Università degli studi di Bergamo

Scuola di Ingegneria (Dolmine)

CCS Ingegneria Edile

LM-24 Ingegneria delle Costruzioni Edili

Dinamica (, Instabilità) e Anelasticità delle Strutture

(ICAR/08 - SdC; 6 CFU)

A.A. 2021/2022

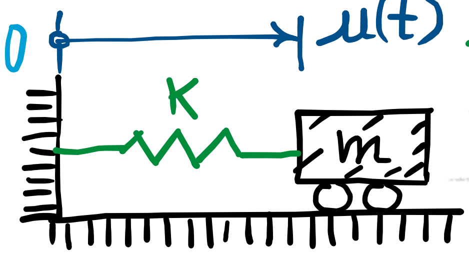
prof. Egidio RIZZI

egidio.rizzi@unibg.it

LEZIONE 02

Sistemi SDOF – Oscillazioni libere (non smorzate) $\quad$ [Notazione: $\frac{d}{dt}(\,) = (\dot{\,})$]

$F = 0 \qquad (c = 0)$

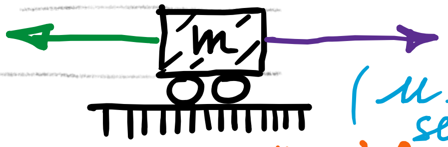


u_0

$\dot{u}_0$

c.i. $\quad m, K$ cost > 0

$F_e = Ku \qquad F_i = -m\ddot{u}$



(u e $\ddot{u}$ di segno opposto)

$\Rightarrow$ "equil. dinamico"

$$\cancel{m}\ddot{u} + \underbrace{\frac{K}{m}}_{\omega_1^2} u = \frac{0}{m} \qquad (1) \qquad [\omega_1] = \frac{1}{[t]} \quad \frac{rad}{s}$$

$$\omega_1^2 = \frac{K}{m} \; ; \; \omega_1 = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

pulsazione naturale o propria (frequenza angolare)

$\omega_1 \uparrow \; K\uparrow, m\downarrow \; ; \; \omega_1 \downarrow \; K\downarrow, m\uparrow$

Si cercano soluzioni nella forma: $\quad [\ddot{u} + \omega_1^2 u = 0]$

$$u(t) = e^{\lambda t} \qquad (\lambda \text{ complesso})$$

$$\dot{u}(t) = \lambda e^{\lambda t} = \lambda u$$

$$\ddot{u}(t) = \lambda^2 e^{\lambda t} = \lambda^2 u$$

$i = e^{i\frac{\pi}{2}}$

i: unità immaginaria

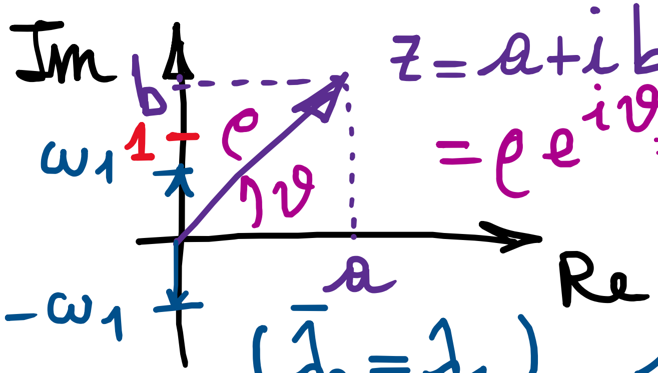
$i^2 = -1$

Sostituendo in (1): $\quad \lambda^2 u + \omega_1^2 u = 0 \Rightarrow (\lambda^2 + \omega_1^2)\, u = 0$

$e^{\lambda t} \neq 0 \;\; \forall t$

$$\lambda^2 + \omega_1^2 = 0 \Rightarrow \lambda^2 = -\omega_1^2 = i^2\omega_1^2 = (i\omega_1)^2$$

piano complesso o di Argand



$$z = a + ib = \rho e^{i\vartheta} = \rho(\cos\vartheta + i\sin\vartheta)$$

$$\lambda_{1,2} = \pm i\omega_1$$

$(\bar{\lambda}_2 = \lambda_1)$ $\quad$ due radici puram. immaginarie (complesse coniug.)

