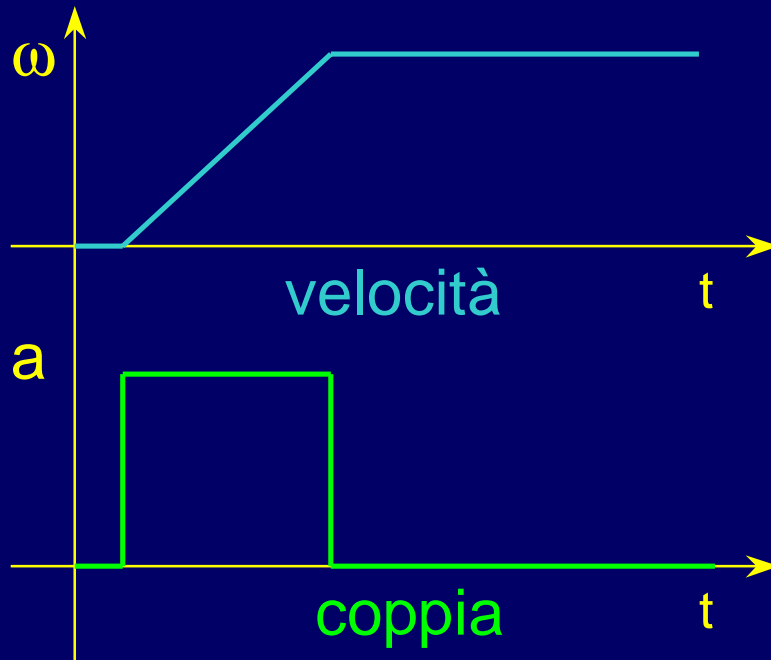


L'extra-corrente la fornisce il convertitore per un tempo limitato

# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

## Profili di moto

### Profili di moto al carico



### Caso B

- i transienti interessano
- anche il carico inerziale è significativo

### Soluzione

da

velocità max e tipo di motore

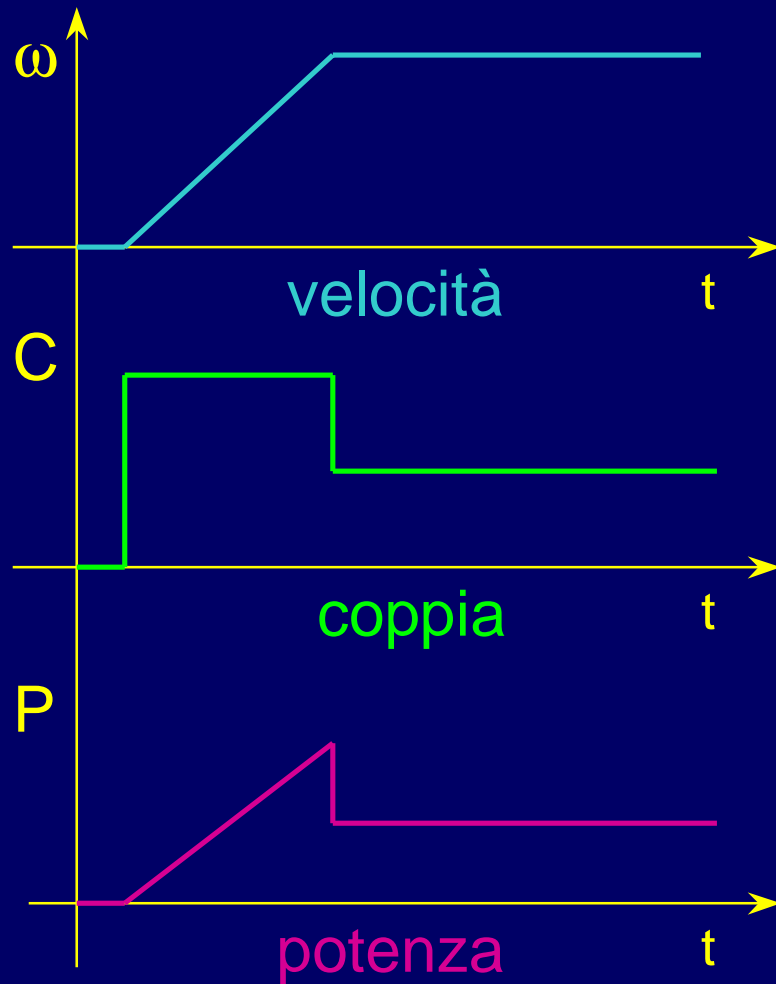


rapporto di riduzione totale

# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

## Profili di moto

### Profili di moto al motore



**Caso B**  
i transitori interessano  
anche il carico inerziale  
è significativo

**Soluzione**  
da  
velocità max e tipo di motore



rapporto di riduzione totale

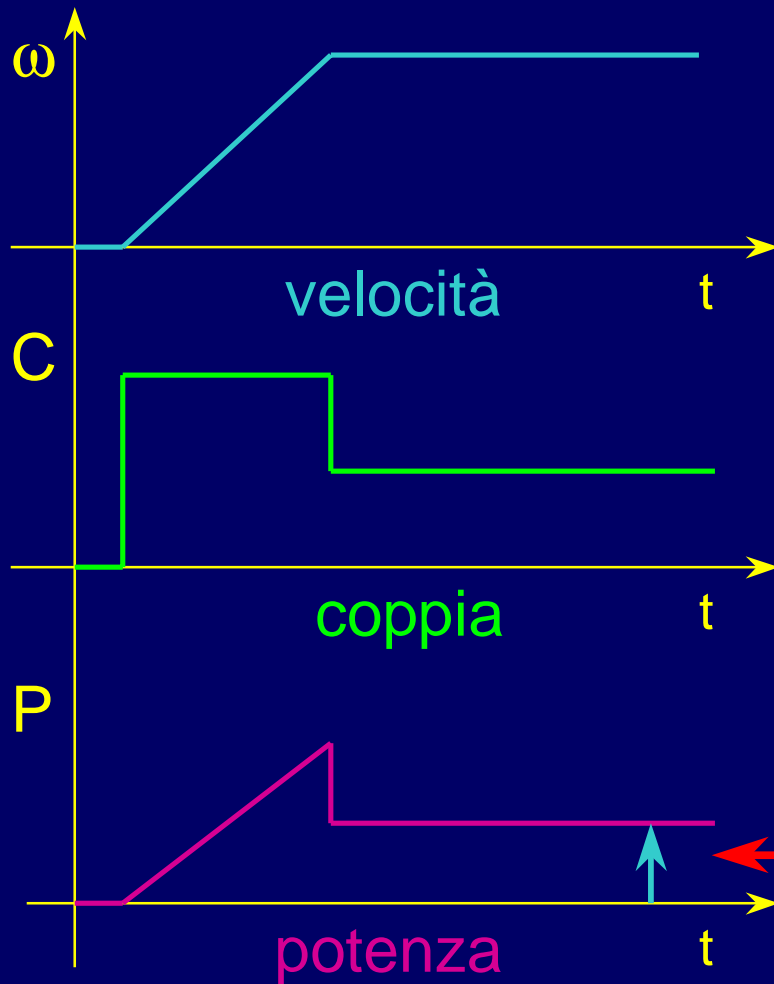


profili di coppia/potenza  
all'asse

# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

Motore

Profili di moto al motore



**Caso B**  
i transitori interessano  
anche il carico inerziale  
è significativo

bisogna considerare i rendimenti  
della catena cinematica  
e l'inerzia del rotore

