

Corso di **ELETRONICA INDUSTRIALE**

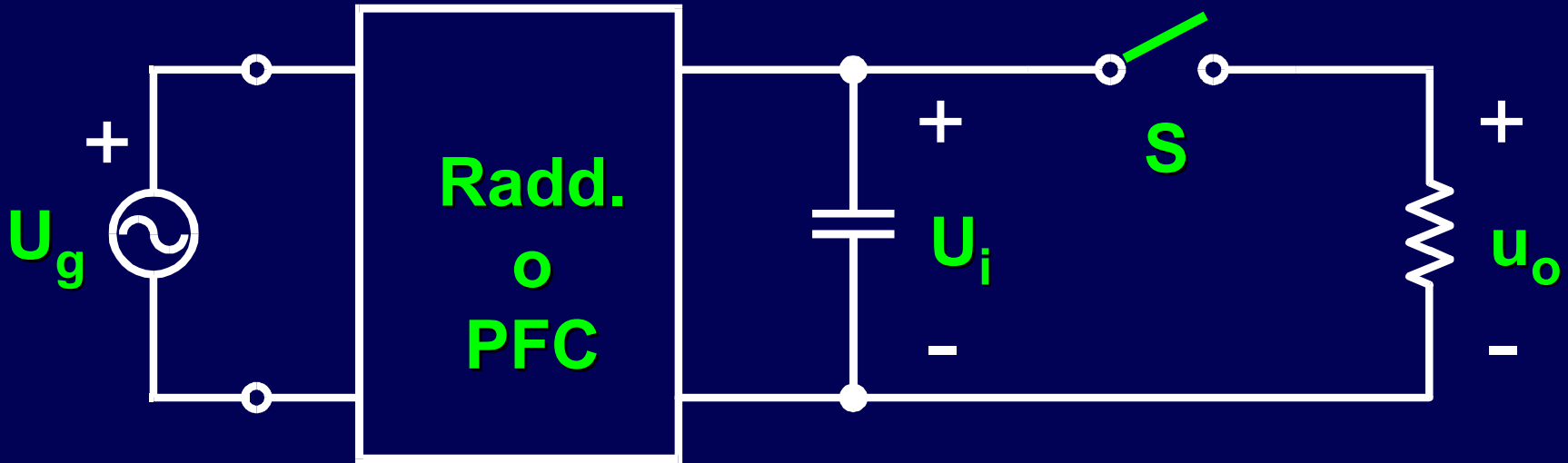
*“Introduzione ai convertitori a
commutazione”*

Argomenti trattati

- **Struttura di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck o Step-Down)**
- **Principio della regolazione di tensione a controllo di tempo (Pulse Width Modulation - PWM)**
- **Filtraggio della tensione di uscita**

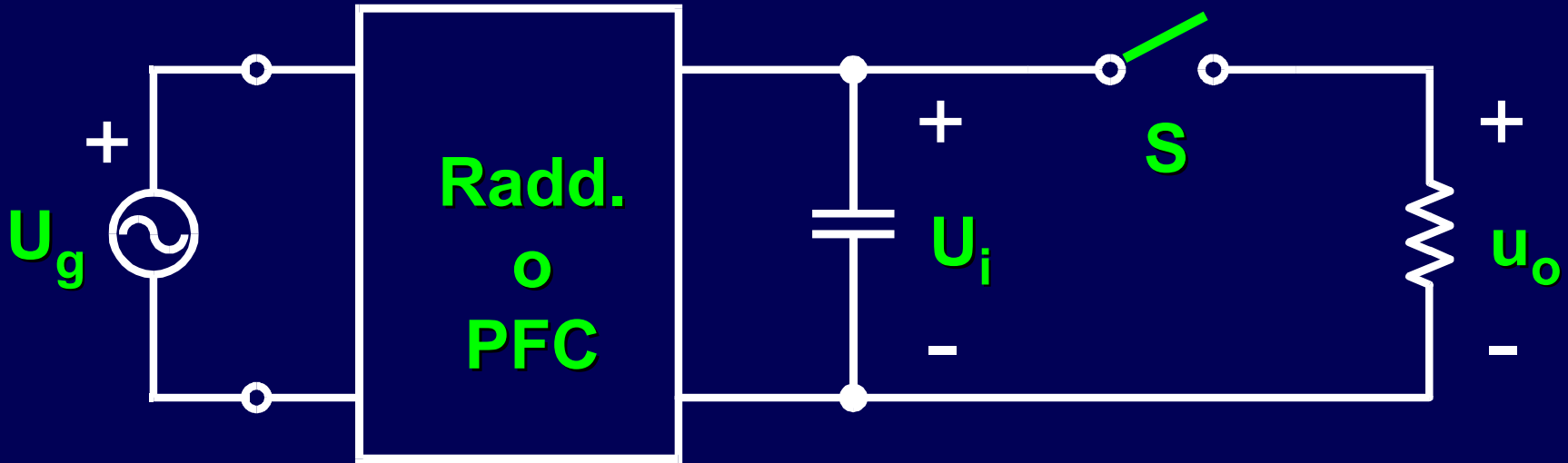
Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)

Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)



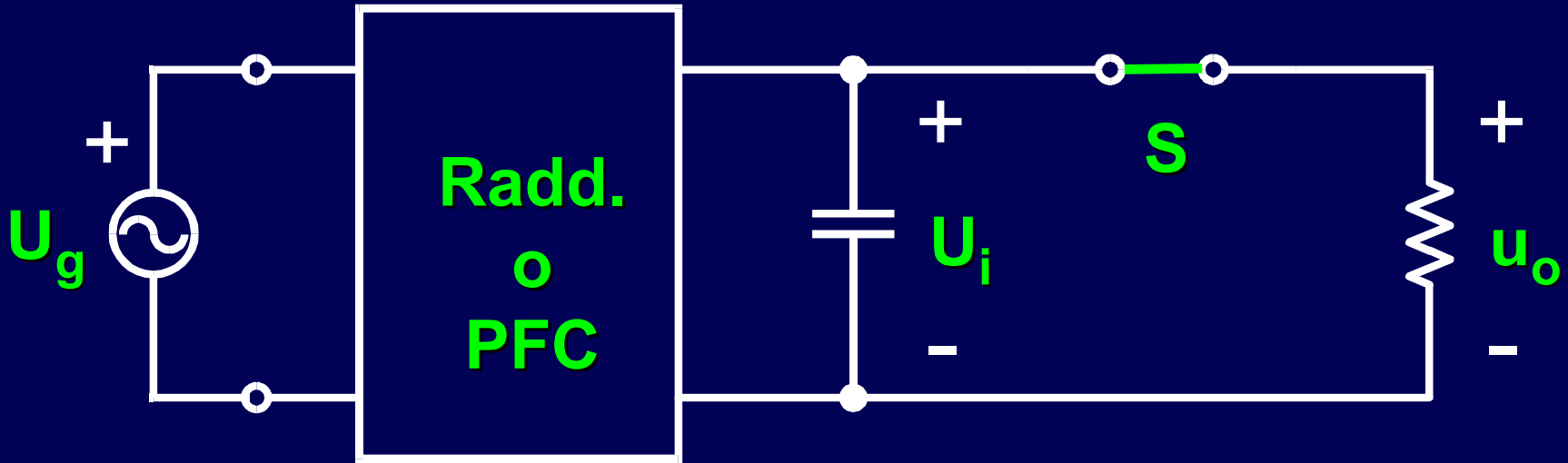
Modi di funzionamento:

Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)



Modi di funzionamento:

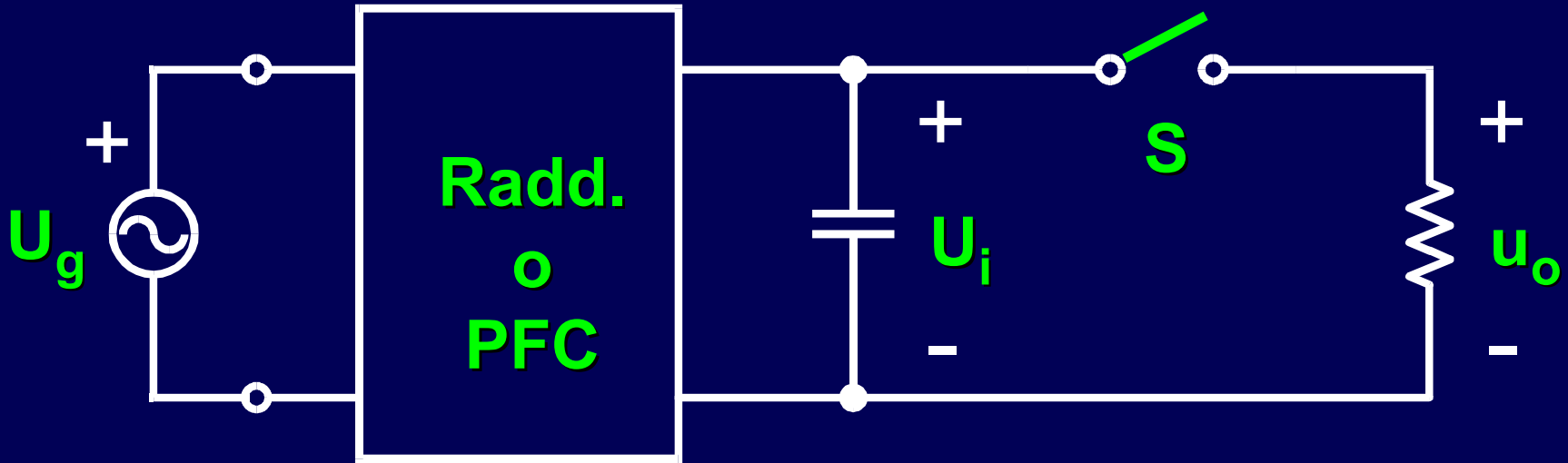
Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)



Modi di funzionamento:

$$S \text{ on} \rightarrow u_o = U_i$$

Schema di principio del convertitore cc/cc abbassatore di tensione (Buck converter)

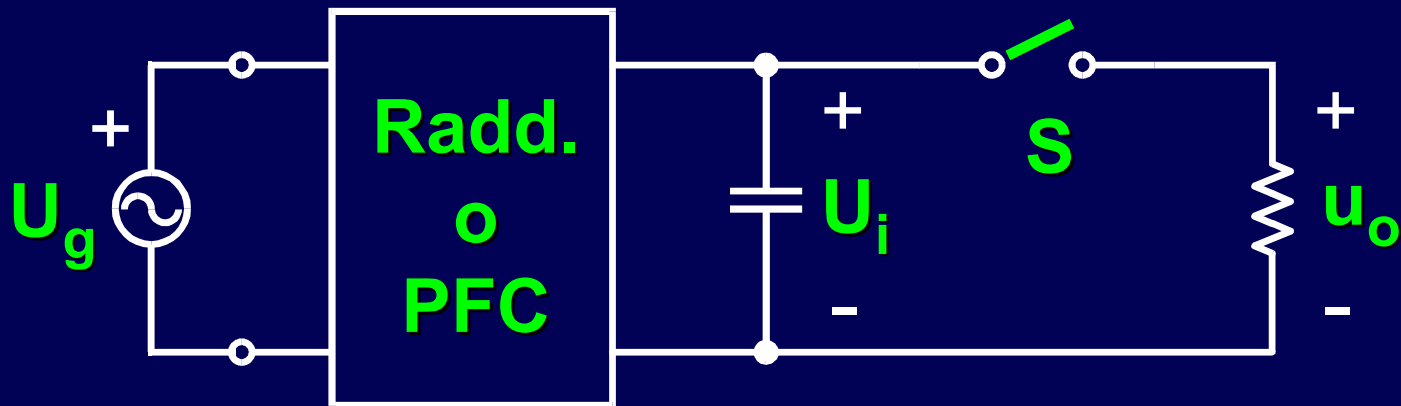


Modi di funzionamento:

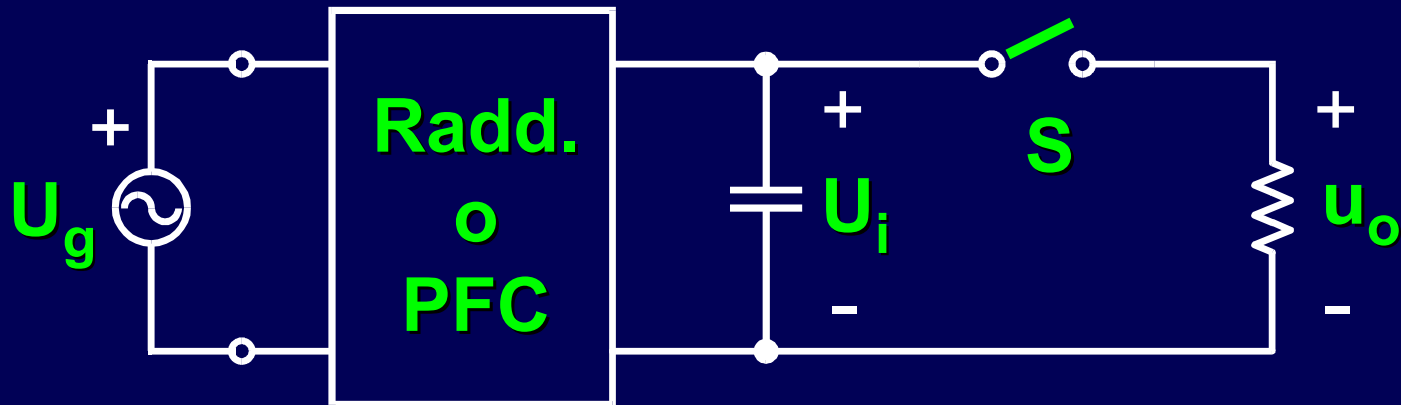
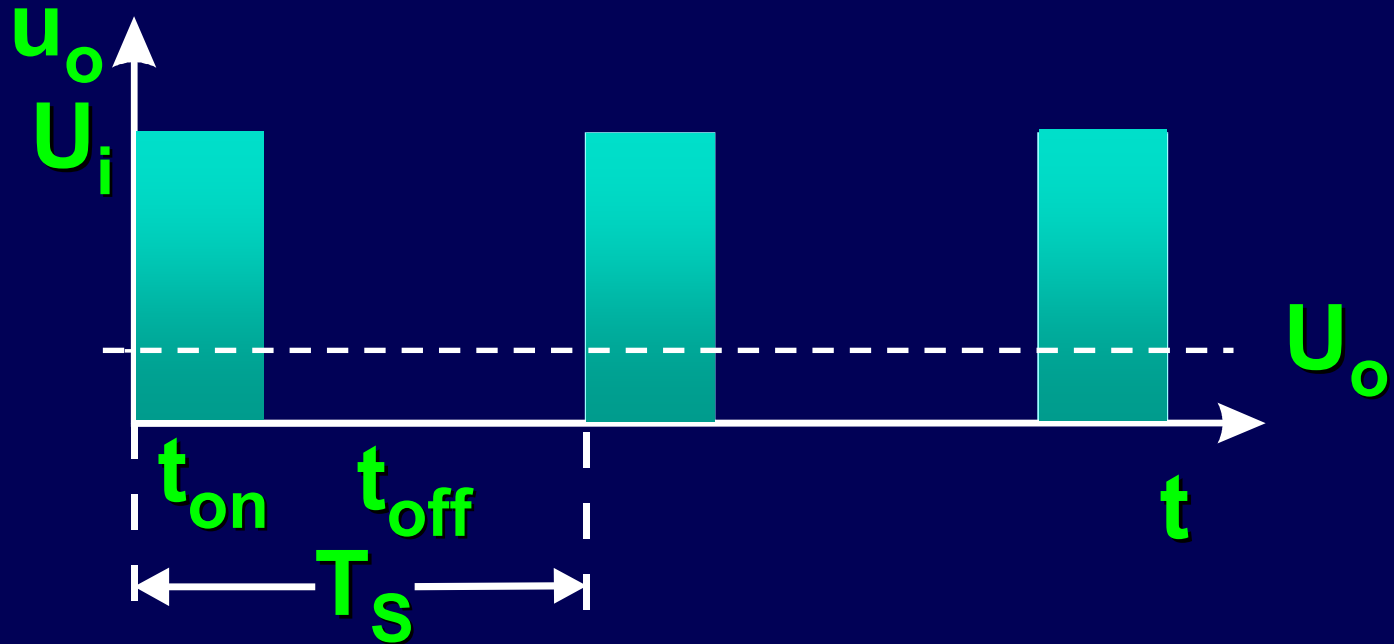
S on \rightarrow $u_o = U_i$