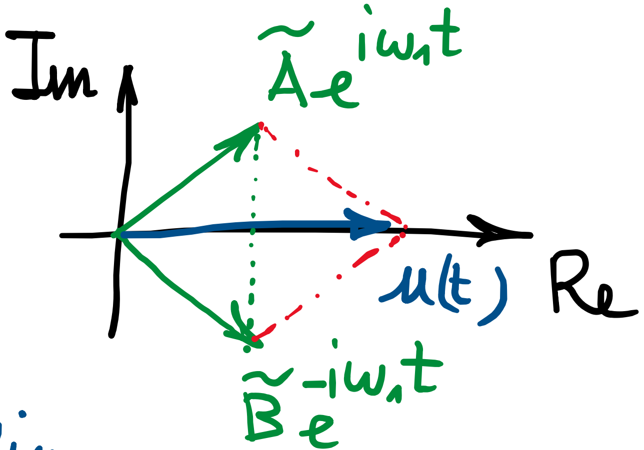
Integrale generale: $u = e^{\lambda_{1,2} t}$ $\quad \lambda_{1,2} = \pm i\omega_1$

$$u(t) = \tilde{A}\, e^{\lambda_1 t} + \tilde{B}\, e^{\lambda_2 t}$$

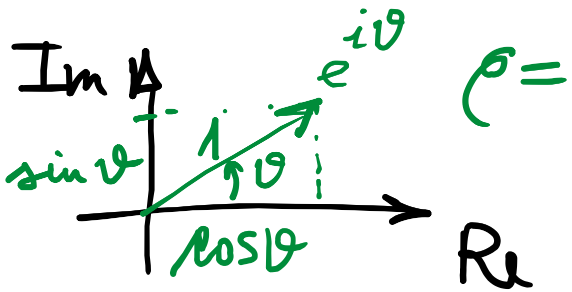
combinaz. lineare di $e^{\lambda_1 t}$ ed $e^{\lambda_2 t}$

$\tilde{B} = \overline{\tilde{A}}$

complesso coniugato $\overline{e^{i\omega_1 t}} = e^{-i\omega_1 t}$



Peraltro, dati $e^{\lambda_{1,2} t}$, anche una loro combinazione lin. è integrale, utile a formare l'integrale generale.



$\rho = 1$

Formula di Eulero: $\rho e^{i\vartheta} = \rho(\cos\vartheta + i\sin\vartheta)$

$$e^{-i\vartheta} = \cos\vartheta - i\sin\vartheta$$

$$e^{i\vartheta} + e^{-i\vartheta} = 2\cos\vartheta \rightarrow \cos\vartheta = \frac{e^{i\vartheta} + e^{-i\vartheta}}{2}$$

$$e^{i\vartheta} - e^{-i\vartheta} = 2i\sin\vartheta \rightarrow \sin\vartheta = \frac{e^{i\vartheta} - e^{-i\vartheta}}{2i}$$

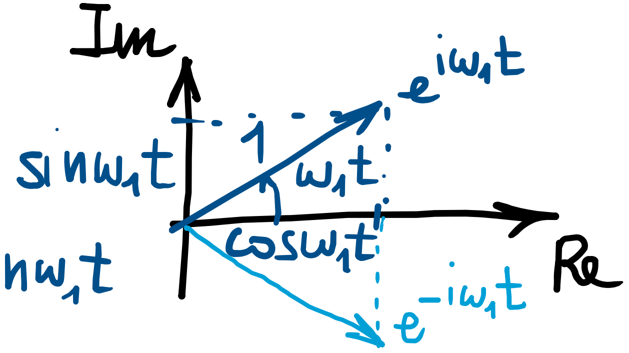
sin e cos sono combinaz. lineare di $e^{i\vartheta}$ ed $e^{-i\vartheta}$

Quindi, anche $\sin\omega_1 t$ e $\cos\omega_1 t$ sono integrali utili a generare l'integrale generale cercato.