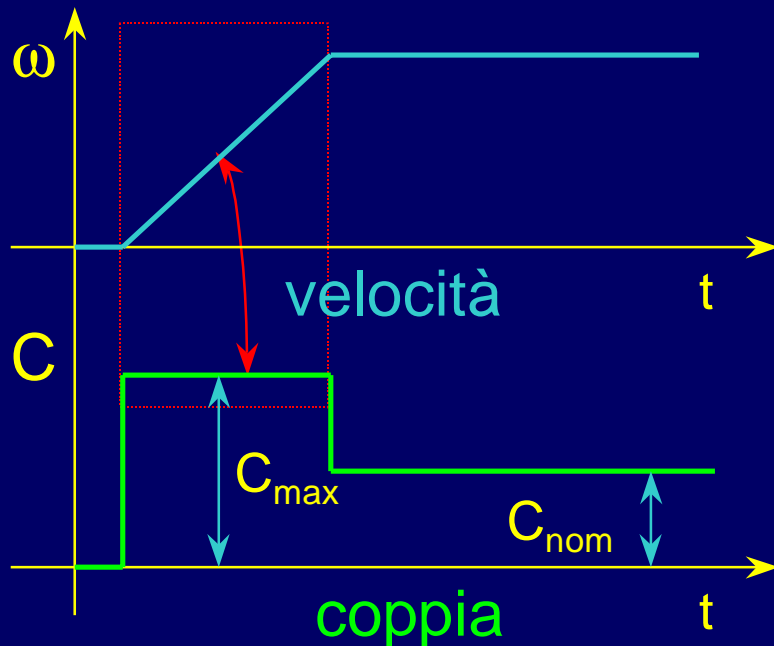
dimensionamento meccanico  
del motore

$$P_{\text{nomM}} \geq P_r / (K_H K_T)$$

# Dimensionamento dell'azionamento - moti uniformi

## Convertitore

### Profili di moto al motore



$$C_{max} \leq K_{extra} C_{nom}$$

$$I_{nom conv} = \frac{C_{nom}}{K_c}$$

$$C_{max} > K_{extra} C_{nom}$$

$$I_{nom conv} = \frac{C_{max}}{K_c K_{extra}}$$

$K_{extra}$  è la costante di extracorrente dell'azionamento

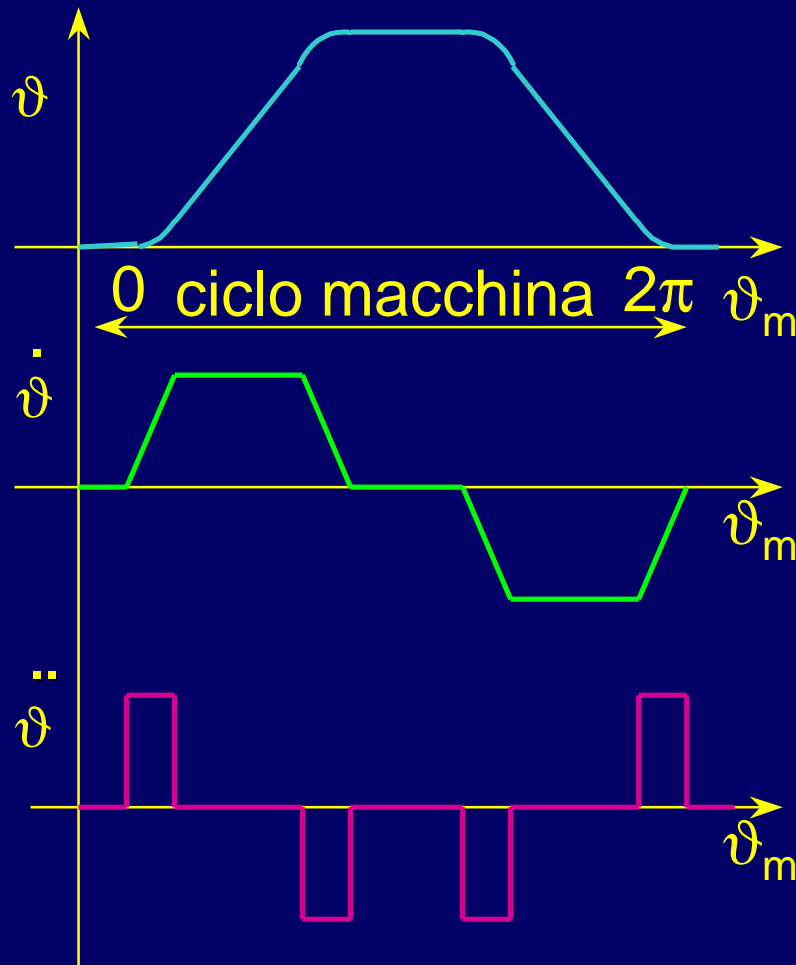
$$I_{max} = K_{extra} I_{nom}$$

per un tempo ed un numero di ripetizioni al minuto limitati

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Profili di moto

### Profili geometrici di moto



**I transistori determinano  
il dimensionamento  
il carico inerziale è dominante**

In una macchina automatica i profili di moto sono definiti in modo geometrico (posizione dell'asse Slave in funzione di quella dell'asse Master), per poter essere riutilizzati alle diverse velocità operative

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

---

Il dimensionamento di sistemi in moto ciclico è abbastanza complicato

■ **gli elementi coinvolti sono**

→ **calcolo del fattore di servizio**

- dimensionamento termico del motore

→ **scelta del rapporto di riduzione ottimale**

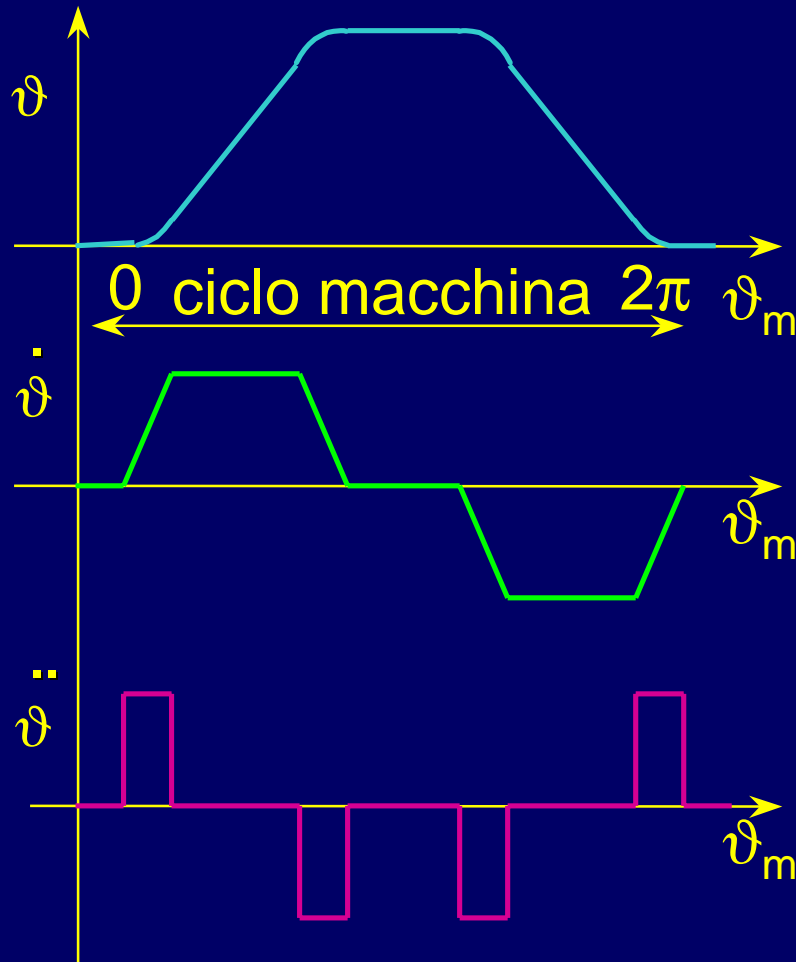
- attenzione alla velocità massima

→ **scelta dei profili di moto (approfondita in altra parte del corso)**

- scelta per favorire l'inseguimento da parte dell'azionamento
- scelta per minimizzare la coppia (massima o efficace) e/o la velocità massima
- scelta per minimizzare le vibrazioni imposte alla struttura

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Profili geometrici di moto



I transitori determinano  
il dimensionamento  
il carico inerziale è dominante

caso peggiore  
 $N_{\max}$  di battute al min.



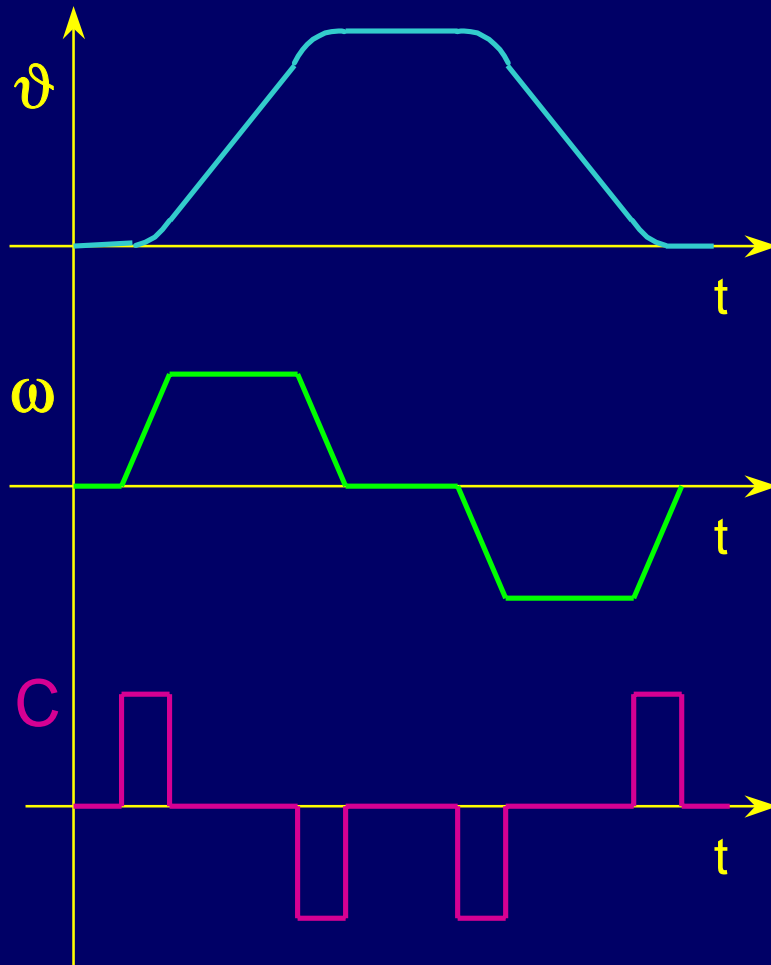
Le girate diventano tempi

La procedura di dimensionamento  
è completamente diversa da quella  
sviluppata per i moti uniformi e può  
essere iterativa



# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Profili di moto temporali



### ■ Ciclo di servizio intermittente

- Le perdite sul motore non corrispondono linearmente alla potenza trasferita al carico.
- il motore va dimensionato in coppia

### ■ Modello delle perdite

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Modello delle perdite

$$P_{diss-cu} = Ri^2$$

$$C = k_c i$$

$$P_{diss-cu} = KC^2$$



$$\bar{P}_{diss-cu} = Ri_{eff}^2$$

$$C_{eff} = k_c i_{eff}$$

$$\bar{P}_{diss-cu} = KC_{eff}^2$$

Per il motore ad induzione va reinterpretata perché non tutta la corrente produce coppia  $i = i_m + i_c$

Il motore è dimensionato in modo da raggiungere il corretto equilibrio termico quando eroga costantemente la potenza nominale