S off \rightarrow $u_o = 0$

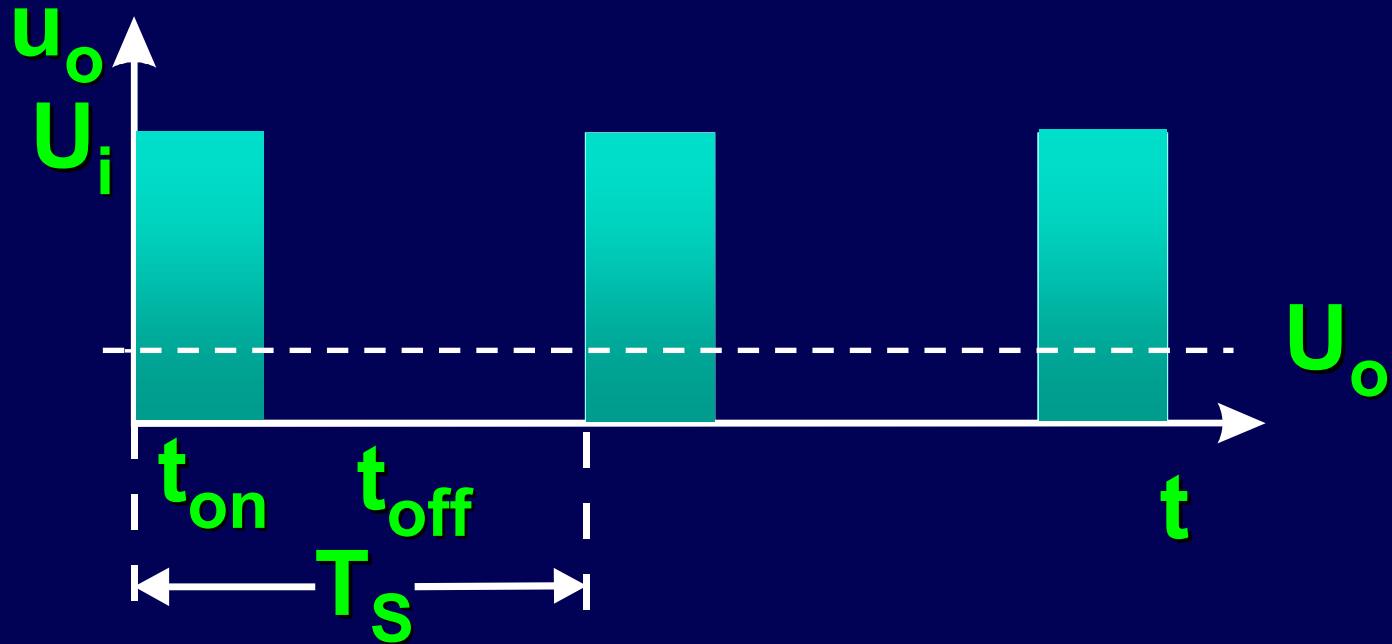
Regolazione di tensione a controllo di tempo



Regolazione di tensione a controllo di tempo



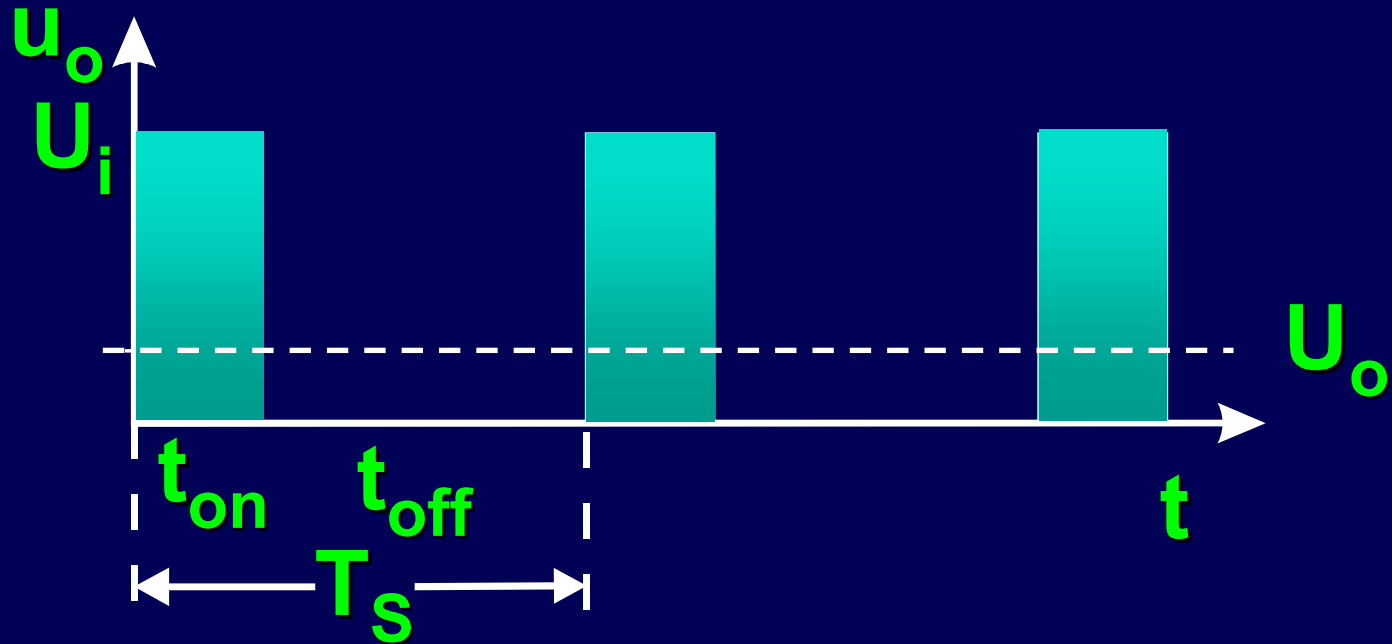
Regolazione di tensione a controllo di tempo



$T_s =$ periodo di commutazione

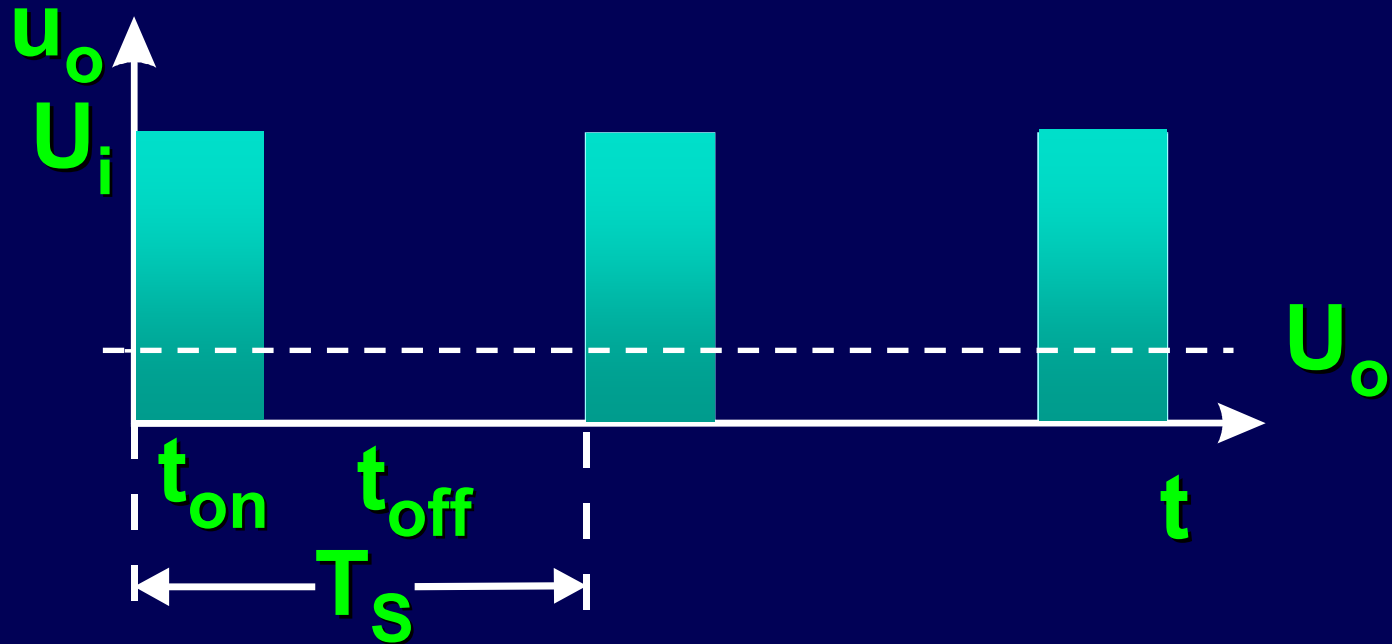
$f_s = 1/ T_s =$ frequenza di commutazione

Regolazione di tensione a controllo di tempo



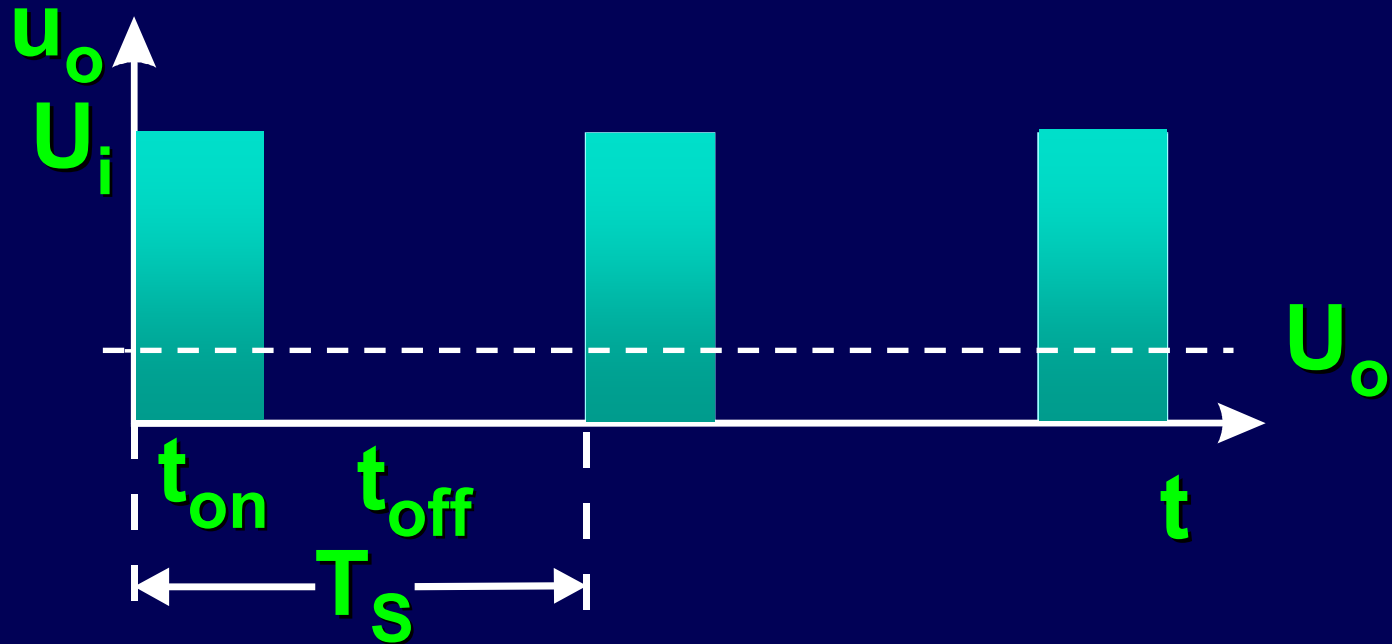
$$U_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_o(t) dt$$

Regolazione di tensione a controllo di tempo

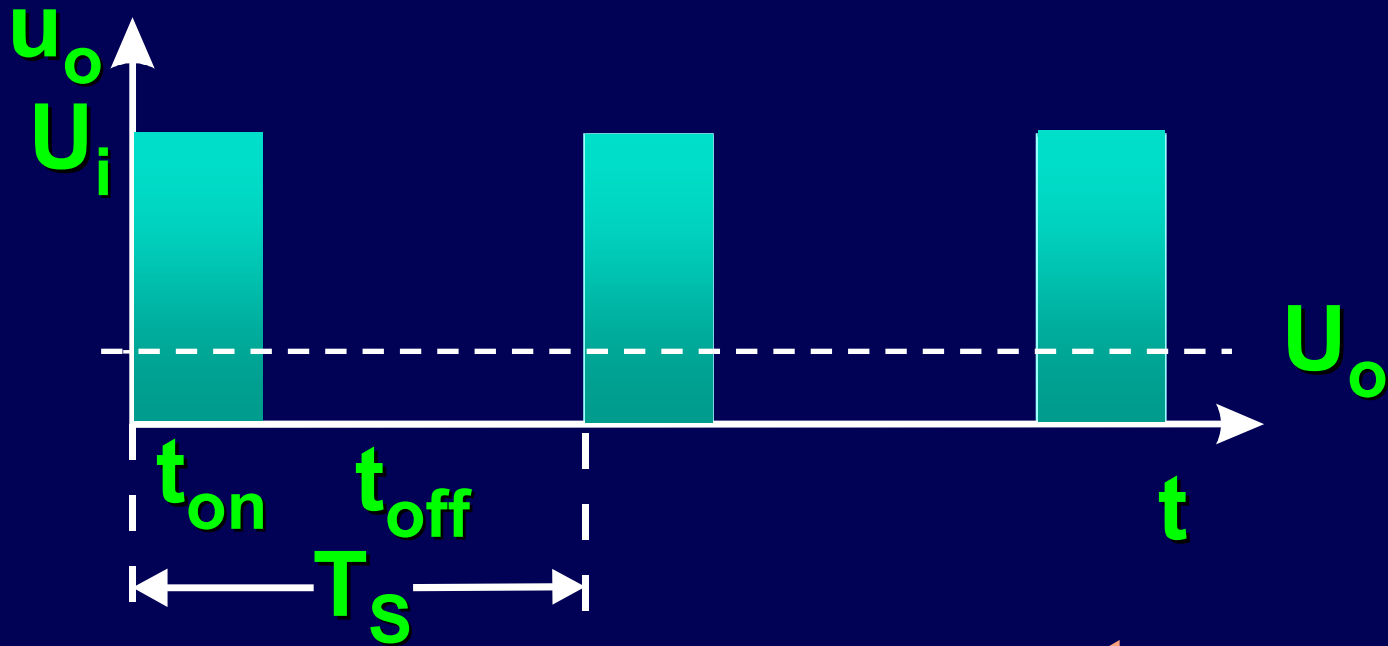


$$U_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} U_i dt$$

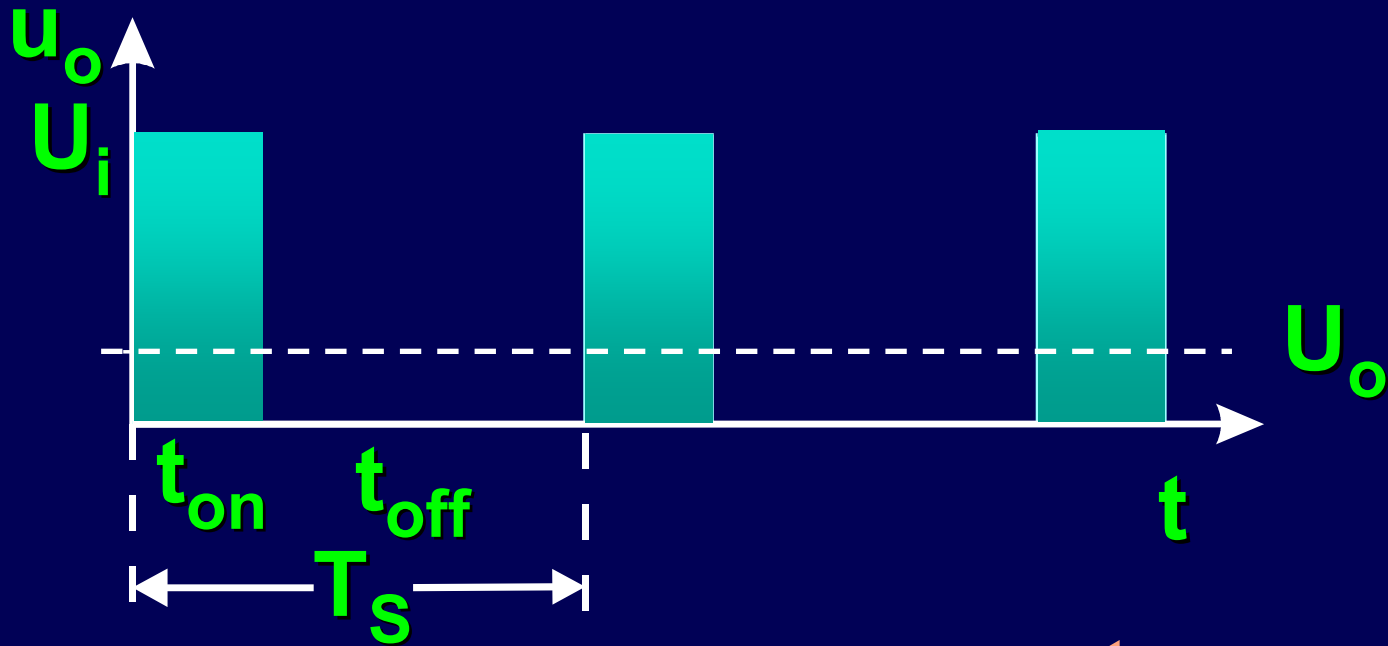
Regolazione di tensione a controllo di tempo



$$U_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} U_i dt = U_i \frac{t_{on}}{T_s}$$