Integrale generale in sen e cos:

$$\boxed{u(t) = A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t}$$

$$e^{\lambda_{1,2} t} = e^{\pm i \omega_1 t} = \cos \omega_1 t \pm i \sin \omega_1 t$$



$$\dot{u}(t) = \omega_1 \left(A \cos \omega_1 t - B \sin \omega_1 t \right)$$

$$\ddot{u}(t) = -\omega_1^2 \underbrace{\left(A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t \right)}_{u} = -\omega_1^2 u \Leftarrow \ddot{u} + \omega_1^2 u \overset{\checkmark}{=} 0$$

equazione dei moti armonici

Costanti A e B da determinare imponendo le c.i.:

$$u(0) = u_0 \rightarrow u(0) = \boxed{B = u_0}$$

$$\dot{u}(0) = \dot{u}_0 \rightarrow \dot{u}(0) = \omega_1 A = \dot{u}_0 \Rightarrow \boxed{A = \frac{\dot{u}_0}{\omega_1}}$$

Integrale finale: u_0 e $\dot{u}_0$ definiscono l'ampiezza (cost) del moto armonico

$$\boxed{u(t) = \frac{\dot{u}_0}{\omega_1} \sin \omega_1 t + u_0 \cos \omega_1 t}$$

moto armonico di pulsazione ω_1 e periodo proprio $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{1}{f_1}$

ampiezza costante

Infatti: $\sin \omega_1 (t+T_1) = \sin \omega_1 t \Rightarrow \omega_1 T_1 = 2\pi$

$\cos$ $\quad$ T_1 ⟵ periodo

funzioni periodiche di periodo 2π

$u(t+T) = u(t)$ f.ne periodica di periodo T

$[s]$ $T_1 = \dfrac{2\pi}{\omega_1} = \dfrac{1}{f_1}$

$f_1 = \dfrac{\omega_1}{2\pi}$; $\omega_1 = 2\pi f_1$ ⟵ frequenza ciclica $[s^{-1}] = [Hz]$ (cicli al secondo) Hertz

Altre rappresentazioni:

$$u(t) = R\cos(\omega_1 t - \varphi)$$
$$u(t) = R\sin(\omega_1 t + \psi)$$

R: ampiezza; φ e ψ: fasi ⟵ angoli di fase

⟵ sfasamento in ritardo rispetto a $\cos \omega_1 t$

in anticipo rispetto a $\sin \omega_1 t$

$$u(t) = R(\cos \omega_1 t \cos\varphi + \sin \omega_1 t \sin\varphi)$$
$$= \underbrace{R\sin\varphi}_{A} \sin\omega_1 t + \underbrace{R\cos\varphi}_{B} \cos\omega_1 t$$

$$u(t) = R(\sin\omega_1 t \cos\psi + \cos\omega_1 t \sin\psi)$$
$$= \underbrace{R\cos\psi}_{A} \sin\omega_1 t + \underbrace{R\sin\psi}_{B} \cos\omega_1 t$$

$$\begin{cases} A = R\sin\varphi = R\cos\psi \\ B = R\cos\varphi = R\sin\psi \end{cases}$$

$$\frac{A}{B} = \tan\varphi = \frac{1}{\tan\psi} \quad \left(\varphi + \psi = \frac{\pi}{2}\right)$$

relaz. $R;\varphi;\psi \Rightarrow A,B$

$$\begin{cases} A = R\sin\varphi = R\cos\psi \\ B = R\cos\varphi = R\sin\psi \end{cases} \Rightarrow A^2+B^2=R^2 \Rightarrow R=\sqrt{A^2+B^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\dot{u}_0}{\omega_1}\right)^2 + u_0^2}$$