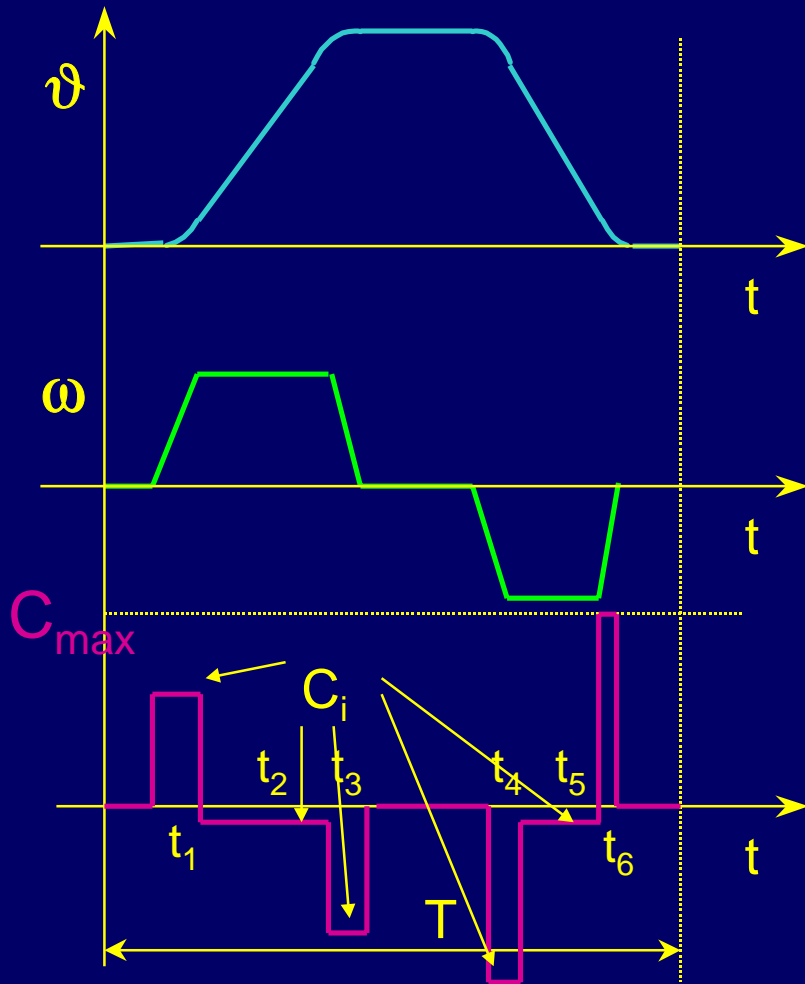


$$\bar{P}_{diss-cu} \leq P_{diss\_nom} \Rightarrow C_{eff} \leq C_{nom}$$

va calcolata

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Modello delle perdite



## Coppia efficace (r.m.s.)

$$C_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T C^2(t) dt}{T}}$$

Nel caso di profili trapezoidali di  $\omega$

$$C_{rms} = \sqrt{\frac{\sum C_i^2 * t_i}{T}}$$

se definiamo

$$C_i \equiv k_i * C_m \quad k_i \leq 1$$

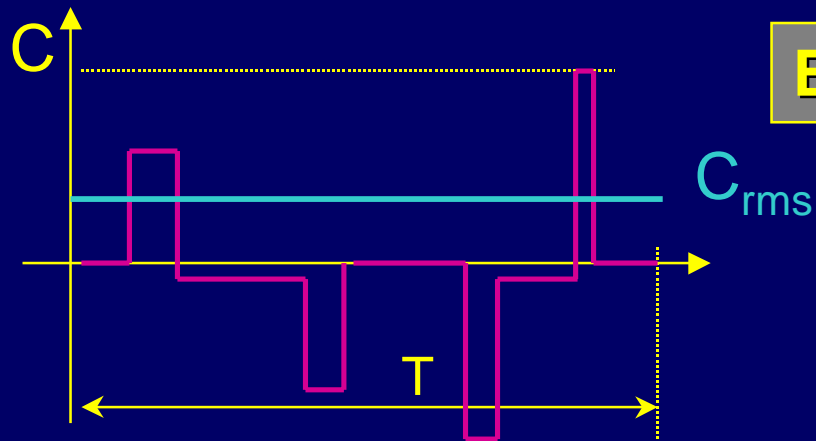
$$C_{rms} = C_{max} \sqrt{\frac{\sum k_i^2 * t_i}{T}}$$

$$C_{rms} = \sqrt{\delta} * C_{max}$$

$\delta$   
fattore di servizio

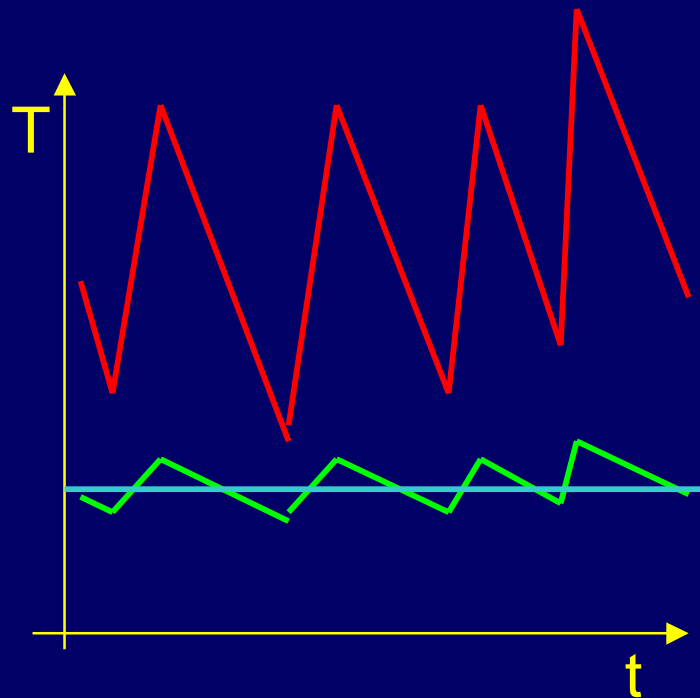
La coppia che il motore deve erogare per accelerare il carico dipende dal rapporto di accoppiamento

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici



**Effetti termici di un moto ciclico**

**Gli effetti termici del ciclo portano a dimensionare:**  
il motore  $\Rightarrow C_{rms}$   
il convertitore  $\Rightarrow C_{max}$



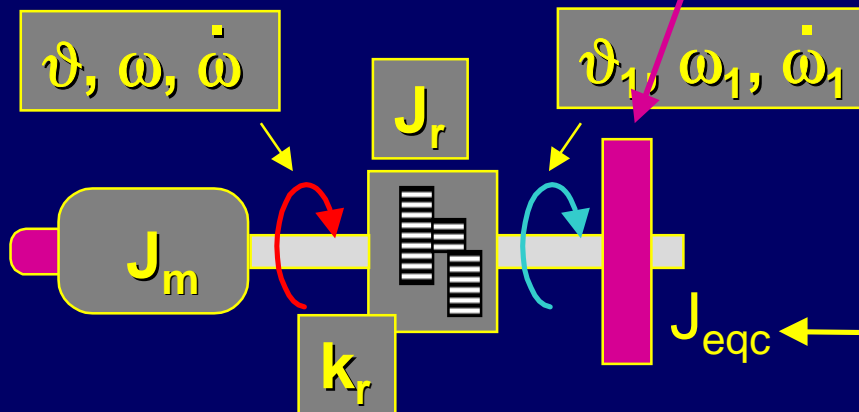
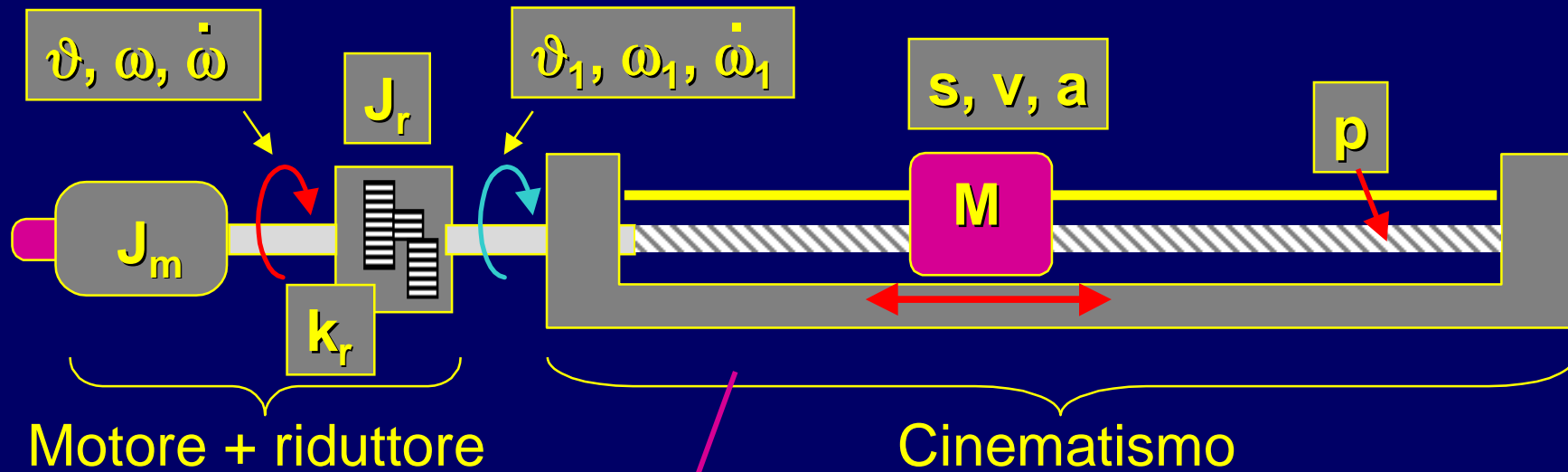
Temperatura dei transistori