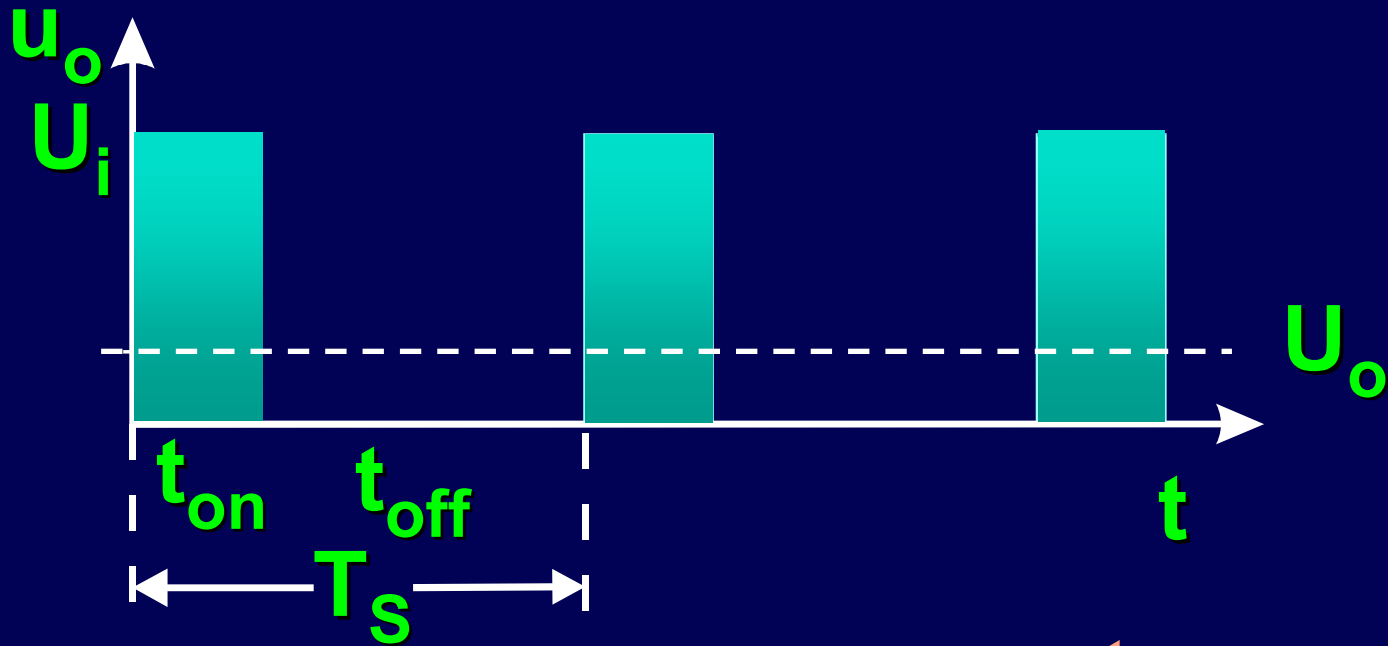


duty-cycle = ciclo utile = $\delta = \frac{t_{on}}{T_s}$



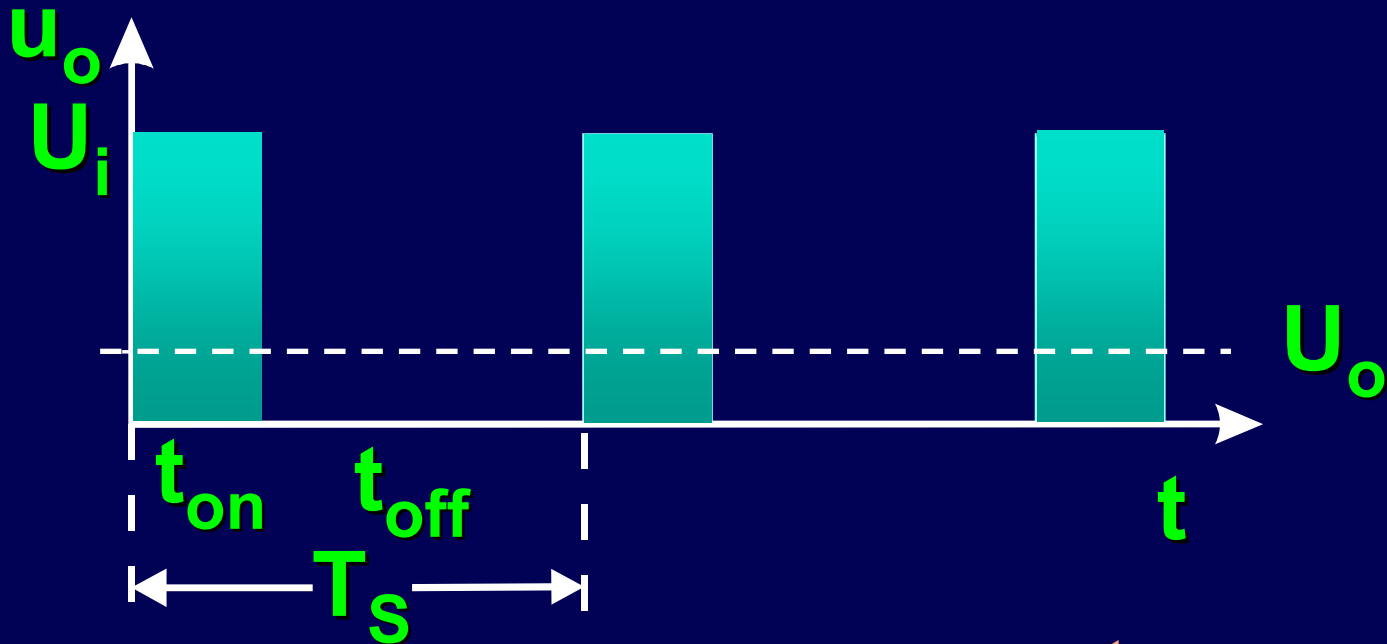
duty-cycle = ciclo utile = $\delta = \frac{t_{on}}{T_s}$

$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{T_s} = \delta U_i$$



duty-cycle = ciclo utile = $\delta = \frac{t_{on}}{T_s}$

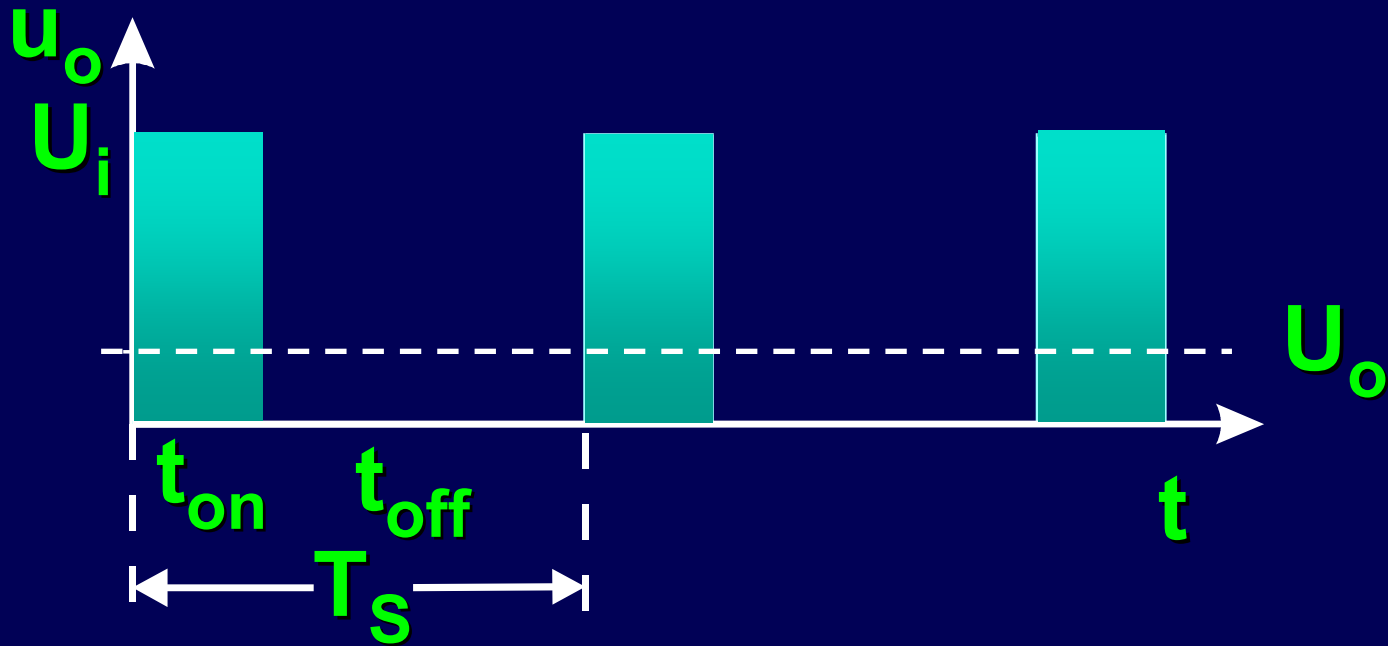
$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{T_s} = \delta U_i \quad 0 \leq U_o \leq U_i$$



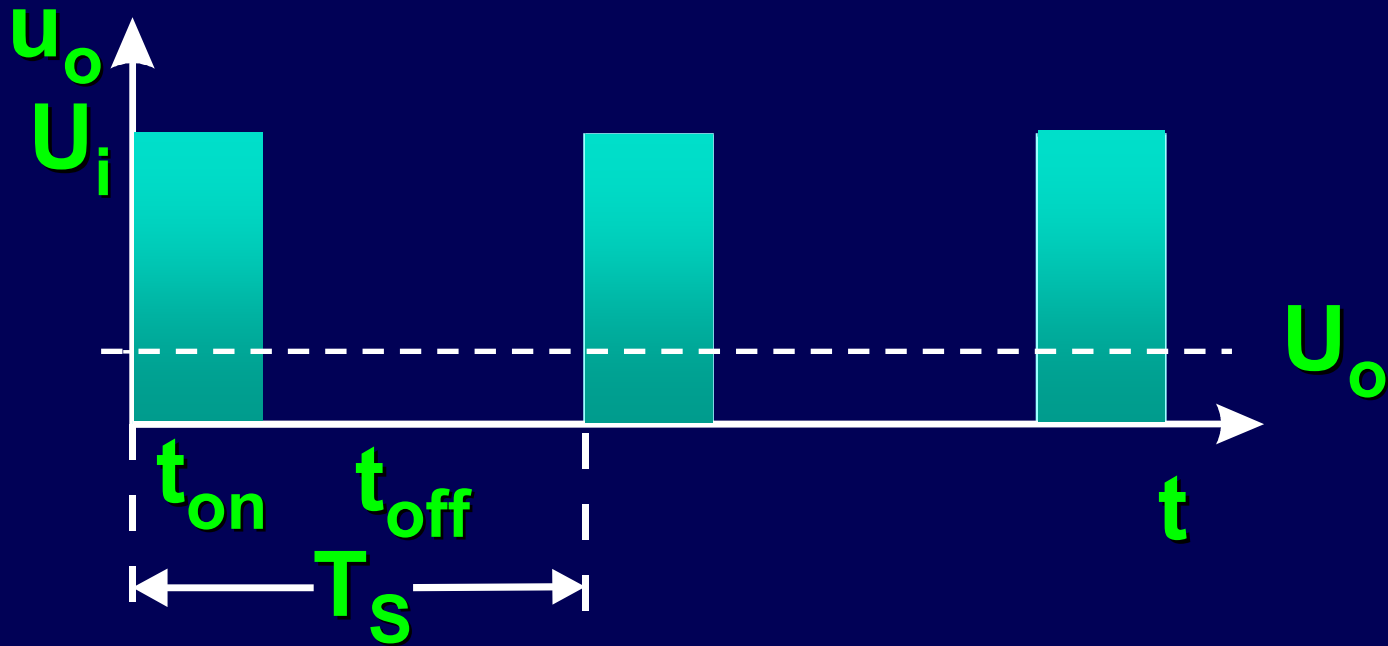
$$\text{duty-cycle} = \text{ciclo utile} = \delta = \frac{t_{on}}{T_s}$$