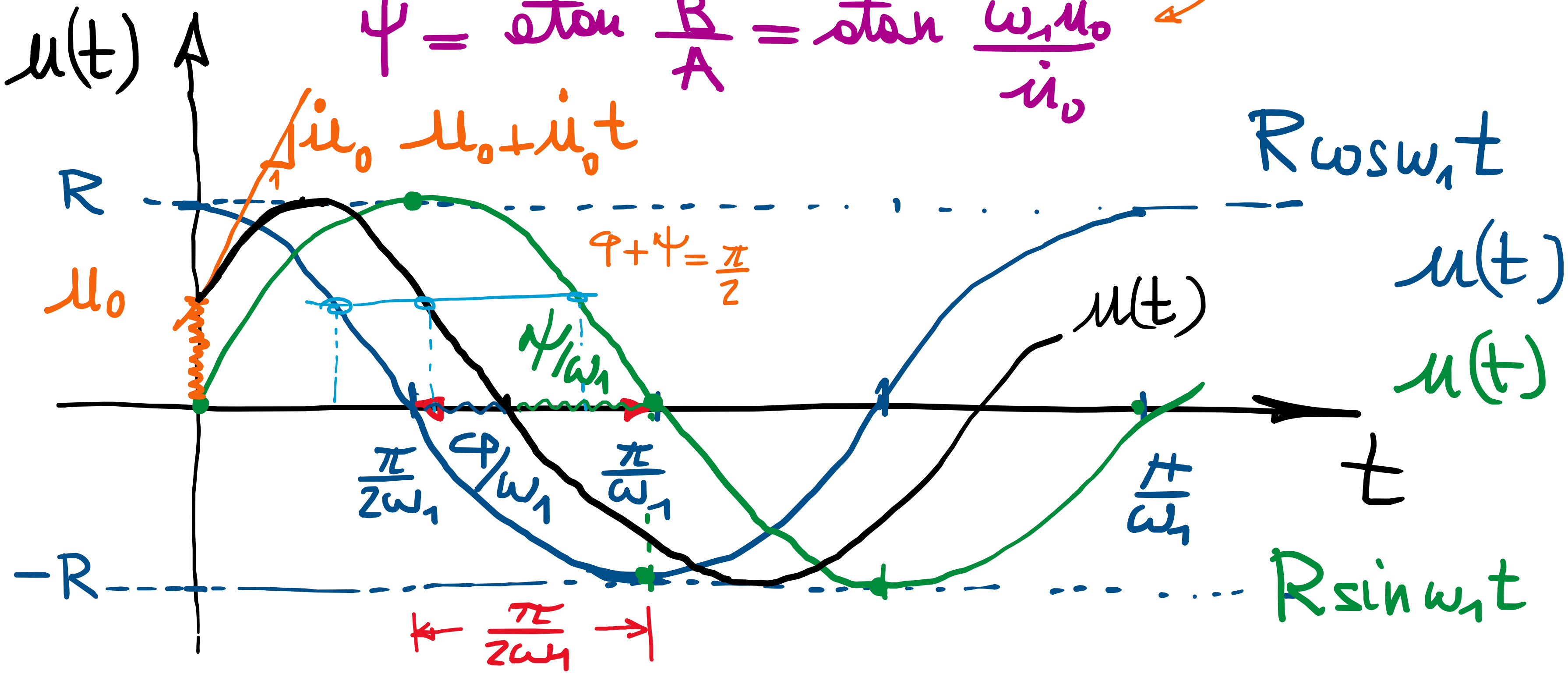
ampiezza dipendente dalle c.i.
e da ω_1 (caratteristica del sistema)

$$\frac{A}{B} = \tan\varphi = \frac{1}{\tan\psi} \quad \left(\varphi+\psi = \frac{\pi}{2}\right) \text{ angoli complementari}$$

$$\Rightarrow \varphi = \arctan\frac{A}{B} = \arctan\frac{\dot{u}_0}{\omega_1 u_0}$$