Temperatura del motore

Temperatura del motore con  
 $C = \text{Costante} = C_{rms}$

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale



Per calcolare  $J_{eqc}$  sono a volte necessarie più trasformazioni successive

$J_{eqc}$  ← momento di inerzia equivalente del cinematismo

# Dimensionamento dell'azionamento

## Calcolo del momento di inerzia equivalente del cinematismo



$$e = \frac{1}{2} M v^2$$

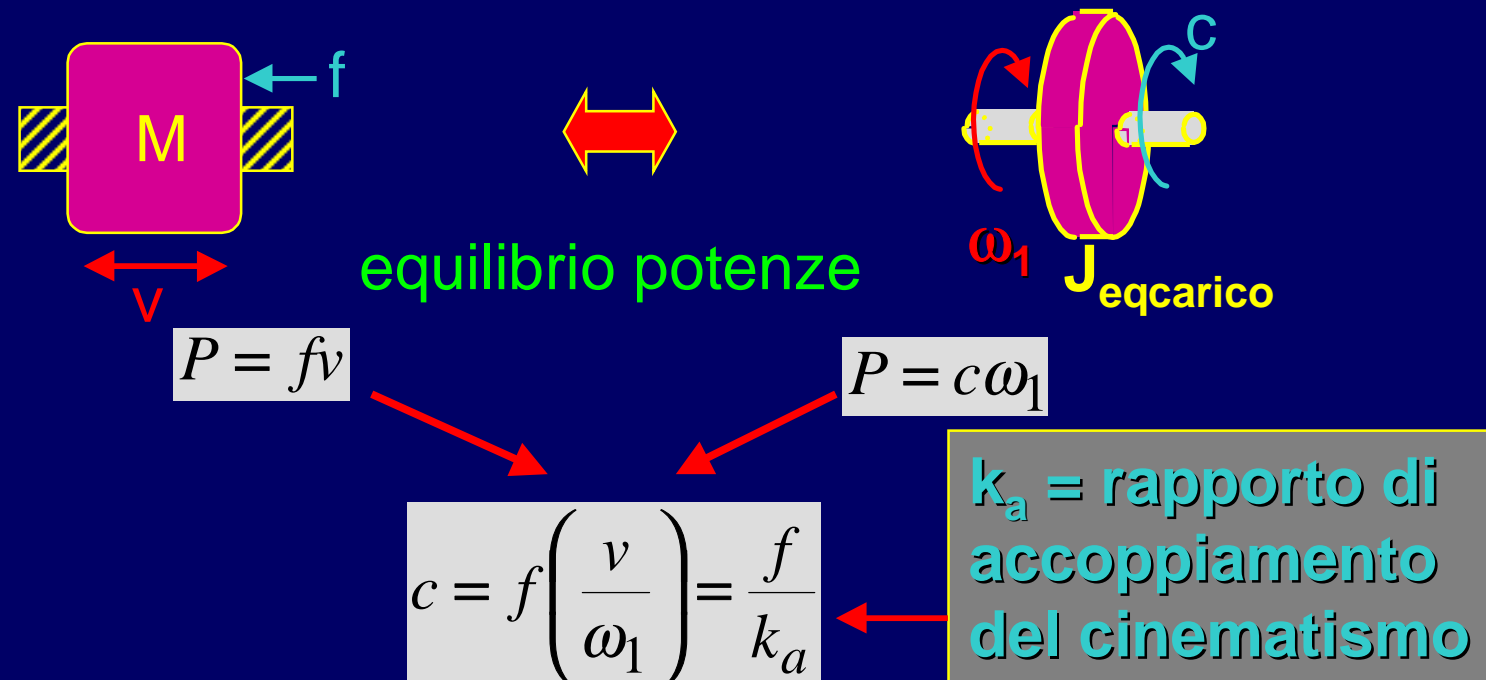
$$e = \frac{1}{2} J_{eqcarico} \omega_1^2$$

$$J_{eqcarico} = M \left( \frac{v}{\omega_1} \right)^2 = \frac{M}{k_a^2}$$

$k_a = (\omega_1/v)$  rapporto di accoppiamento del cinematismo

# Dimensionamento dell'azionamento

## Calcolo della coppia equivalente ad una forza di carico sul cinematismo



**Gli stessi calcoli energetici si possono utilizzare nel caso di carico rotante (sostituendo  $\omega_2$  a  $v$ ) o di interconnessione di un riduttore tra il motore e la vite**

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

$$C_m = (J_m + J_r)\dot{\omega} + \frac{J_{eqc}\dot{\omega}_1}{k_r} \quad \leftarrow \text{al carico}$$

$$C_m = (J_m + J_r)k_r\dot{\omega}_1 + \frac{J_{eqc}\dot{\omega}_1}{k_r}$$

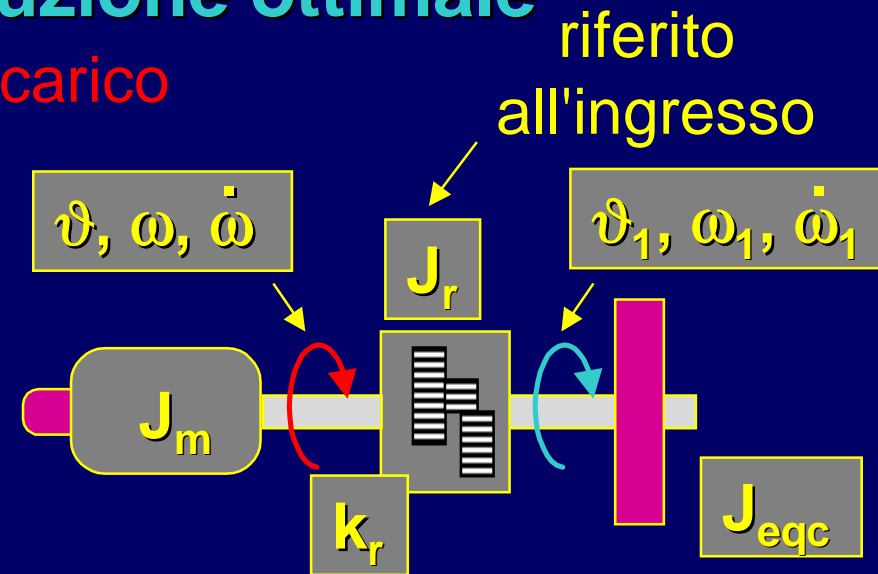
$$\frac{C_m}{\dot{\omega}_1} = (J_m + J_r)k_r + \frac{J_{eqc}}{k_r}$$

$$\min \left( \frac{C_m}{\dot{\omega}_1} \right)_{k_r} \Rightarrow \frac{d}{dk_r} \left[ (J_m + J_r)k_r + \frac{J_{eqc}}{k_r} \right] = 0 \Rightarrow (J_m + J_r) - \frac{J_{eqc}}{k_{ropt}^2} = 0$$

$$k_{ropt} = \sqrt{\frac{J_{eqc}}{J_m + J_r}}$$



$$J_m + J_r = \frac{J_{eqc}}{k_{ropt}^2} \equiv J_{eq}$$





# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

### ■ effetto di un rapporto di riduzione non ottimale

$$k_r^* \neq k_{ropt} = nk_{ropt} \quad n \geq 1/k_{ropt} \quad (k_r \geq 1)$$

$$C_m^* = \left[ (J_m + J_r)k_r^* + \frac{J_{eqc}}{k_r^*} \right] \dot{\omega}_c$$

$$C_{mopt} = \left[ (J_m + J_r)k_{ropt} + \frac{J_{eqc}}{k_{ropt}} \right] \dot{\omega}_c$$

$$\frac{C_m^*}{C_{mopt}} = \frac{\left[ (J_m + J_r)k_r^* + \frac{J_{eqc}}{k_r^*} \right] \dot{\omega}_c}{\left[ (J_m + J_r)k_{ropt} + \frac{J_{eqc}}{k_{ropt}} \right] \dot{\omega}_c} = \frac{(J_m + J_r)k_r^{*2} + J_{eqc} k_{ropt}}{(J_m + J_r)k_{ropt}^2 + J_{eqc} k_r^*}$$

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

### ■ effetto di un rapporto di riduzione non ottimale

$$\frac{C_m^*}{C_{mopt}} = \frac{(J_m + J_r)k_r^{*2} + J_{eqc} k_{ropt}}{(J_m + J_r)k_{ropt}^2 + J_{eqc} k_r^*} \rightarrow \boxed{1/n}$$

$J_{eqc}$

$$\frac{C_m^*}{C_{mopt}} = \frac{(J_m + J_r)k_r^{*2}}{2nJ_{eqc}} + \frac{1}{2n} \rightarrow (J_m + J_r)k_{ropt}^2$$