$$U_o = U_i \frac{t_{on}}{T_s} = \delta U_i \quad 0 \leq U_o \leq U_i$$

**Convertitore abbassatore di tensione
(Buck o step-down)**

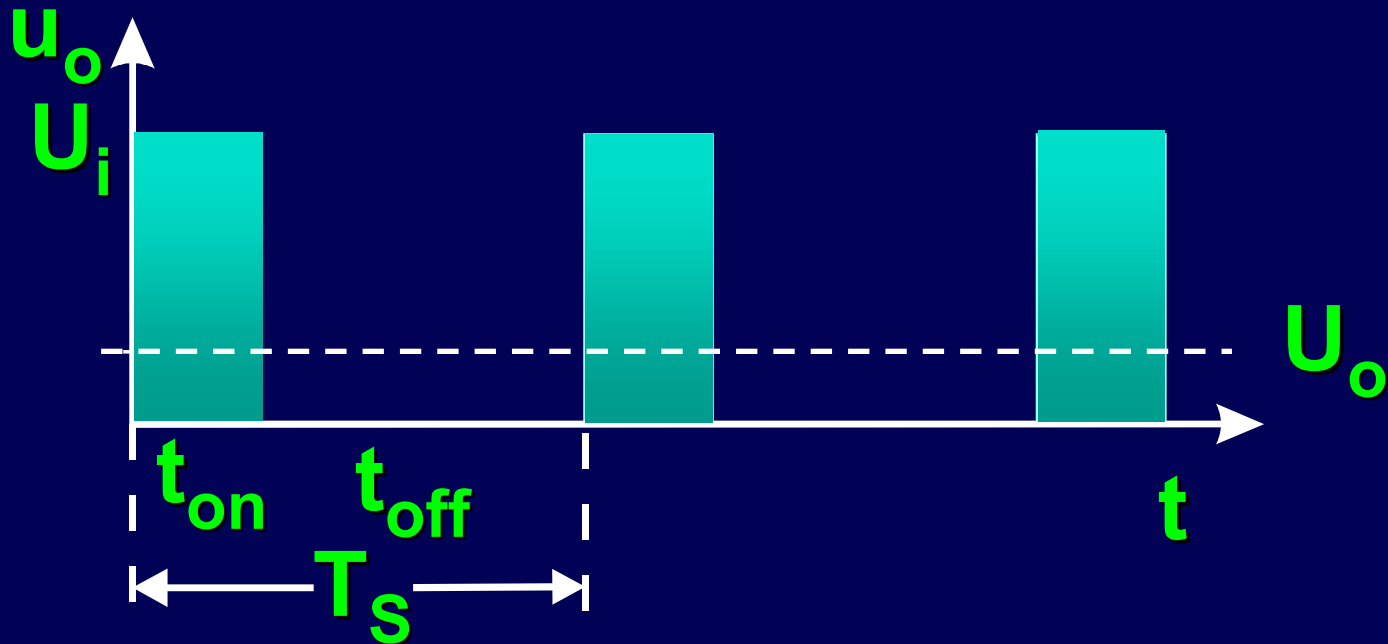


PROBLEMA: La forma d'onda di u_o è distorta



PROBLEMA: La forma d'onda di u_o è distorta

Le armoniche sono a frequenza multipla di f_s

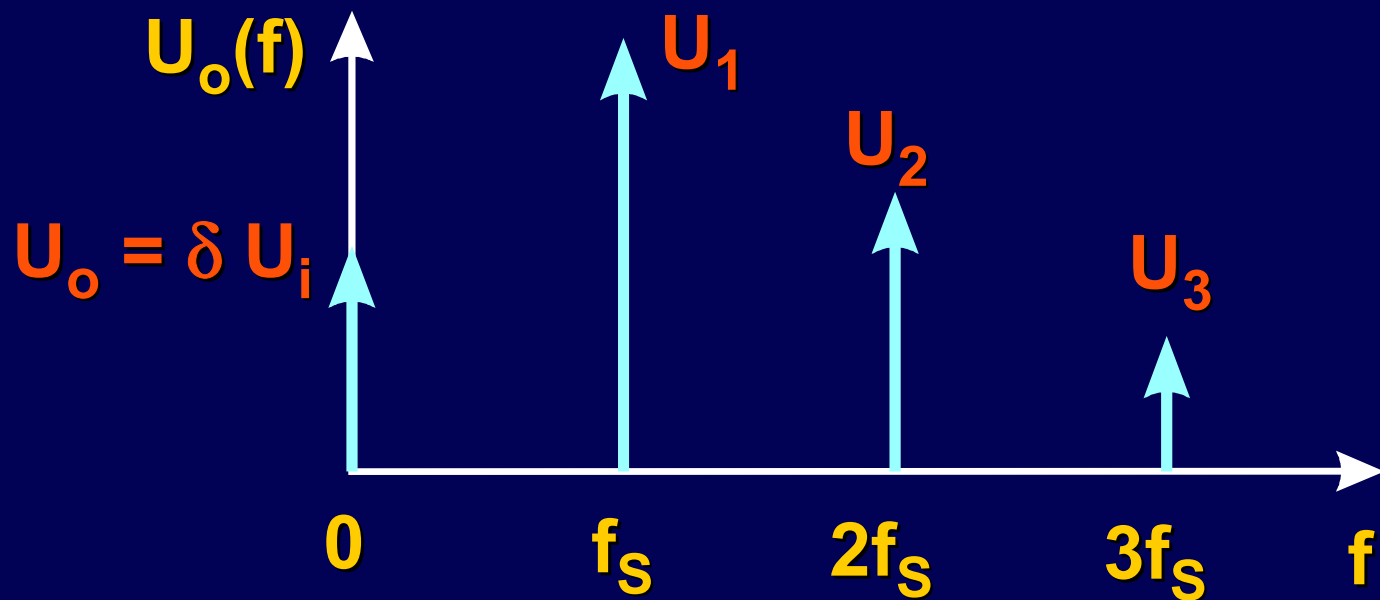
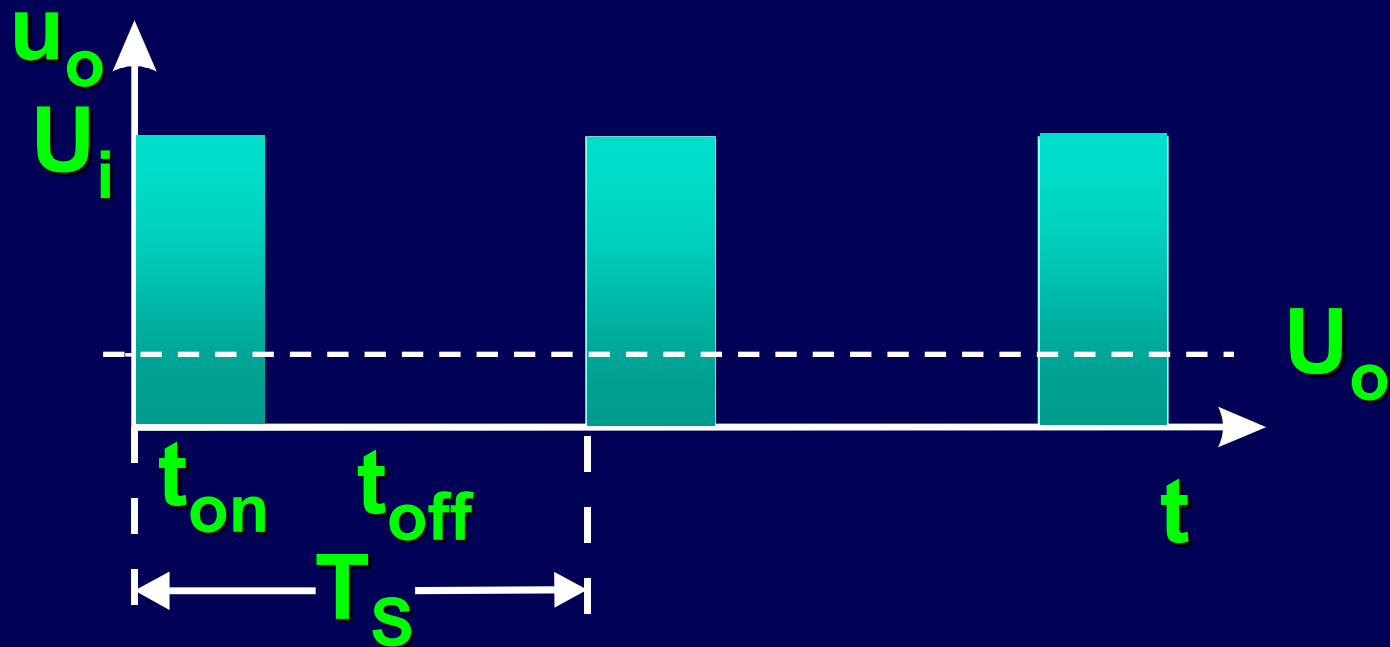


PROBLEMA: La forma d'onda di u_o è distorta

Le armoniche sono a frequenza multipla di f_s

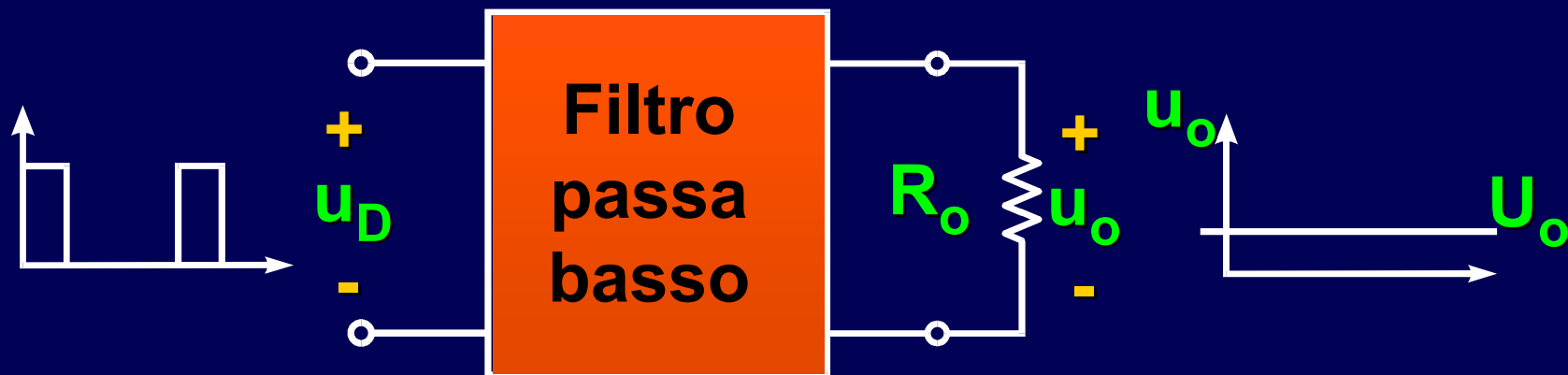
Ampiezza dell'armonica a frequenza $n \cdot f_s$:

$$U_n = \frac{2U_i}{n\pi} \cdot \sin(n\pi\delta)$$

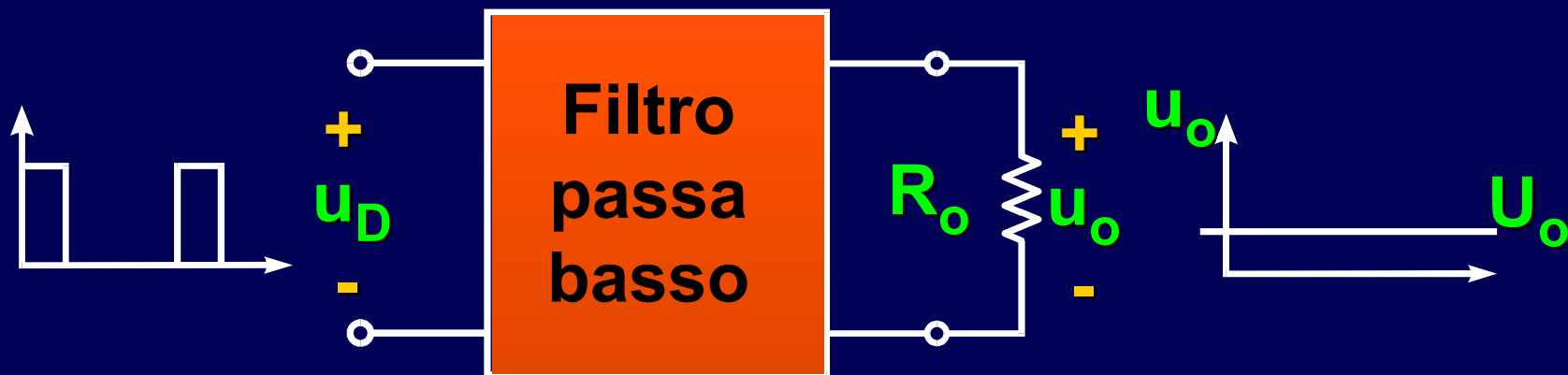


Filtraggio della tensione di uscita

Filtraggio della tensione di uscita



Filtraggio della tensione di uscita



Obiettivi:

- riduzione dell'ondulazione di u_o
- rendimento elevato

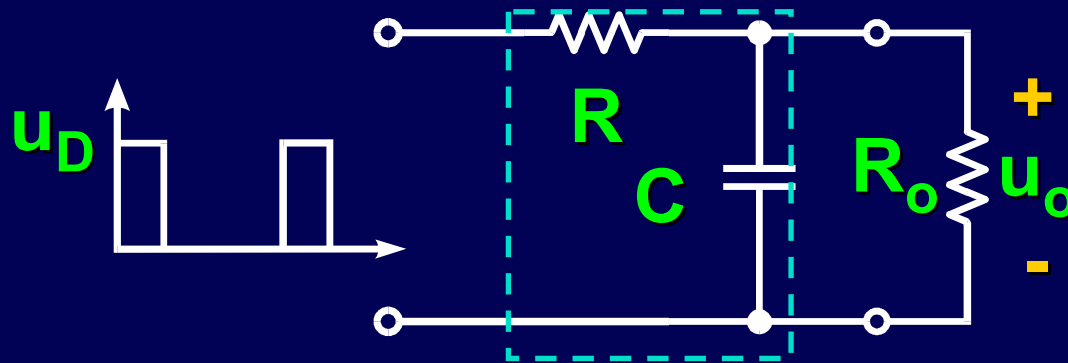
Filtro passa basso del 1° ordine

Filtro passa basso del 1° ordine

(Non usato in pratica)

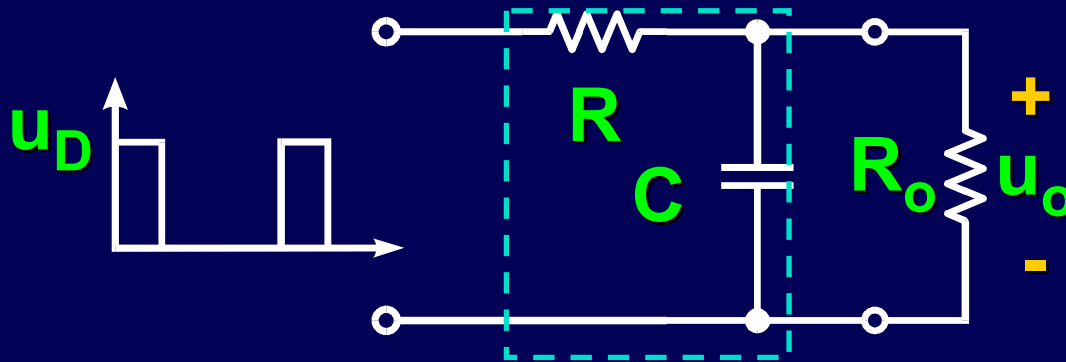
Filtro passa basso del 1° ordine

(Non usato in pratica)



Filtro passa basso del 1° ordine

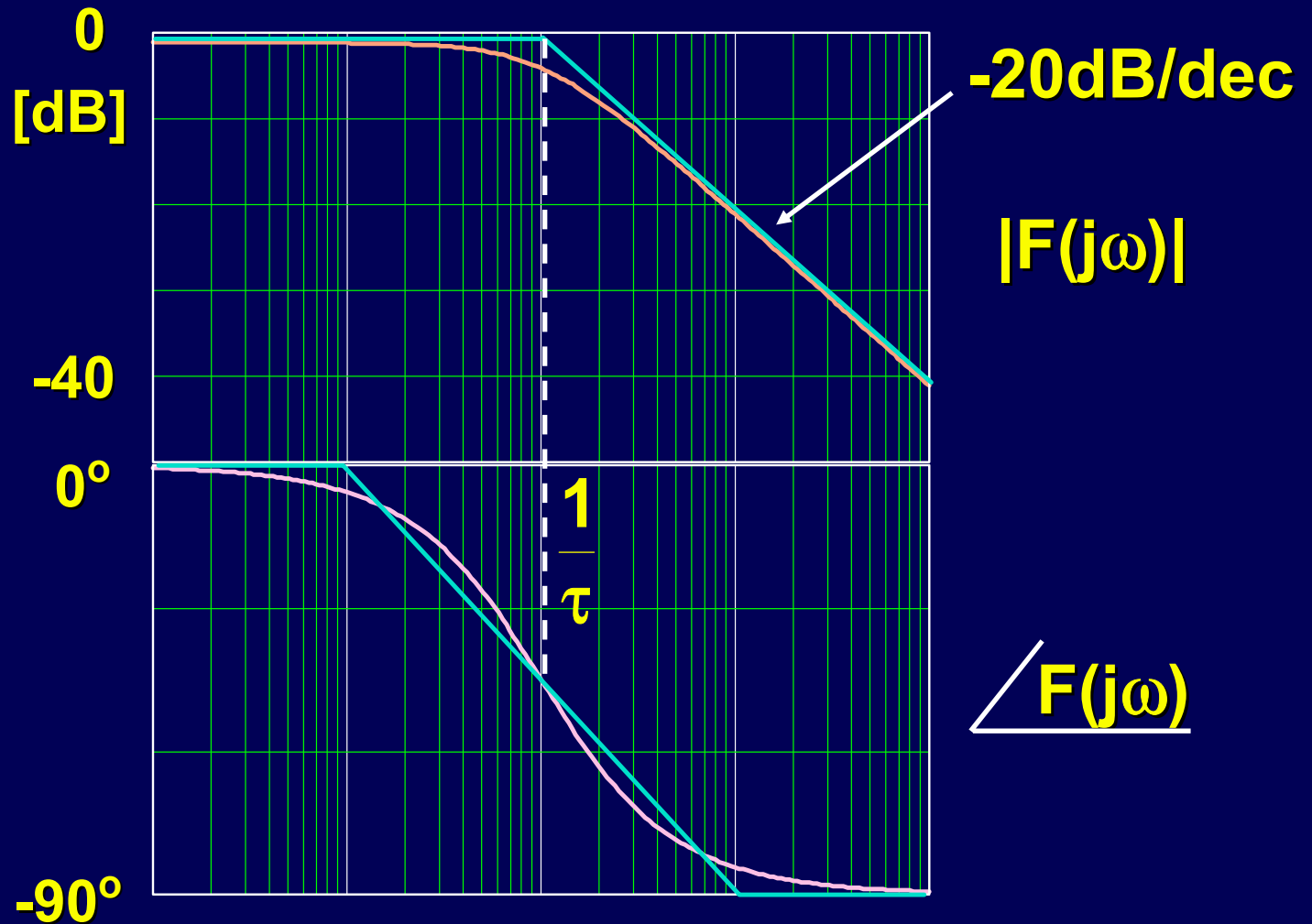
(Non usato in pratica)