$$\psi = \arctan\frac{B}{A} = \arctan\frac{\omega_1 u_0}{\dot{u}_0}$$

relazioni $A,B \Rightarrow R;\varphi;\psi$



$$u(t) = R\cos(\omega_1 t - \varphi)$$

$$u(t) = R\sin(\omega_1 t + \psi)$$

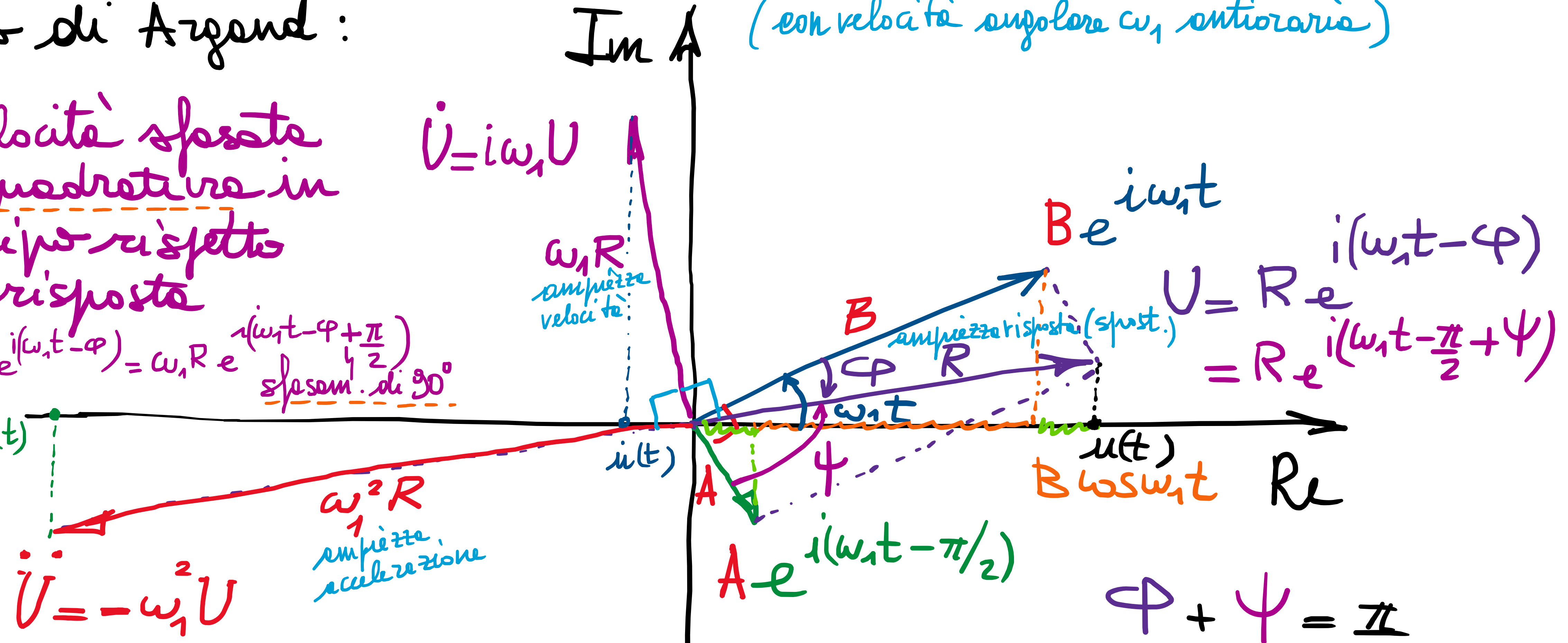
Interpretazione (del moto armonico) mediante vettori rotanti nel piano di Argand:

(con velocità angolare ω_1 antioraria)

velocità sfasata in quadratura in anticipo rispetto alla risposta

$\dot{U} = \underbrace{i}_{e^{i\pi/2}}\omega_1 R e^{i(\omega_1 t-\varphi)} = \omega_1 R\, e^{i(\omega_1 t-\varphi+\frac{\pi}{2})}$

sfasam. di 90°



$\varphi + \psi = \frac{\pi}{2}$

$A\cos(\omega_1 t-\pi/2) = A\sin\omega_1 t$

accelerazione in opposizione di fase rispetto alla risposta ($\ddot{u} = -\omega_1^2 u$) ove u è positivo, $\ddot{u}$ è negativo

sfasamento di 180°

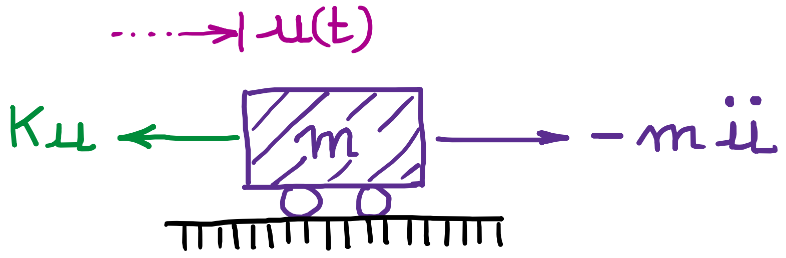
$u(t)$ è la proiezione orizzontale di $U(t)$ (ombra sull'asse x)

Concetti fondamentali :

- Oscillazioni libere non smorzate $\Rightarrow$ eq.ne dei moti armonici :