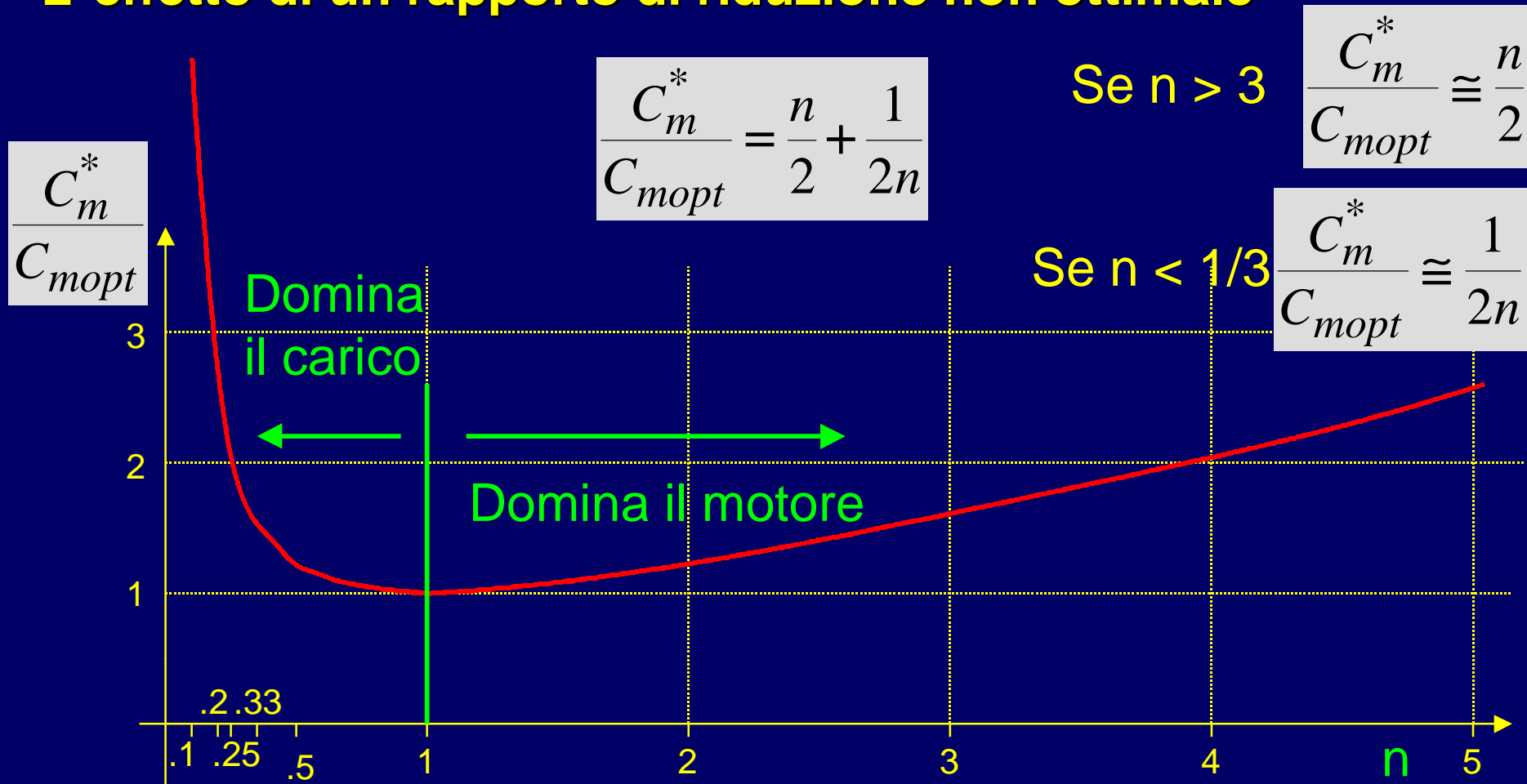
$$\frac{C_m^*}{C_{mopt}} = \frac{k_r^{*2}}{2nk_{ropt}^2} + \frac{1}{2n} \rightarrow \boxed{n^2}$$

$$\frac{C_m^*}{C_{mopt}} = \frac{n}{2} + \frac{1}{2n} = \frac{n^2 + 1}{2n}$$

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

### ■ effetto di un rapporto di riduzione non ottimale



# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

### ■ effetto di un rapporto di riduzione non ottimale

$$P^* = (J_m + J_r)\dot{\omega}_m\omega_m + J_{eqc}\dot{\omega}_c\omega_c$$

$$P^* = (J_m + J_r)k_r^*\dot{\omega}_ck_r^*\omega_c + J_{eqc}\dot{\omega}_c\omega_c$$

$$k_r^{*2} = n^2 k_{ropt}^2$$

$$P^* = \left( (J_m + J_r)n^2 k_{ropt}^2 + J_{eqc} \right) \dot{\omega}_c \omega_c$$

$$P^* = \left( n^2 J_{eqc} + J_{eqc} \right) \dot{\omega}_c \omega_c$$

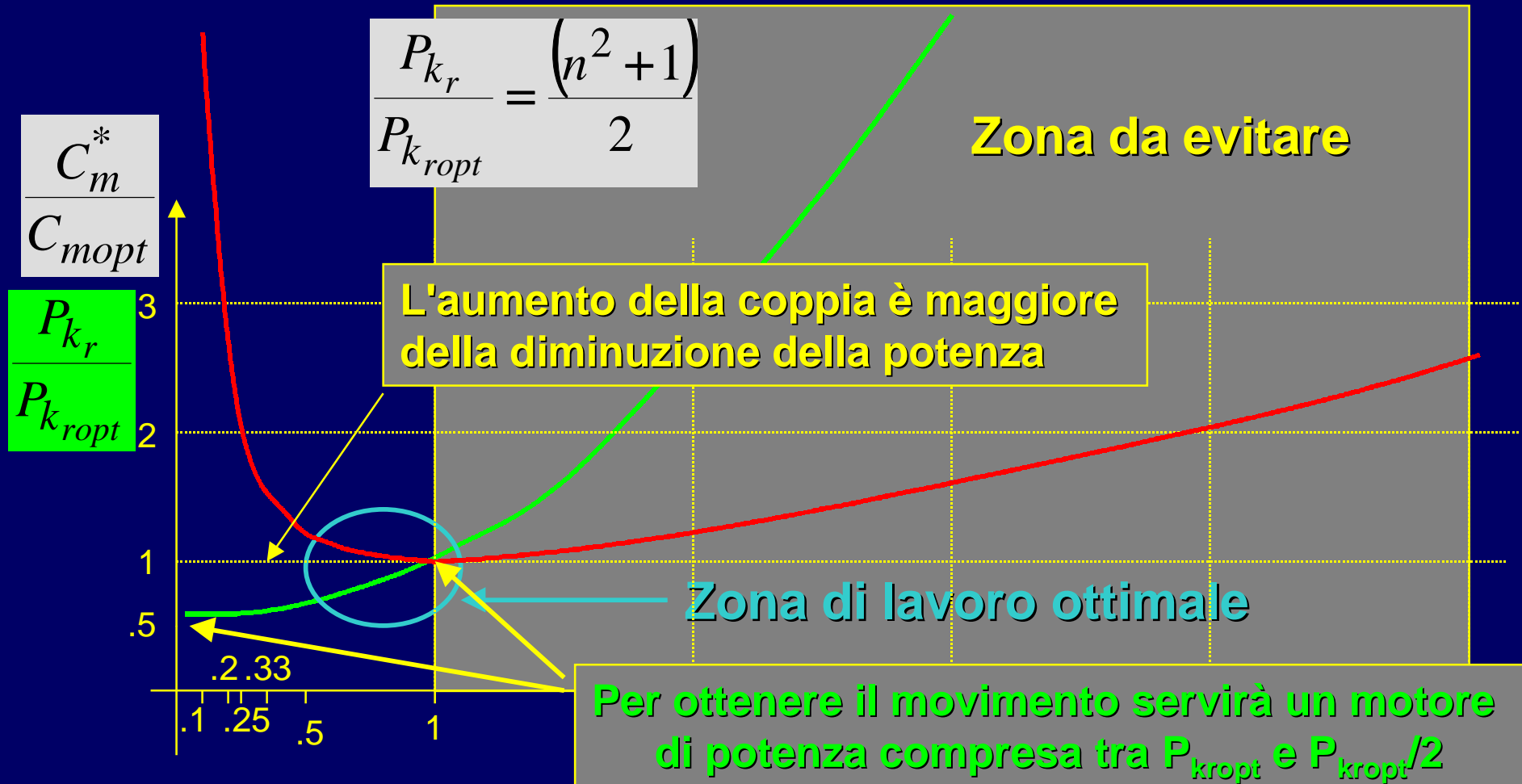
$$P^* = \left( n^2 + 1 \right) J_{eqc} \dot{\omega}_c \omega_c$$

$$\frac{P^*}{P_{k_{ropt}}} = \frac{\left( n^2 + 1 \right) J_{eqc} \dot{\omega}_c \omega_c}{2 J_{eqc} \dot{\omega}_c \omega_c} = \frac{\left( n^2 + 1 \right)}{2}$$

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

### ■ effetto di un rapporto di riduzione non ottimale



# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

- effetto di riduzione della coppia causato dal rapporto di riduzione ottimale rispetto all'accoppiamento diretto

$$C_{mopt} = \frac{2n}{1+n^2} C_{dd}$$

Se  $k_r = 1$   
 $n = 1/k_{ropt}$

direct drive

$$C_{mopt} = \frac{2/k_{ropt}}{1+1/k_{ropt}^2} C_{dd} = \frac{2k_{ropt}}{1+k_{ropt}^2} C_{dd}$$

Se  
 $k_{ropt} \gg 1$  ( $>3$ )

$$C_{mopt} \cong \left( \frac{C_{dd}}{2} \right)$$

Quando il rapporto di riduzione ottimo è grande, l'accoppiamento in presa diretta del motore è da evitare

Il rapporto di riduzione ottimo può non essere possibile in relazione alla  $\omega_{max}$  del motore