Funzione di trasferimento

$$F(s) = \frac{U_o(s)}{U_D(s)} = \frac{R_o}{R + R_o} \cdot \frac{1}{1 + sC \frac{RR_o}{R + R_o}} = \frac{k}{1 + s\tau}$$

Filtro passa basso del 1° ordine



Filtro passa basso del 1° ordine

Caratteristiche:

- il filtro è dissipativo e attenua
- per avere una buona attenuazione delle armoniche occorre che il polo del filtro
 $1/\tau \ll 2\pi f_s$
- il polo a bassa frequenza limita la velocità di risposta del convertitore

Filtro passa basso del 1° ordine

Caratteristiche:

- il filtro è dissipativo e attenua
- per avere una buona attenuazione delle armoniche occorre che il polo del filtro
 $1/\tau \ll 2\pi f_s$
- il polo a bassa frequenza limita la velocità di risposta del convertitore

Queste condizioni rendono generalmente inapplicabile il filtro del 1° ordine

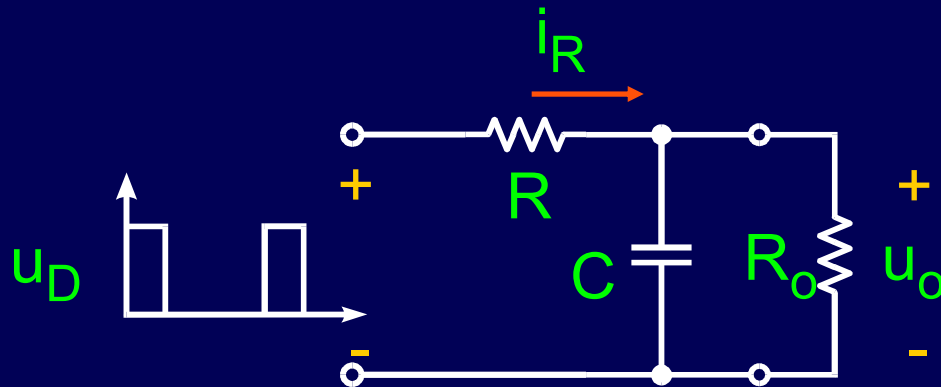
Filtro passa basso del 1° ordine

Filtro passa basso del 1° ordine

Calcolo del rendimento teorico

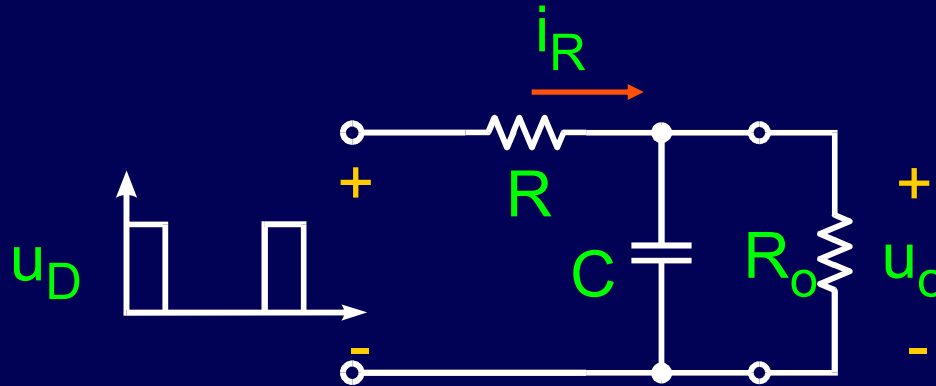
Filtro passa basso del 1° ordine

Calcolo del rendimento teorico



Filtro passa basso del 1° ordine

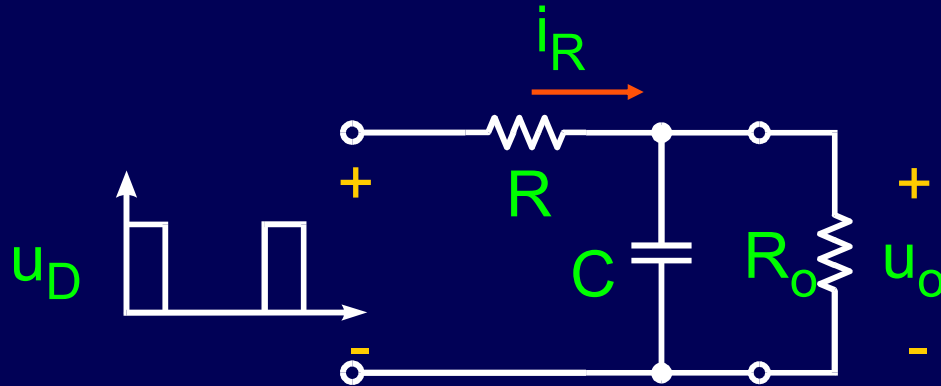
Calcolo del rendimento teorico



$$U_o = U_D \frac{R_o}{R + R_o} = U_i \delta k$$

Filtro passa basso del 1° ordine

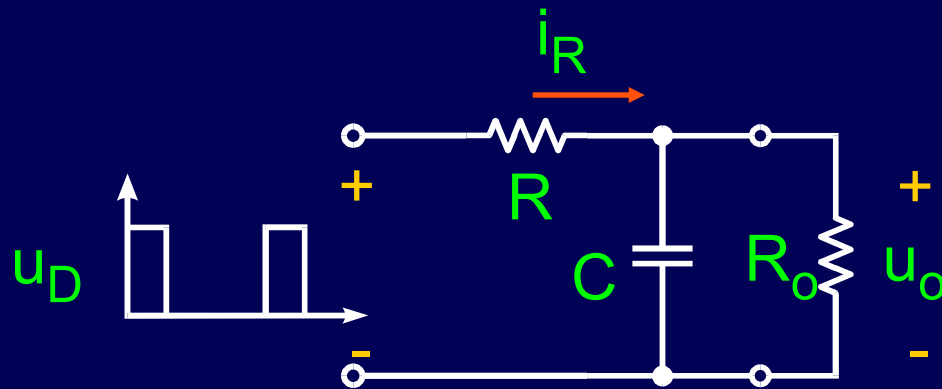
Calcolo del rendimento teorico



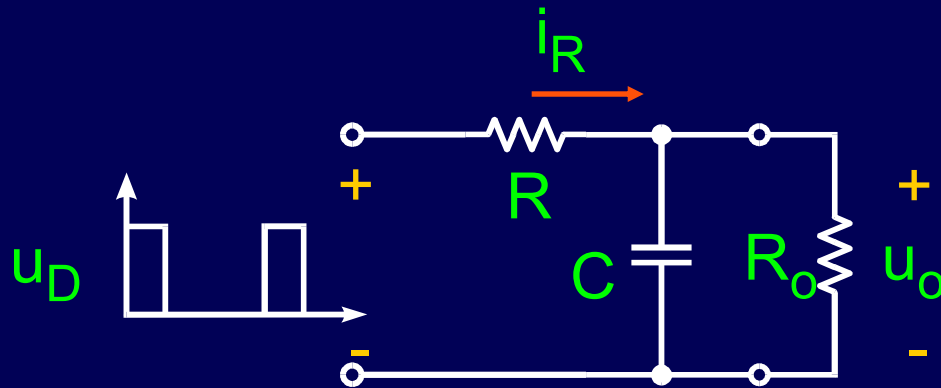
$$U_o = U_D \frac{R_o}{R + R_o} = U_i \delta k$$

$$k = \frac{R_o}{R + R_o} = \text{fattore di attenuazione}$$

Filtro passa basso del 1° ordine



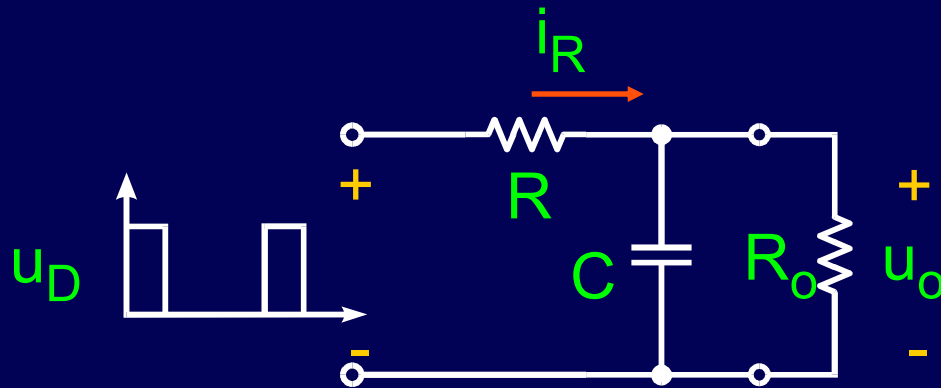
Filtro passa basso del 1° ordine



Fattore di conversione:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \delta k = \text{costante}$$

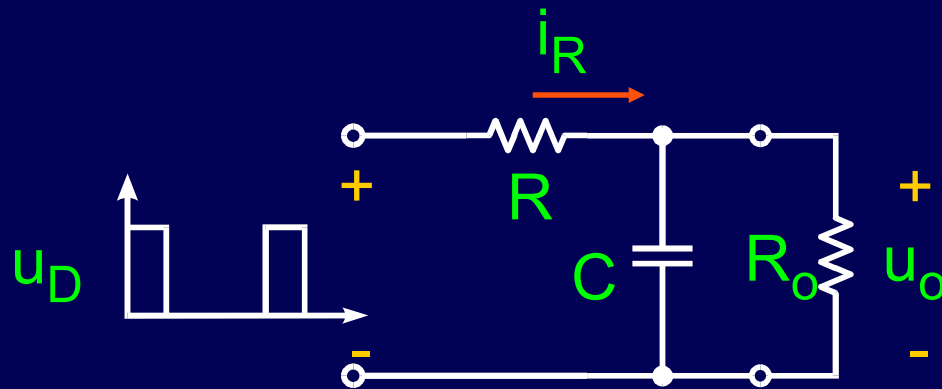
Filtro passa basso del 1° ordine



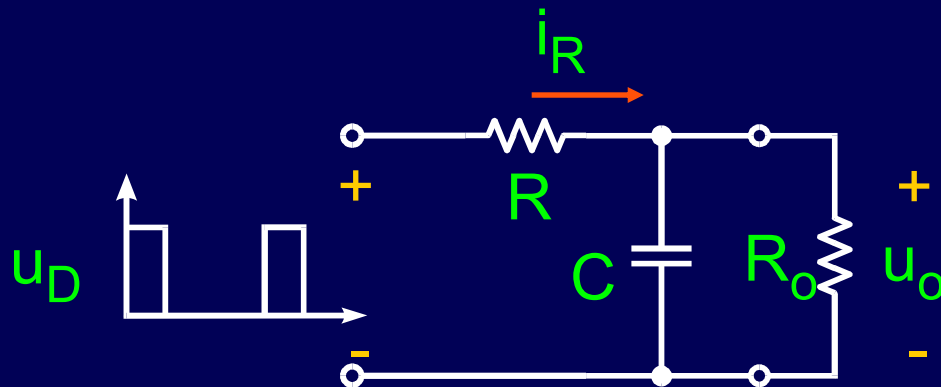
Fattore di conversione:

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \delta k = \text{costante} \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{M}{k}$$

Filtro passa basso del 1° ordine

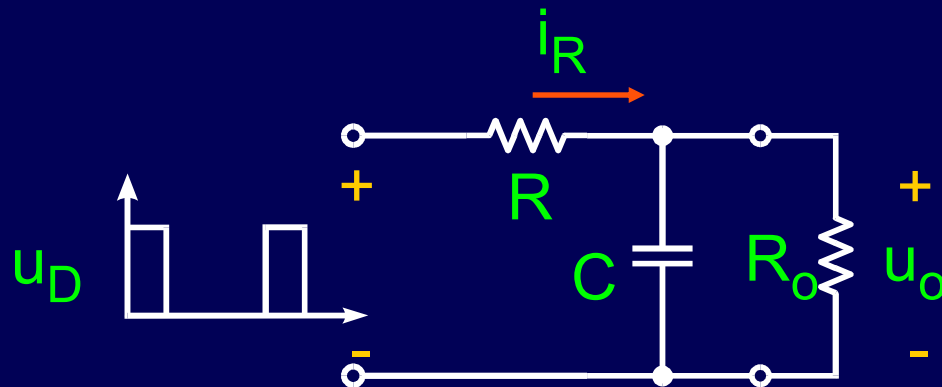


Filtro passa basso del 1° ordine



$$I_{R_{\max}} = \frac{U_i - U_o}{R} = \frac{U_i (1 - M)}{R}$$

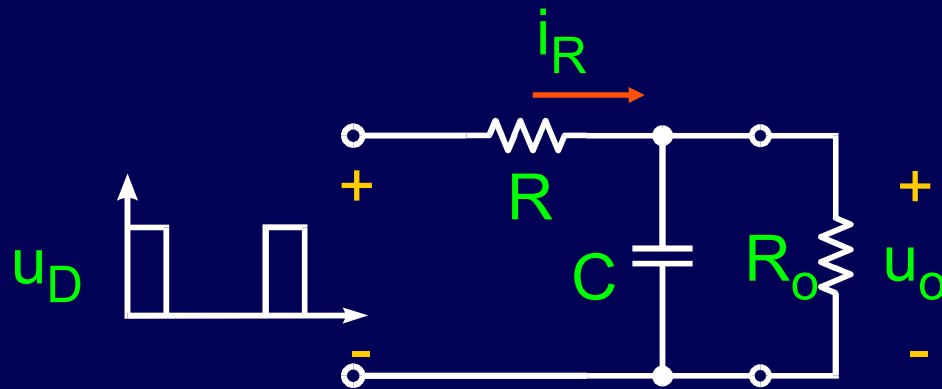
Filtro passa basso del 1° ordine



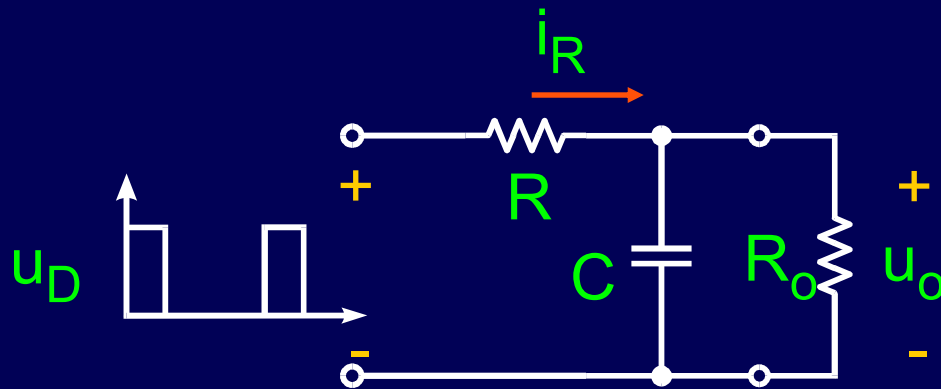
$$I_{R_{\max}} = \frac{U_i - U_o}{R} = \frac{U_i (1 - M)}{R}$$

$$\frac{I_{R_{\max}}}{I_o} = \frac{U_i (1 - M) R_o}{R_s U_o} = \frac{(1 - M)}{M} \frac{k}{(1 - k)}$$

Filtro passa basso del 1° ordine

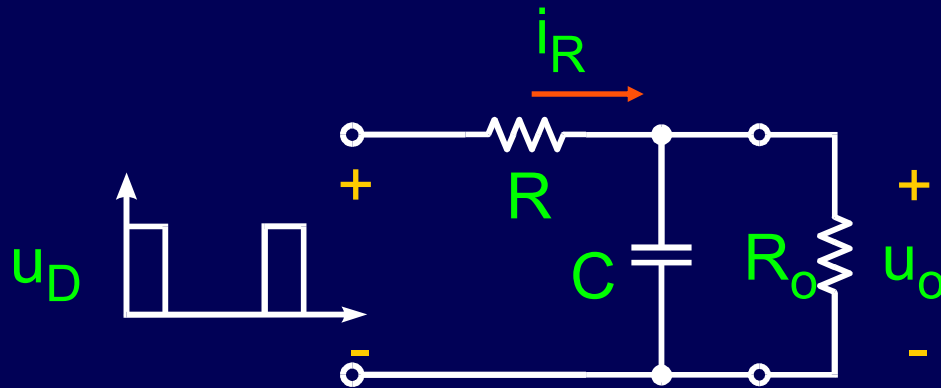


Filtro passa basso del 1° ordine



$$P_i = U_i I_S = U_i I_{R_{\max}} \delta$$

Filtro passa basso del 1° ordine



$$P_i = U_i I_S = U_i I_{R_{\max}} \delta$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{U_o I_o}{U_i I_{R_{\max}} \delta} = \frac{(1-k)M}{(1-M)}$$

Rendimento del filtro del 1° ordine

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R + R_o}$$

Rendimento del filtro del 1° ordine

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R + R_o}$$

Per avere buon rendimento occorre ridurre k, cioè aumentare R. Ciò però limita la massima tensione ottenibile.