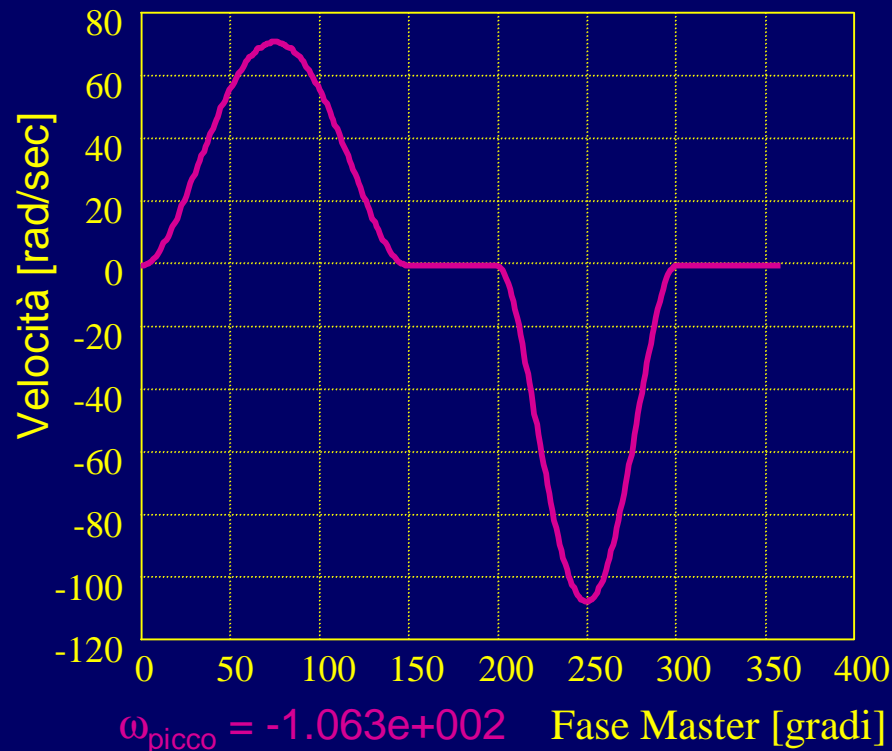
Scegliere  $k_r$  per massimizzare la velocità massima del motore nel ciclo

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

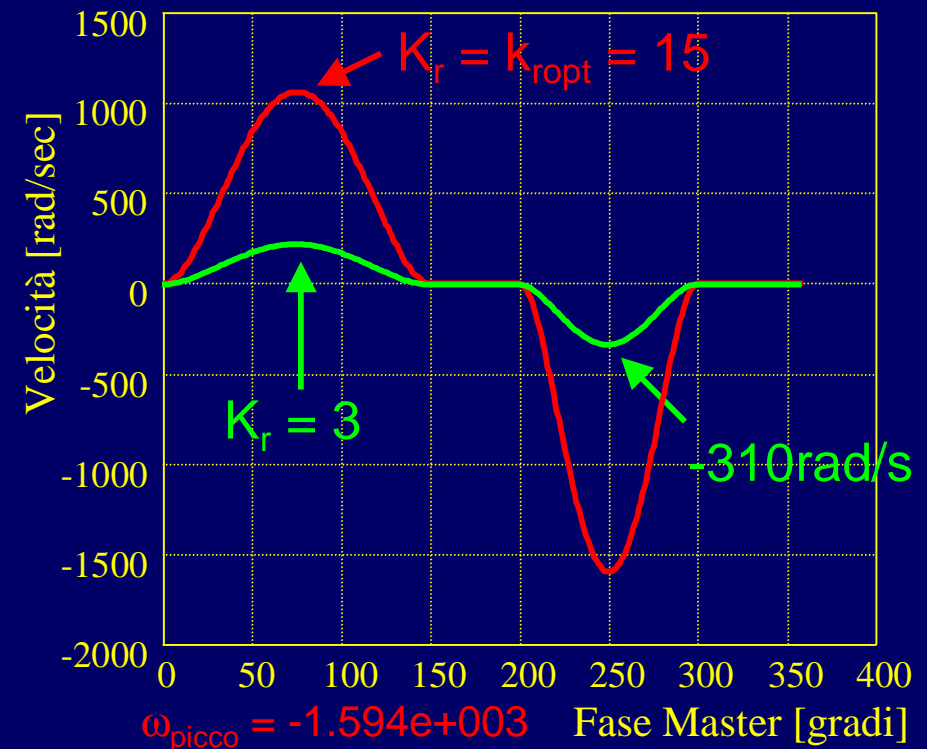
## Rapporto di riduzione ottimale

### Analisi cinematica

Grafici del Cinematismo



Grafici del MOTORE

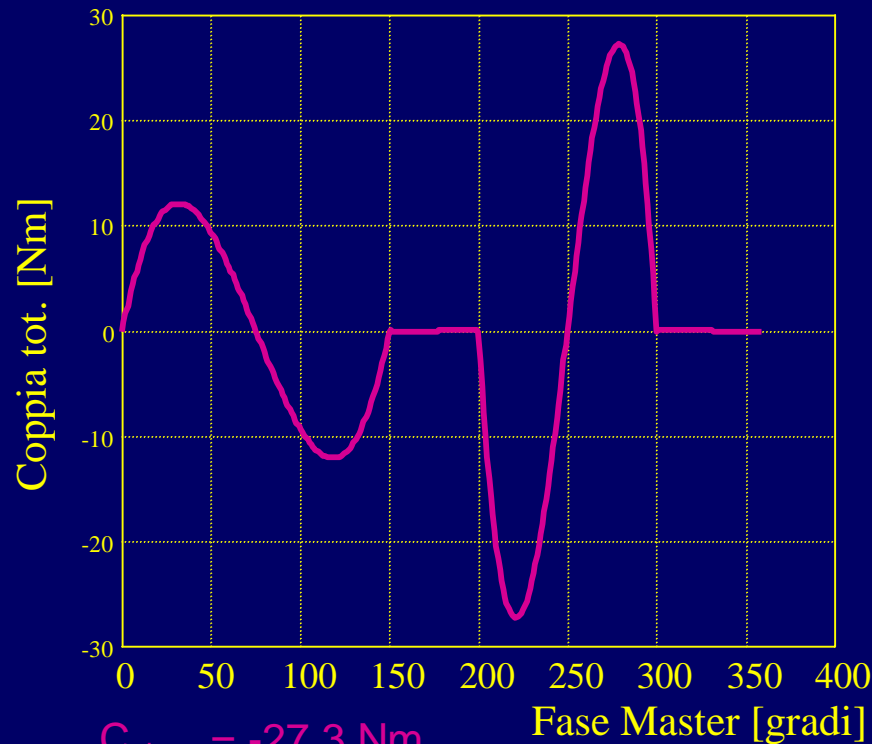


# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione ottimale

### Analisi dinamica

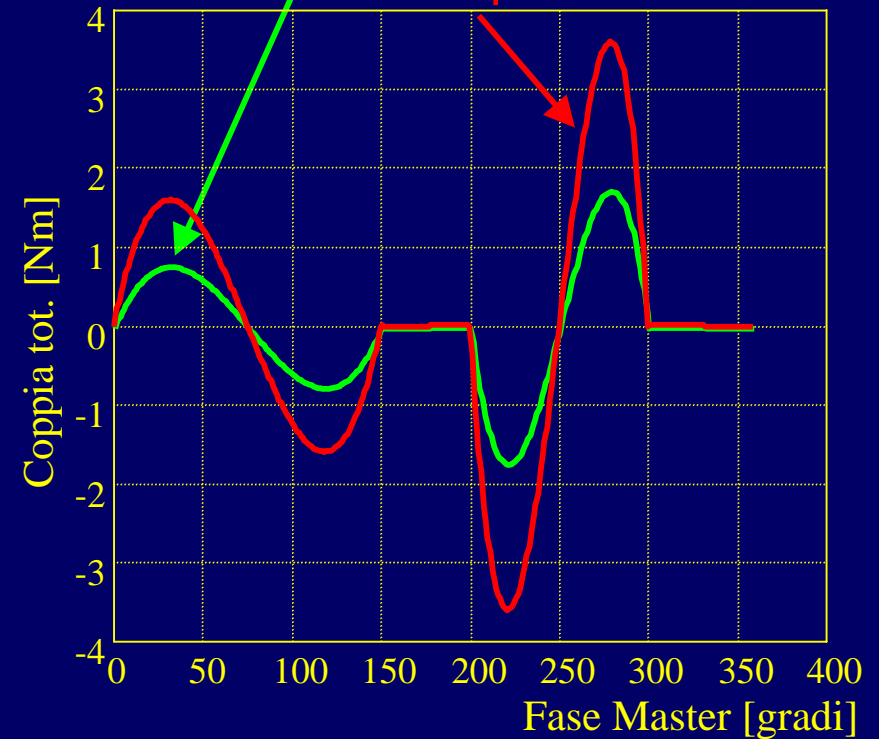
Grafici del Cinematismo



$$C_{\text{picco}} = -27.3 \text{ Nm}$$
$$C_{\text{effic.}} = 11.8 \text{ Nm}$$

**Rapporto di riduzione ottimo**

Al riduttore ( $k_{\text{ropt}}$ )  
Complessiva



$$C_{\text{picco}} = -3.6 \text{ Nm}$$
$$C_{\text{effic.}} = 1.56 \text{ Nm}$$

$$C_{\text{picco}} = -1.8 \text{ Nm}$$
$$C_{\text{effic.}} = 0.78 \text{ Nm}$$



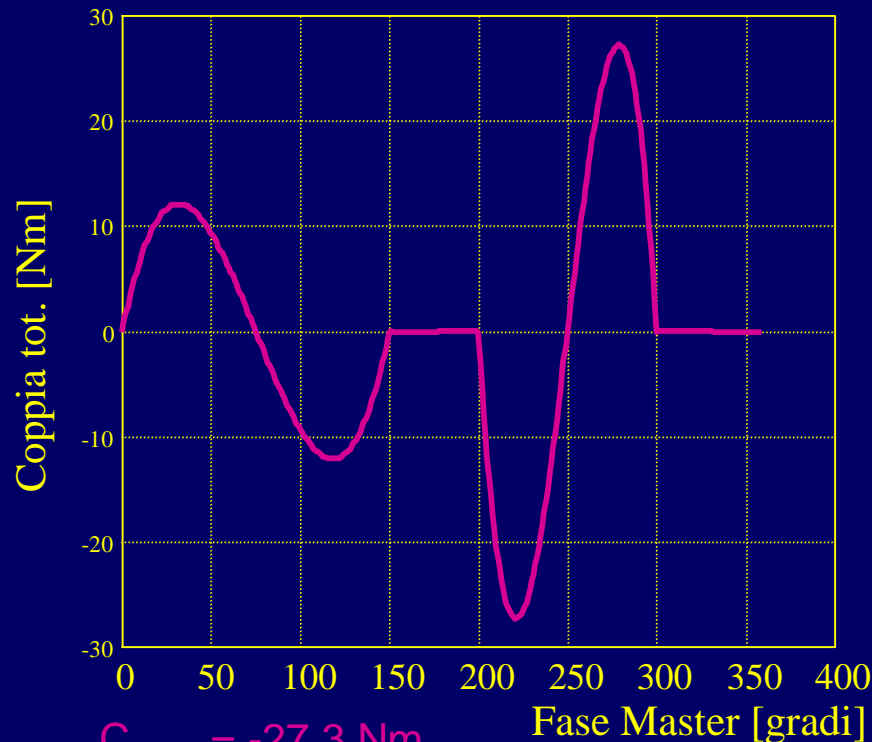
# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Rapporto di riduzione non ottimale (vincolato da $\omega_{mmax}$ )

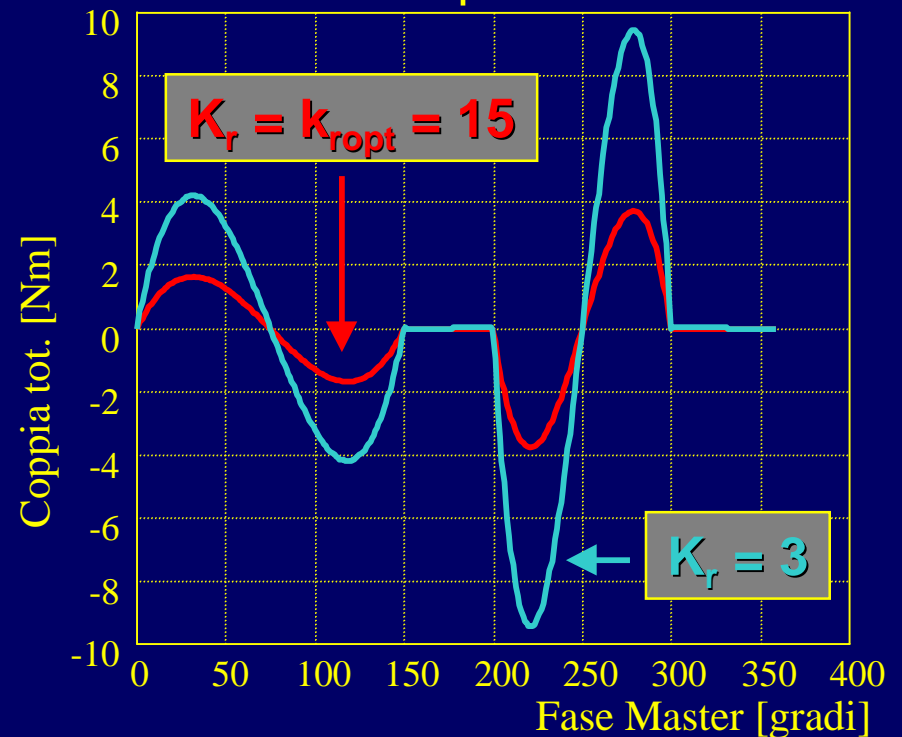
Grafici del Cinematismo

Analisi dinamica

Complessiva



$$C_{picco} = -27.3 \text{ Nm}$$
$$C_{effic.} = 11.8 \text{ Nm}$$



$$C_{picco} = -3.6 \text{ Nm}$$
$$C_{effic.} = 1.54 \text{ Nm}$$

$$C_{picco} = -9.4 \text{ Nm}$$
$$C_{effic.} = 4.1 \text{ Nm}$$

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Confronto tra diversi rapporti di riduzione

$$C_{mopt} \cong \frac{C_m}{k_{ropt} / 2}$$

In presa diretta ( $k_r = 1$ )

$$C_{picco} = -27.3 \text{ Nm}$$

$$C_{effic.} = 11.8 \text{ Nm}$$

Riduttore ottimo ( $k_r = 15$ )

$$C_{picco} = -3.6 \text{ Nm}$$

$$C_{effic.} = 1.54 \text{ Nm}$$

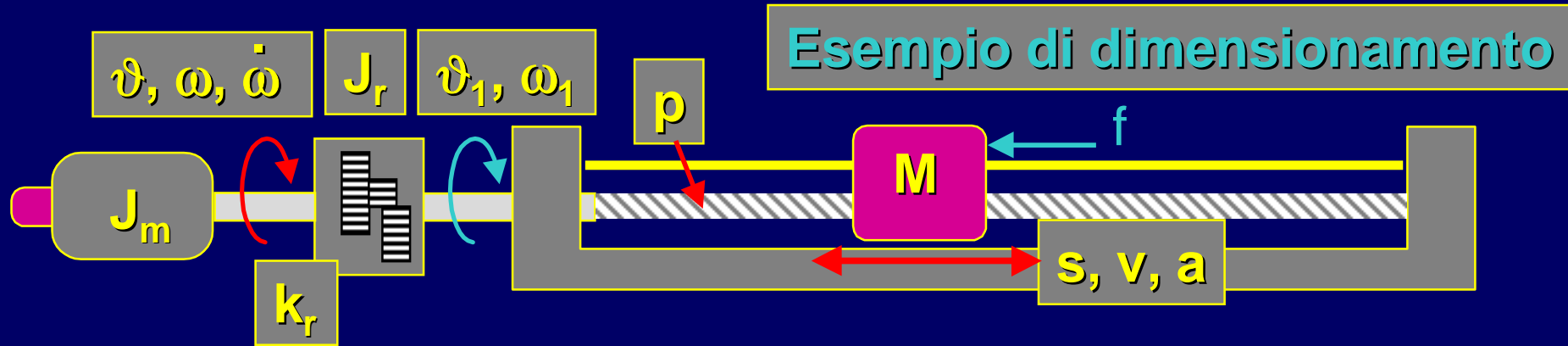
Riduttore ammissibile ( $k_r = 3$ )

$$C_{picco} = -9.4 \text{ Nm}$$

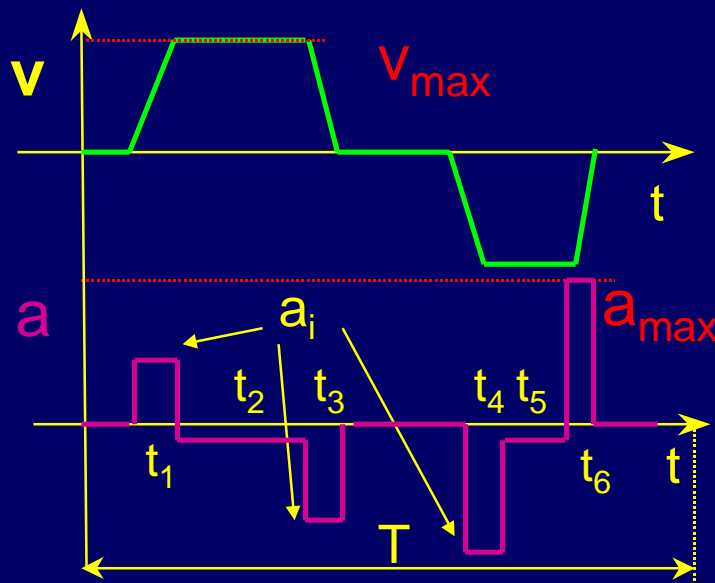
$$C_{effic.} = 4.1 \text{ Nm}$$

**E' evidente l'opportunità, quando è possibile, di avvicinarsi al rapporto di riduzione ottimo**

# Dimensionamento dell'azionamento



## Passo 1 - Stima della potenza necessaria a muovere il carico



E' l'unico dato che posso calcolare a priori, senza aver scelto il motore.

Serve per avere una idea della classe di motore e quindi delle sue velocità massima ed inerzia, necessari per definire il rapporto di riduzione