Rendimento del filtro del 1° ordine

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R + R_o}$$

Per avere buon rendimento occorre ridurre k , cioè aumentare R . Ciò però limita la massima tensione ottenibile.

$$M = \delta k \quad \longrightarrow \quad k_{\min} = M$$

Rendimento del filtro del 1° ordine

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R + R_o}$$

Per avere buon rendimento occorre ridurre k , cioè aumentare R . Ciò però limita la massima tensione ottenibile.

Assegnato $M = U_o/U_i$, il valore minimo di k si ha per $\delta = 1$ ($k = M$).

Rendimento del filtro del 1° ordine

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{(1-k)M}{(1-M)} \quad M = \frac{U_o}{U_i} \quad k = \frac{R_o}{R + R_o}$$

Per avere buon rendimento occorre ridurre k , cioè aumentare R . Ciò però limita la massima tensione ottenibile.

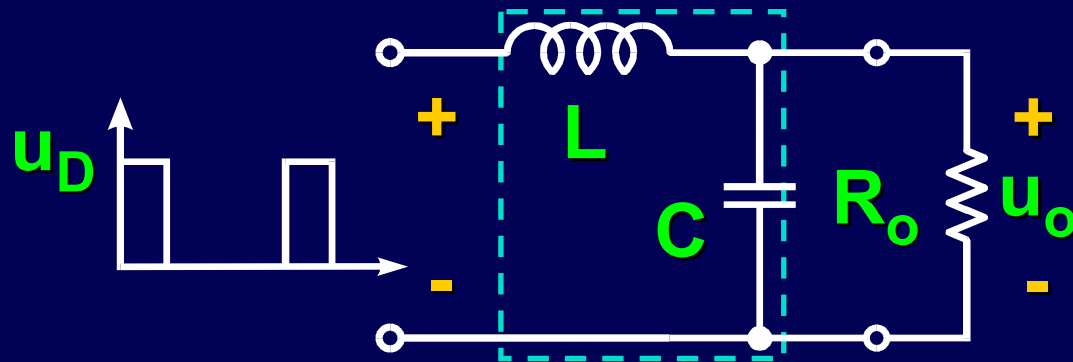
Assegnato $M = U_o/U_i$, il valore minimo di k si ha per $\delta = 1$ ($k = M$).

$$\eta = M$$

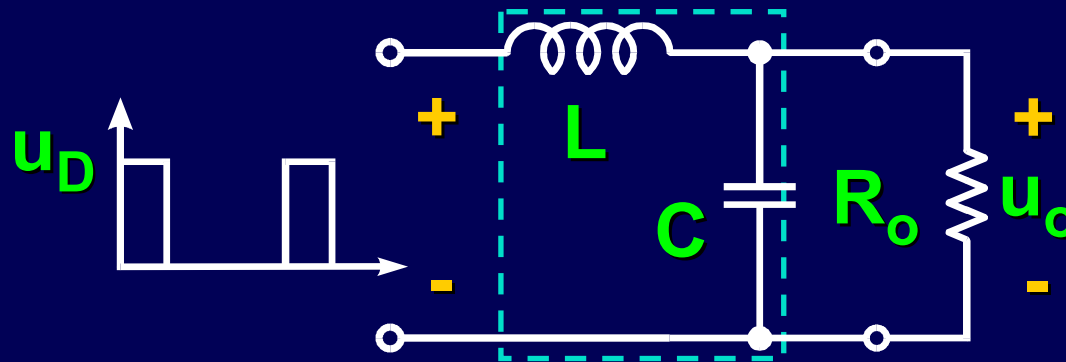
é il massimo valore possibile del rendimento

Filtro passa basso del 2° ordine

Filtro passa basso del 2° ordine

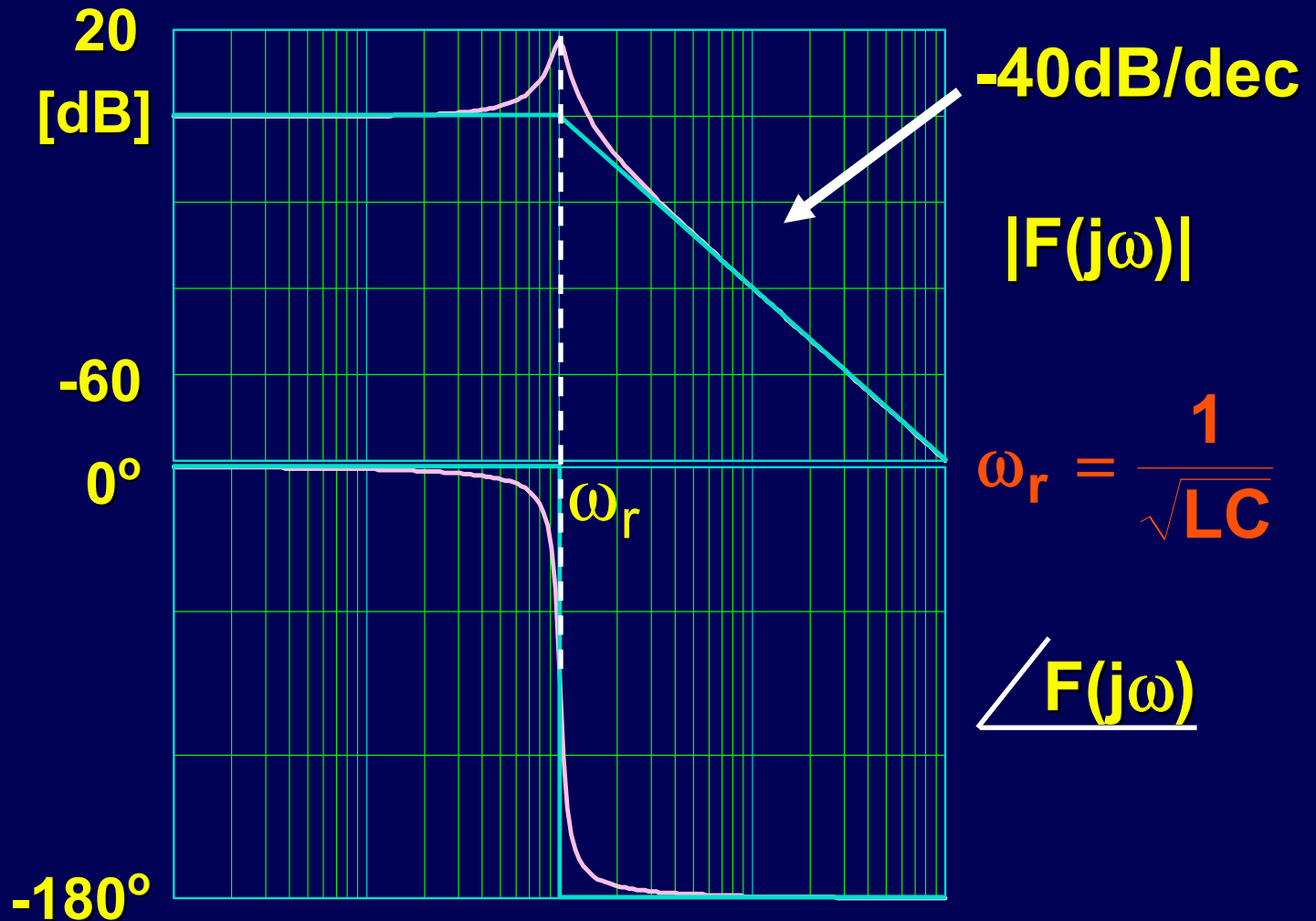


Filtro passa basso del 2° ordine



$$F(s) = \frac{U_o(s)}{U_D(s)} = \frac{1}{1 + s \frac{L}{R_o} + s^2 LC}$$

Filtro passa basso del 2° ordine



Filtro passa basso del 2° ordine

Caratteristiche del filtro:

- **non attenua in c.c.**
- **non è dissipativo**
- **presenta una risonanza (poli complessi coniugati)**
- **ha una efficacia di filtraggio superiore a quella del filtro del 1° ordine**

Filtro del 2° ordine - Esempio:

Filtro del 2° ordine - Esempio:

$$U_i = 48 \text{ V}$$

$$U_o = 12 \text{ V}$$

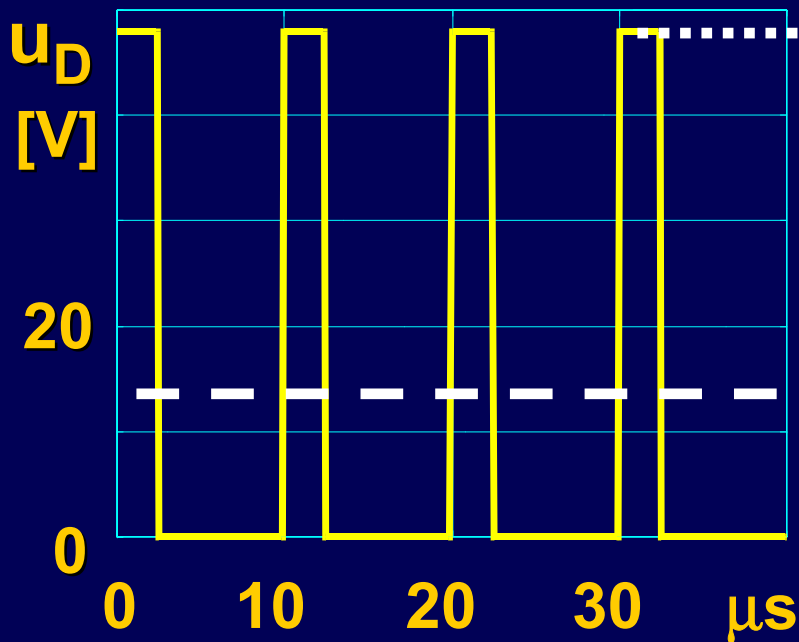
$$I_o = 1 \text{ A}$$

Filtro del 2° ordine - Esempio:

$$U_i = 48 \text{ V}$$

$$U_o = 12 \text{ V}$$

$$I_o = 1 \text{ A}$$



U_i

Valore medio
di u_D :

$$U_D = \delta U_i = U_o$$

Filtro del 2° ordine - Esempio:

$$U_i = 48 \text{ V}$$

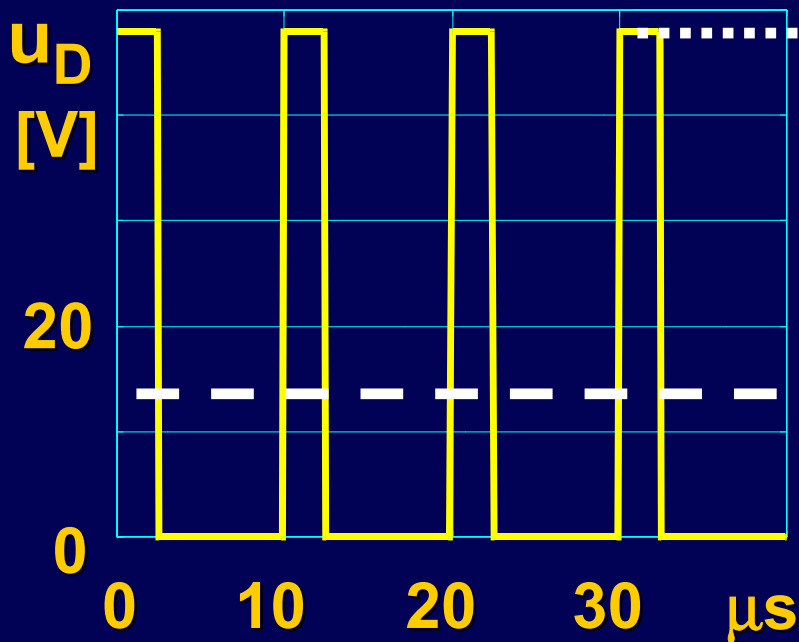
$$U_o = 12 \text{ V}$$

$$I_o = 1 \text{ A}$$



$$\delta = \frac{U_o}{U_i} = 0.25$$

$$R_o = 12 \Omega$$

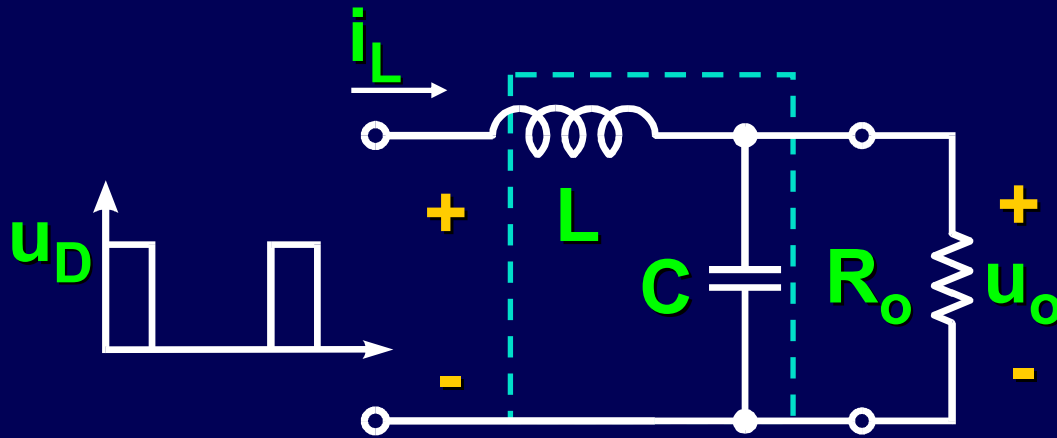


U_i

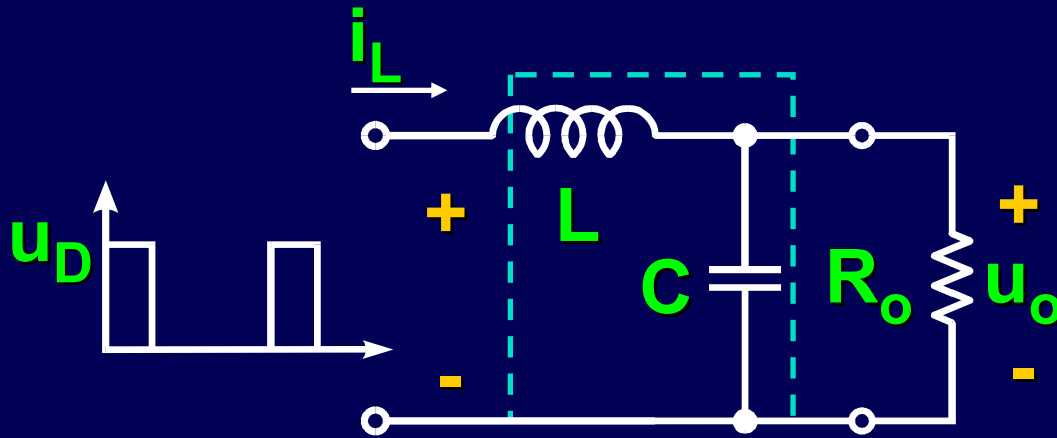
Valore medio
di u_D :

$$U_D = \delta U_i = U_o$$

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

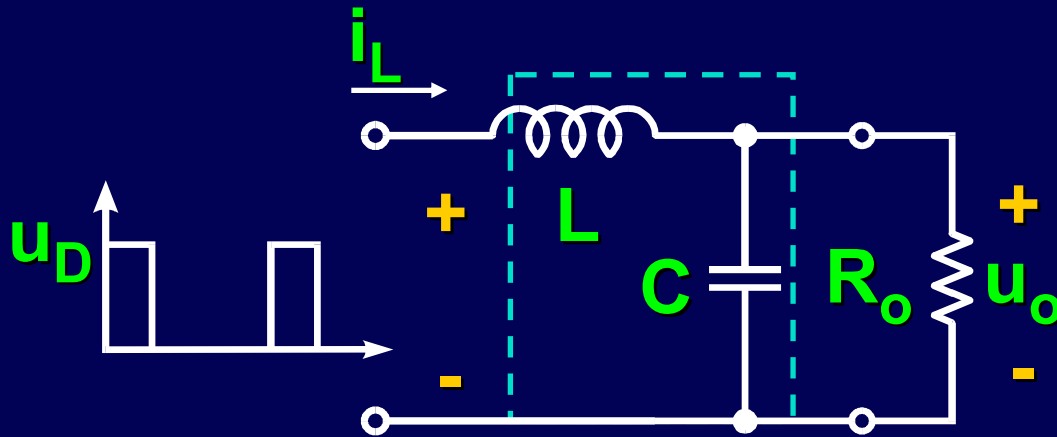


Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Pulsazione di risonanza: $\omega_r = \frac{2\pi f_S}{10}$