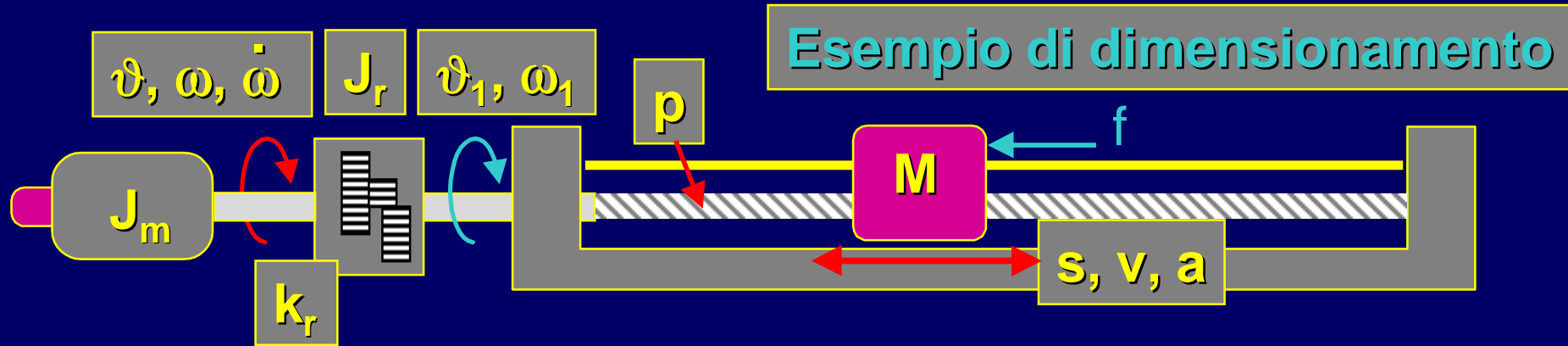
Forza efficace

$$P_c^* = v_{\max} \frac{(\sqrt{\delta} M a_{\max} + f)}{\eta^*}$$

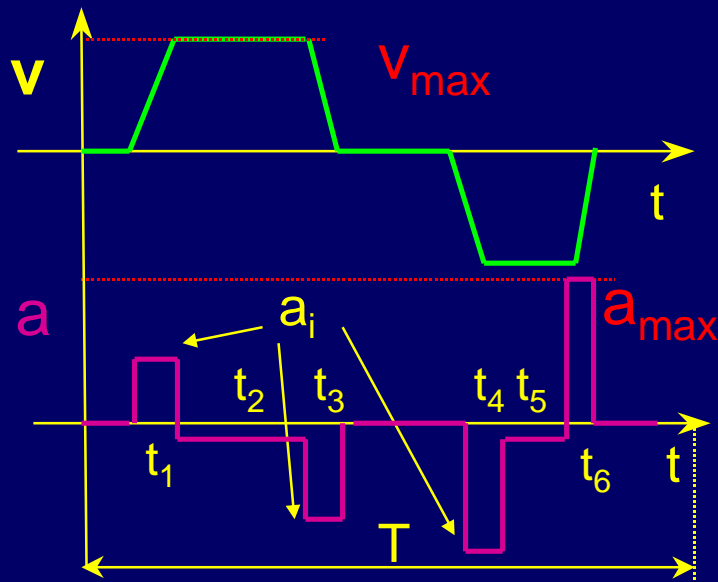
$$P_c^* < P_M < 2P_c^*$$

Rendimento meccanico

# Dimensionamento dell'azionamento



## Passo 1 - Stima della potenza necessaria a muovere il carico



Fattore di servizio

$$k_i = \frac{a_i}{a_{max}}$$

$$\delta = \frac{\sum k_i^2 * t_i}{T}$$

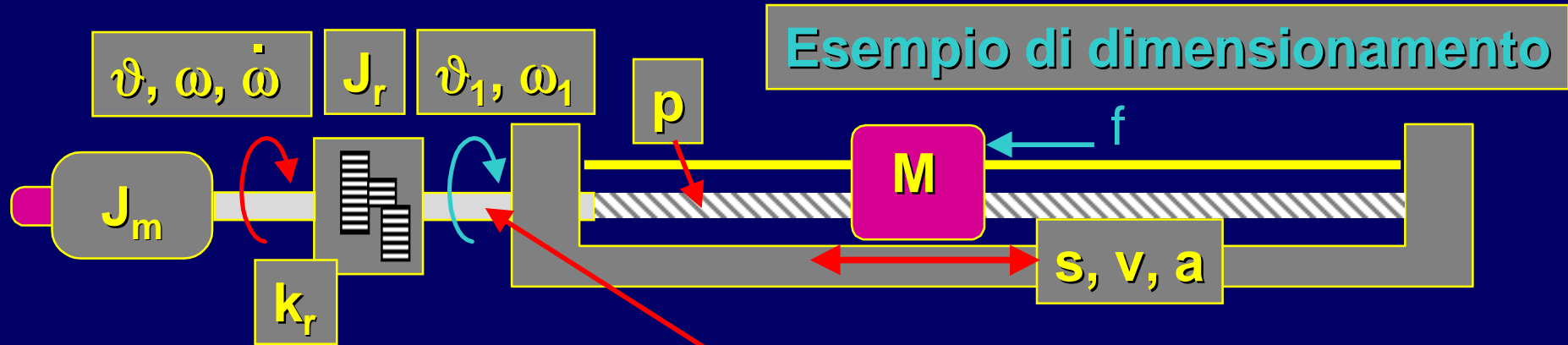
Si sceglie  
(di tentativo)  
un motore con  
 $P_c^* < P_M < 2 P_c^*$

$$P_c^* = v_{max} \frac{(\sqrt{\delta} M a_{max} + f)}{\eta^*}$$

$$\Rightarrow J_m^*$$

stima a di  $J_m$

# Dimensionamento dell'azionamento



## Passo 2 - Calcolo del rapporto di riduzione

$$k_a = \frac{\omega_1}{v}$$

$$\omega_{1 \max} = k_a v_{\max}$$

$$\dot{\omega}_{1 \max} = k_a a_{\max}$$

$$J_{eqc} = \frac{M}{k_a^2}$$

$k_r$  deve generare  $\omega_{\max M}$  compatibile con il motore prescelto

$$k_{ropt}^* = \sqrt{\frac{J_{eqc}}{J_m^*}}$$

$$\omega_{\max}^* = k_{ropt}^* \omega_{1 \max}$$

se

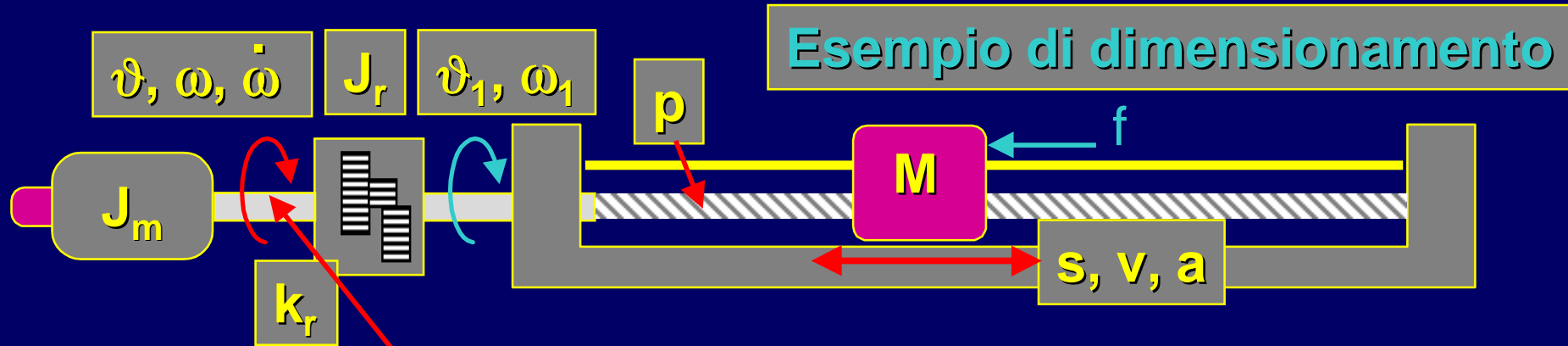
$$\omega_{\max}^* \leq \omega_{\max M}^*$$

$$k_r^* = k_{ropt}^*$$

$$\omega_{\max}^* > \omega_{\max M}^*$$

$$k_r^* = \frac{\omega_{\max M}^*}{\omega_{1 \max}}$$

# Dimensionamento dell'azionamento



## Passo 3 - calcolo dei parametri all'albero motore

$$\omega_{max} = k_r k_a v_{max}$$

$$\dot{\omega}_{max} = k_r k_a a_{max}$$

$$J_{eq} = \frac{J_{eqc}}{k_r^2}$$

Se

$$\frac{C_{max}}{\eta} < C_{maxM}$$

$$\frac{(C_{rms} + f/k_a)}{\eta K_T K_H} < C_{nomM}$$

**Motore  
O.K.**

$$J_{tot}^* = J_m^* + J_r + J_{eq}$$

$$C_{rms} = \sqrt{\delta} (J_{tot} \dot{\omega}_{max})$$

$$C_{max} = J_{tot} \dot{\omega}_{max} + f/k_r k_a$$

altrimenti

**Ripetere dal passo 2  
con motore più  
grande**

# Dimensionamento dell'azionamento

## Problemi termici al convertitore

Il convertitore fornisce extracorrente ( $k_{\text{extra}} I_{\text{nom}}$ ) per un tempo limitato ( $k_{\text{extra}} = 1.5 \div 3$ )

### ■ due casi

- extracorrente per un tempo fisso
- extracorrente in funzione della potenza dissipata
  - tempo inversamente proporzionale al valore

### ■ il comportamento dinamico e la capacità di controllare le coppie di carico non sono costanti

- assi singoli
  - si può sfruttare l'extracorrente per ottimizzare i costi
- assi coordinati
  - per garantire il sincronismo occorre fare molta attenzione alla saturazione di corrente

# Dimensionamento dell'azionamento - moti ciclici

## Dimensionamento del motore

$$C_{nomM} \geq \frac{C_{rms}}{K_H K_T}$$

Termico

$$C_{maxM} \geq C_{max}$$

Meccanico

La procedura è di solito iterativa perché nel calcolo delle coppie entra anche l'inerzia del motore, che non è nota prima di averlo dimensionato

## Dimensionamento del convertitore

$$I_{nom} \geq \frac{C_{rms}}{K_c} \quad \text{se } C_{max} \leq K_{extra} C_{rms}$$

$$I_{nom} \geq \frac{C_{max}}{K_c K_{extra}} \quad \text{se } C_{max} > K_{extra} C_{rms}$$

l'extracorrente la fornisce il convertitore

va dimensionato sulla coppia massima

$K_c$  = costante di coppia del motore (Nm/a)



# Azionamenti Elettrici

Parte 4

Scelta e  
dimensionamento  
dell'Azionamento

**FINE**

**Prof. Alberto Tonielli**

Lezioni del Corso di Perfezionamento:

Macchine Automatiche  
per il Confezionamento e l'Imballaggio

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-2093024

E-mail: [atonielli@deis.unibo.it](mailto:atonielli@deis.unibo.it)