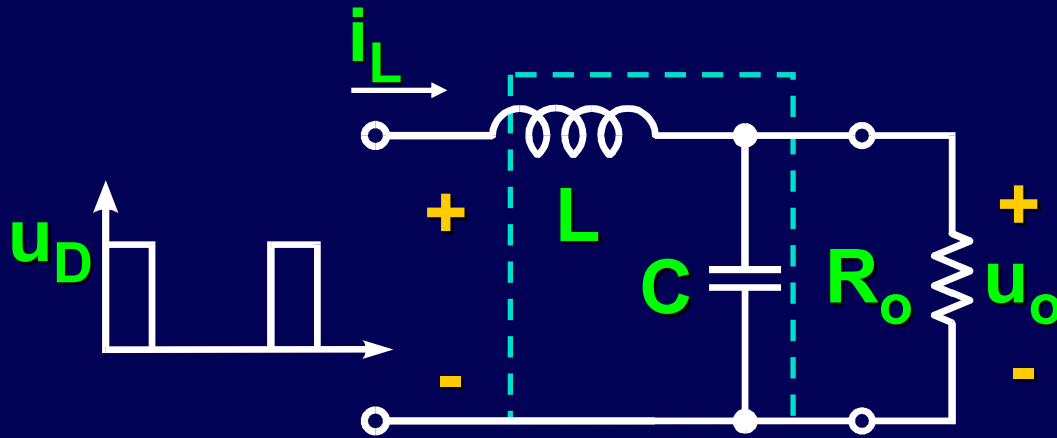
Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Pulsazione di risonanza: $\omega_r = \frac{2\pi f_s}{10}$

In questo modo si ottiene un'attenuazione di 40 dB dell'armonica fondamentale a frequenza f_s .

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

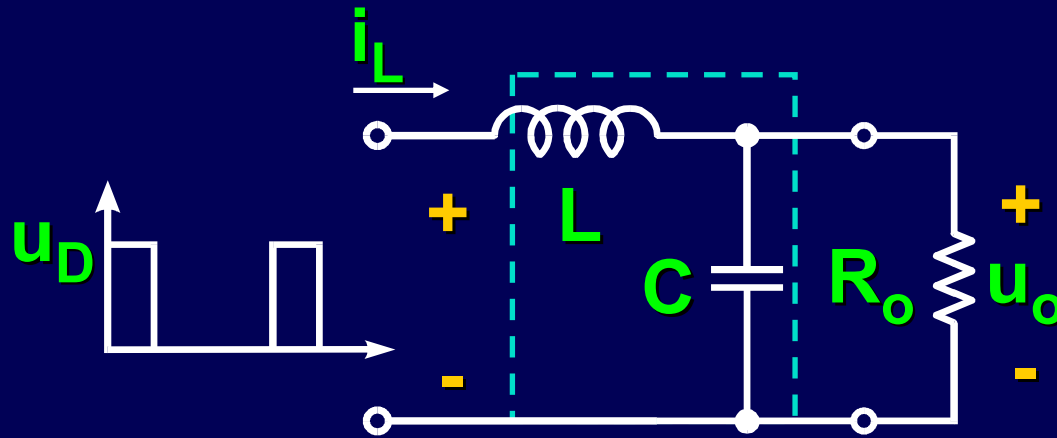


Pulsazione di risonanza: $\omega_r = \frac{2\pi f_s}{10}$

$$f_s = 1/T_s = 100 \text{ kHz}$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

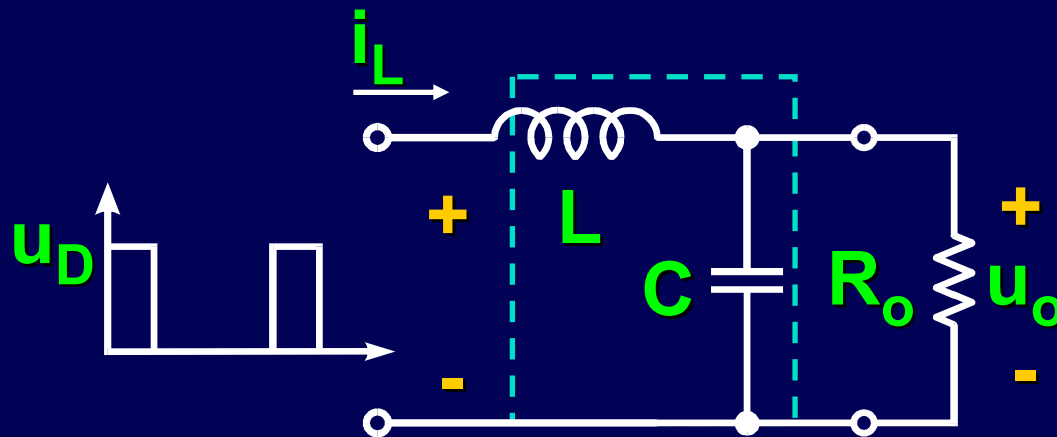
Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Limitazione dell'ondulazione di corrente:

$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_S \cdot L} \delta$$

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

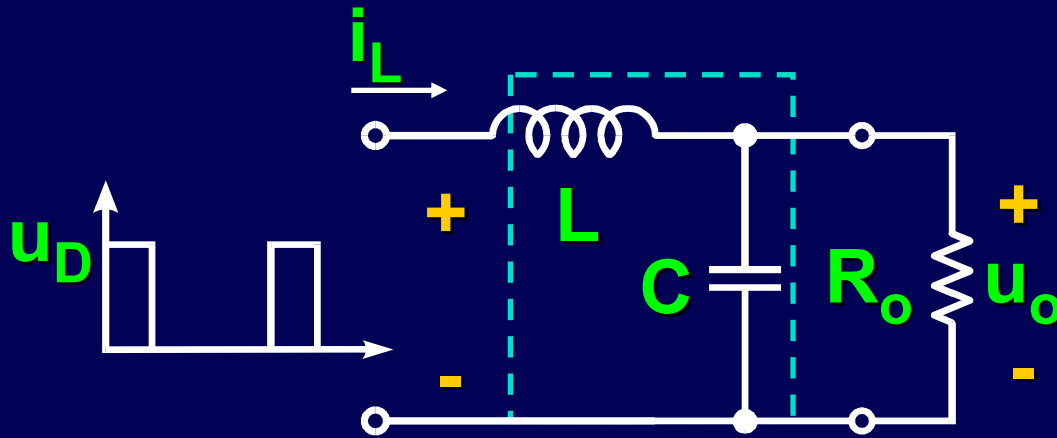


Limitazione dell'ondulazione di corrente:

$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_s \cdot L} \delta$$

Fissati U_o e ΔI_L risulta assegnato il prodotto $f_s \cdot L$.

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento

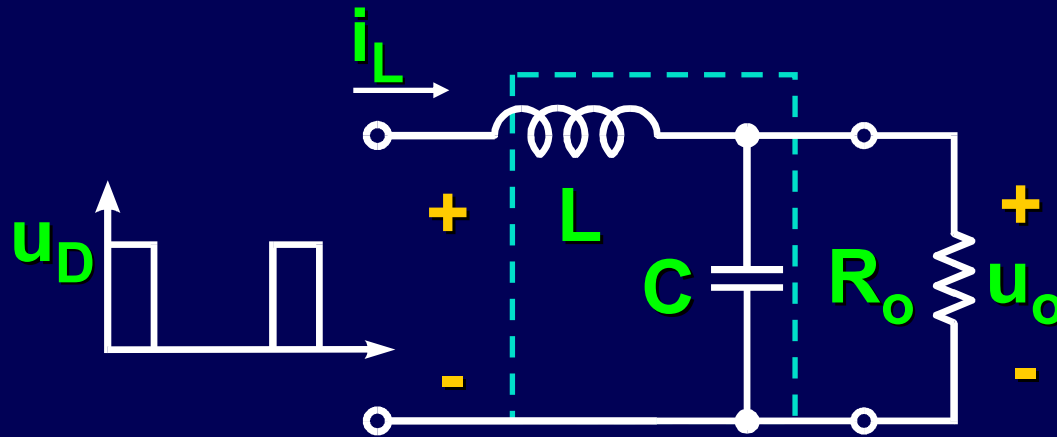


Limitazione dell'ondulazione di corrente:

$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_s \cdot L} \delta$$

Fissati U_o e ΔI_L risulta assegnato il prodotto $f_s \cdot L$.
 L è dunque tanto minore quanto maggiore è f_s .

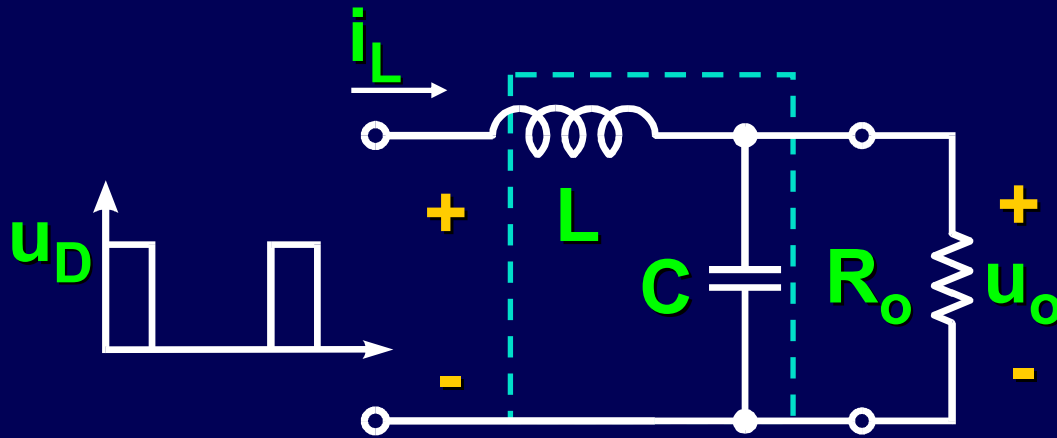
Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



Limitazione dell'ondulazione di corrente:

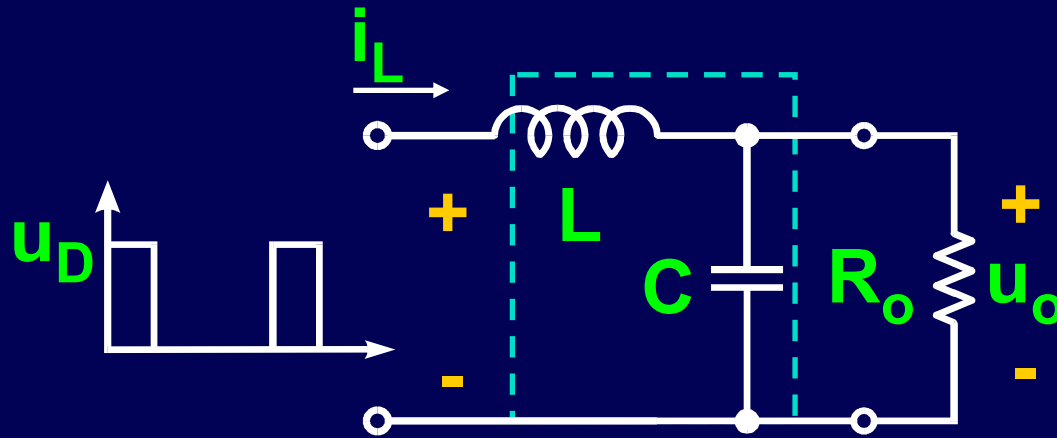
$$\Delta I_L = \frac{U_i - U_o}{L} t_{ON} = \frac{U_i - U_o}{f_s \cdot L} \delta < 0.2 I_o \Rightarrow L = 450 \mu\text{H}$$

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad L = 450 \mu\text{H}$$

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



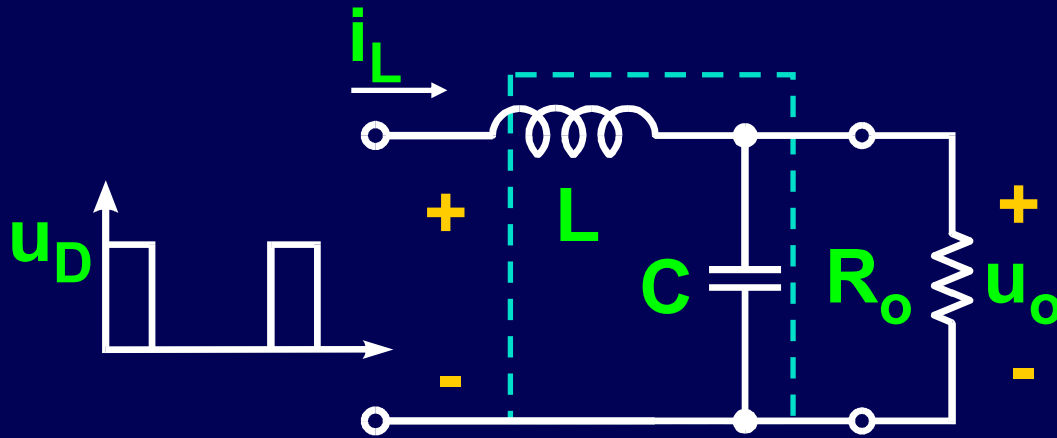
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$L = 450 \mu\text{H}$$



$$C = \frac{1}{\omega_r^2 L} = 0.56 \mu\text{F}$$

Filtro del 2° ordine - Dimensionamento



$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 62.8 \cdot 10^3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$L = 450 \mu\text{H}$$

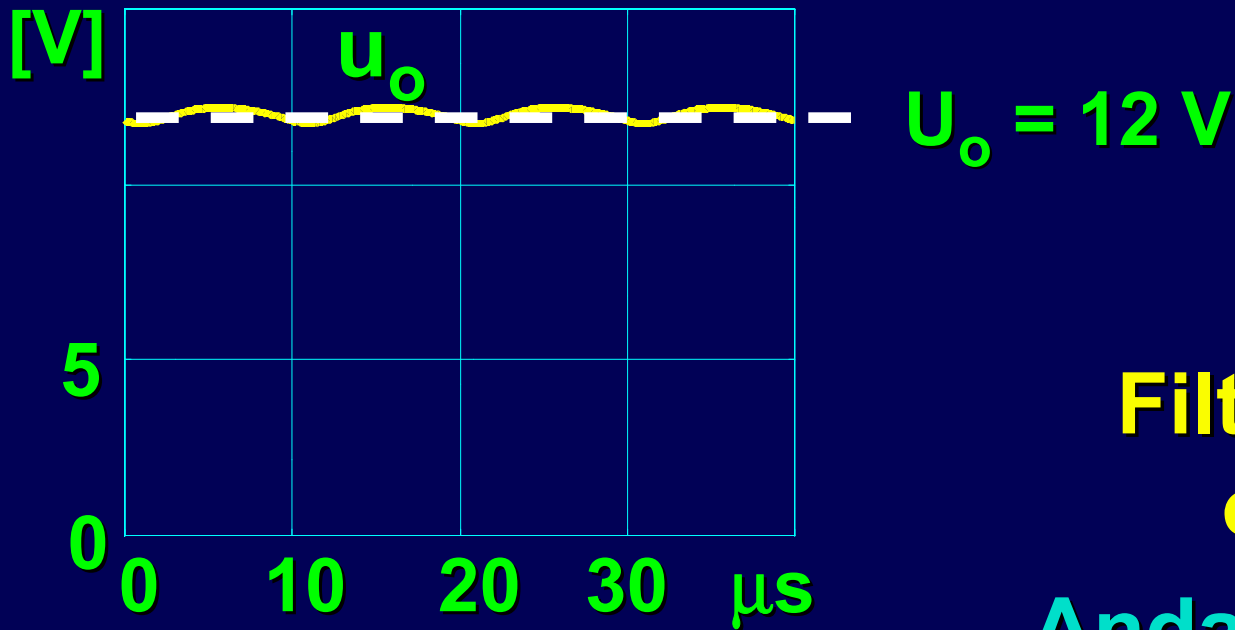


$$C = \frac{1}{\omega_r^2 L} = 0.56 \mu\text{F}$$

Anche C è tanto più piccola quanto maggiore è f_s .

**Filtro del 2°
ordine**

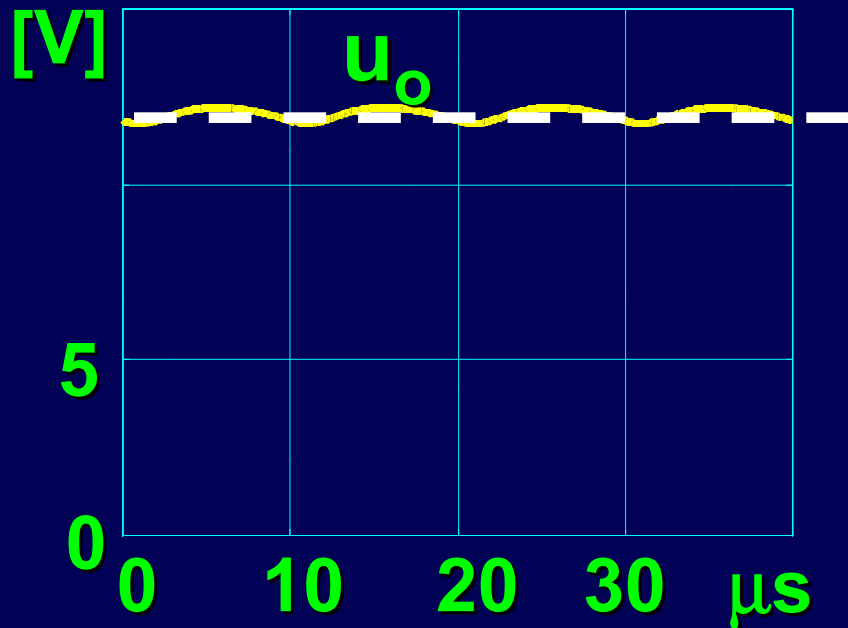
Andamenti reali



**Filtro del 2°
ordine**

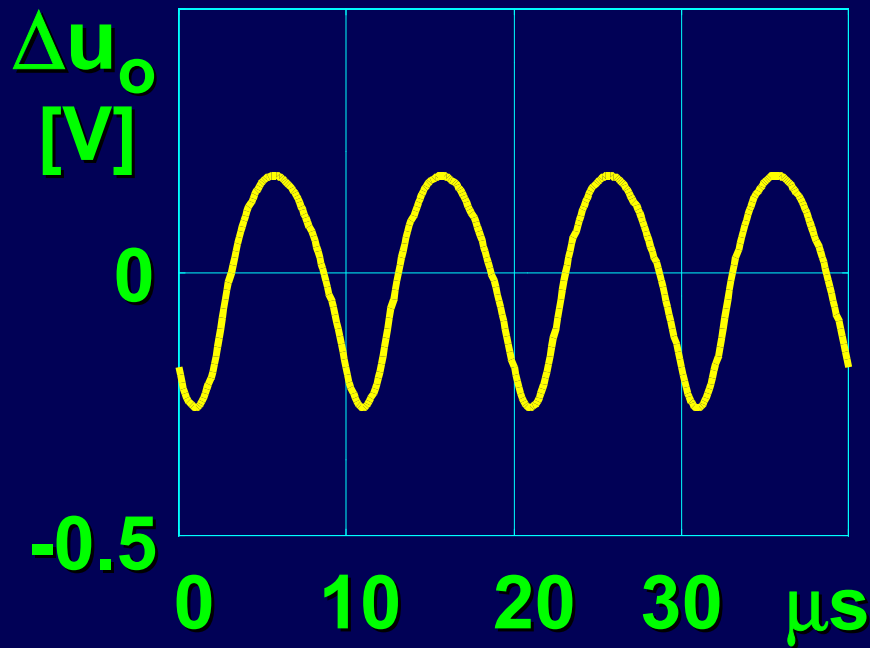
Andamenti reali

**Tensione
di uscita**

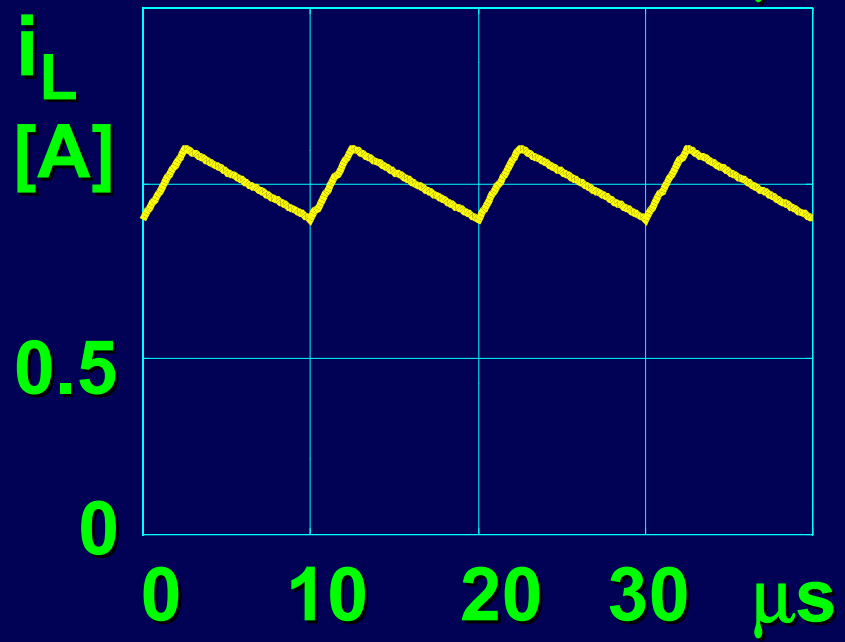
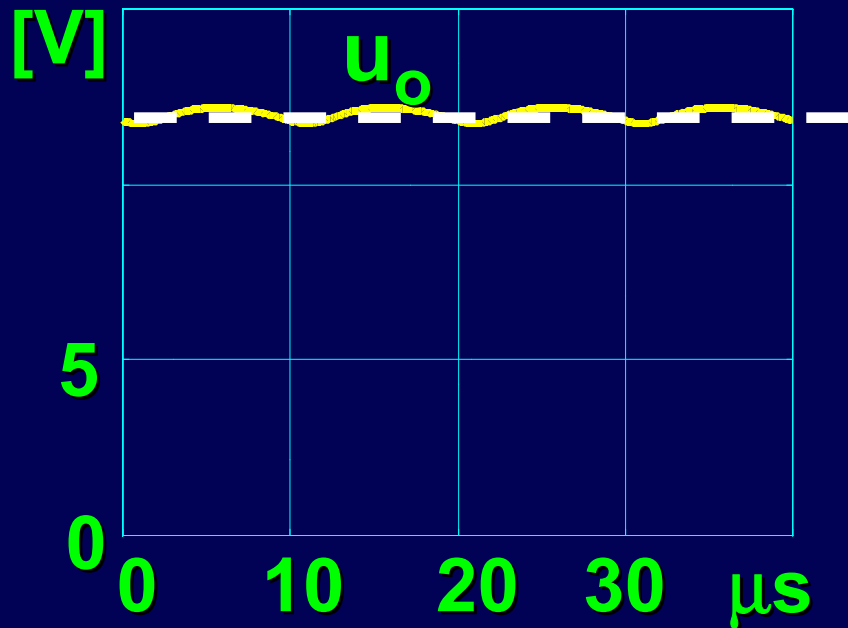


**Filtro del 2°
ordine**

Andamenti reali



**Tensione
di uscita e sua
ondulazione**



**Filtro del 2°
ordine**

Andamenti reali

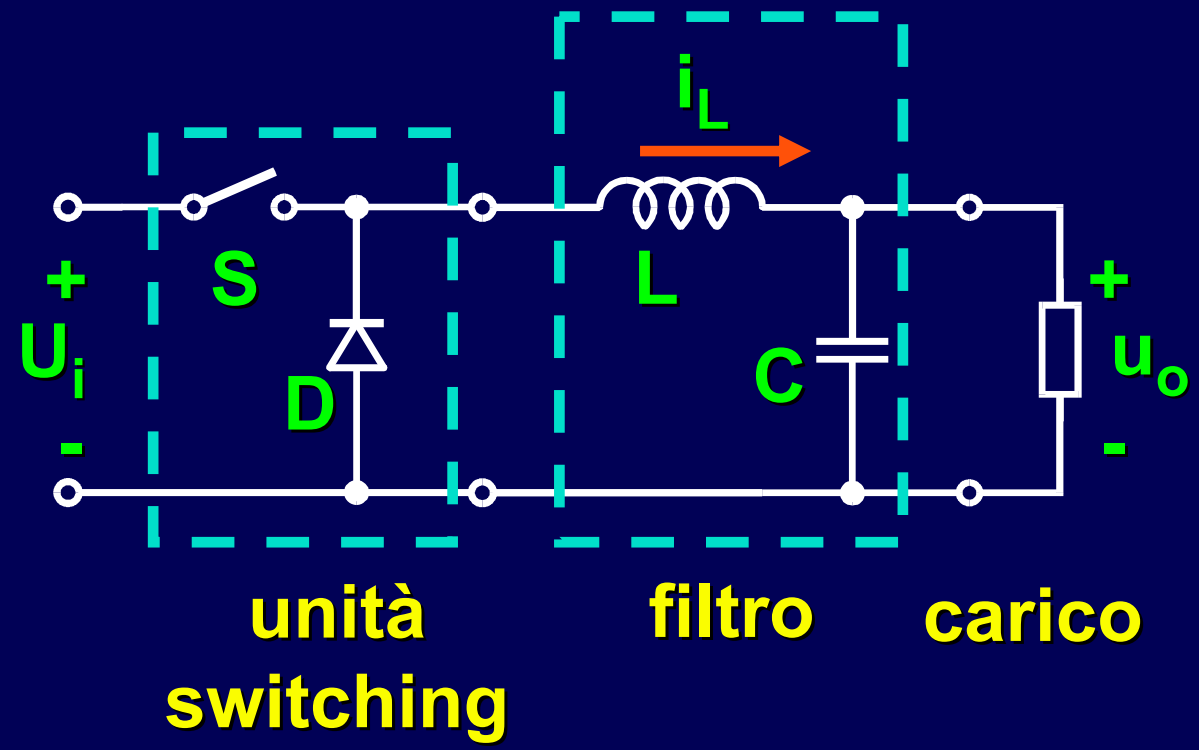
**Tensione
di uscita e corrente
nell'induttanza**

Filtro del 2° ordine

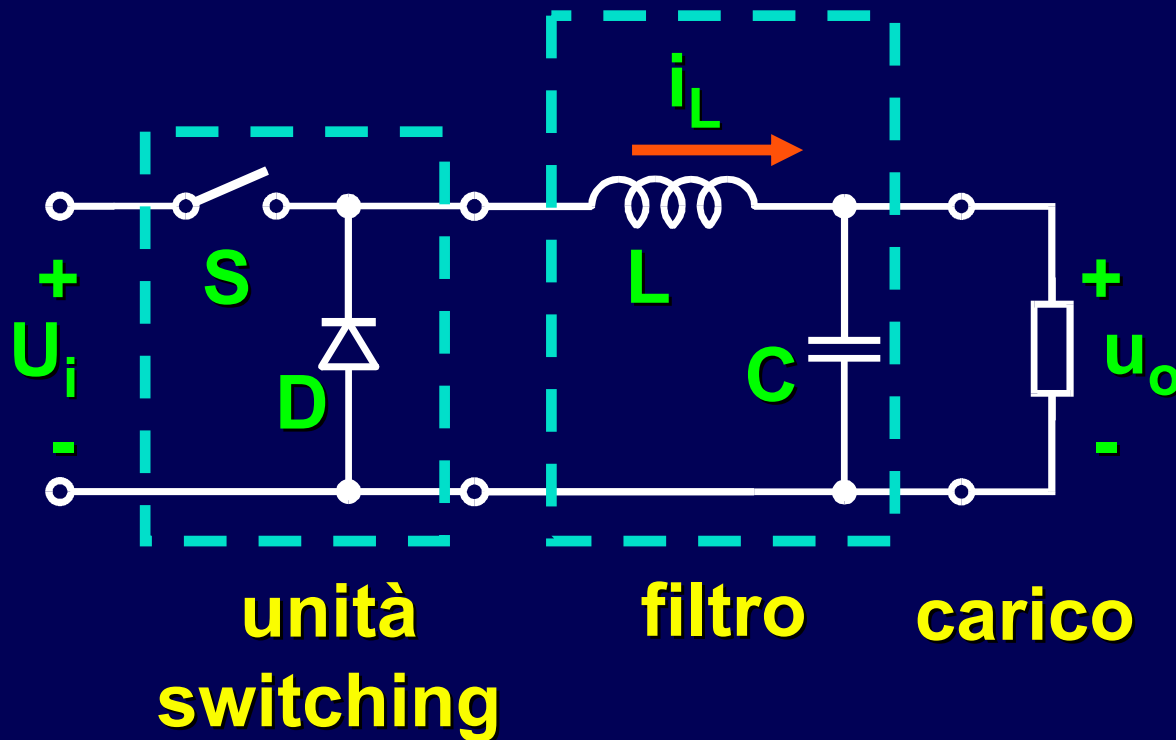
Conclusioni

- **il filtro non attenua e non è dissipativo**
- **per avere bassa ondulazione della tensione di uscita la frequenza di risonanza deve essere significativamente inferiore alla frequenza di commutazione**
- **a parità di attenuazione il filtro risulta tanto più piccolo quanto più elevata è la frequenza di commutazione**

Schema complessivo del convertitore Buck (Step-down)



Schema complessivo del convertitore Buck (Step-down)



Il diodo D (di libera circolazione o free-wheeling) è necessario per la richiusura della corrente i_L quando l'interruttore S è aperto

Conclusioni

- **Il convertitore abbassatore di tensione (Buck o Step-Down) include:**
 - una sezione di commutazione (switching), costituita da un interruttore elettronico e da un diodo
 - un filtro del secondo ordine
- **Il controllo della tensione d'uscita si effettua regolando il duty-cycle con la tecnica PWM**
- **Il rendimento del convertitore è teoricamente unitario**