$m, K = \text{cost}$
sistema tempo-invariante

con c.i. $\begin{cases} u_0 \\ \dot{u}_0 \end{cases}$ @ $t = t_0$



$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{m}}$ pulsazione naturale del sistema

$$m\ddot{u}(t) + Ku(t) = 0 \Rightarrow \ddot{u}(t) + \omega_1^2 u(t) = 0$$

- Integrale generale (soluzione) $\Rightarrow$ moto armonico di pulsazione ω_1 e ampiezza (R) costante :

$$u(t) = \underbrace{A}_{\frac{\dot{u}_0}{\omega_1}} \sin\omega_1 t + \underbrace{B}_{u_0} \cos\omega_1 t = R\cos(\omega_1 t - \varphi) = R\sin(\omega_1 t + \psi) \qquad R = \sqrt{A^2 + B^2}$$

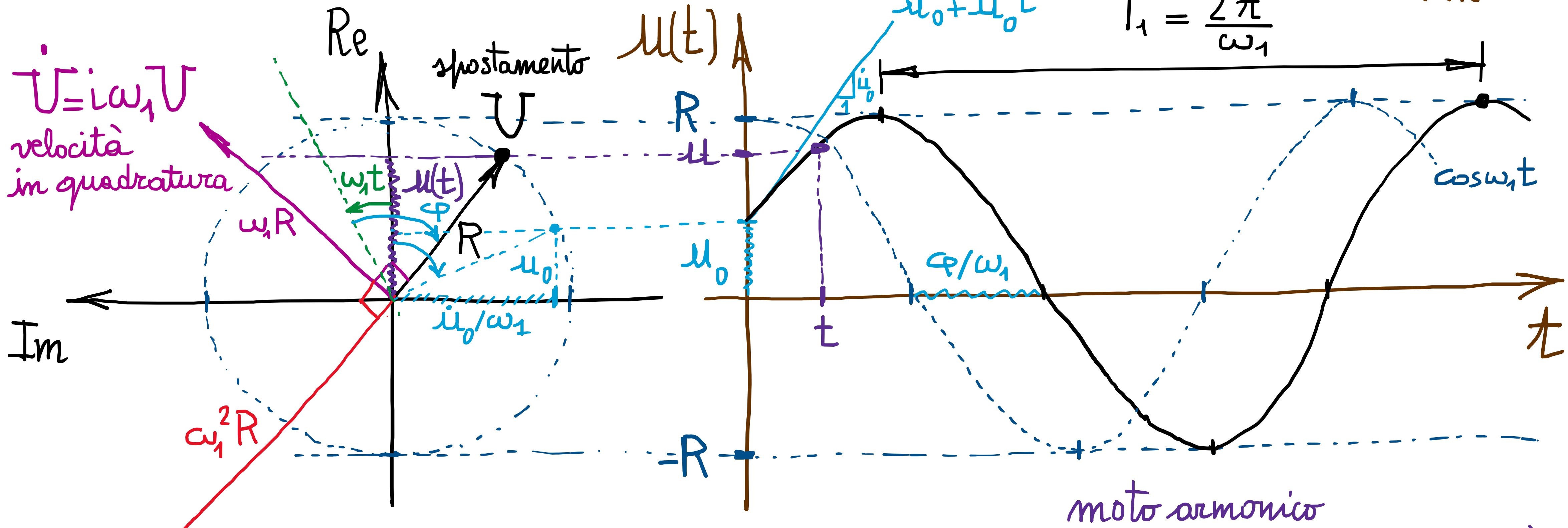
$$= \frac{\dot{u}_0}{\omega_1} \sin\omega_1 t + u_0 \cos\omega_1 t$$

fasi: $\varphi = \text{atan}\frac{A}{B}$, $\psi = \text{atan}\frac{B}{A}$

– Rappresentazione con vettori rotanti nel piano di Argand e grafico in funzione di t:

$$U = R e^{i(\omega_1 t - \varphi)}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{m}}$$



$\ddot{U} = -\omega_1^2 U$
accelerazione
in opposizione di fase

$$R = \sqrt{\left(\frac{\dot{u}_0}{\omega_1}\right)^2 + u_0^2}$$

$$\varphi = \operatorname{atan} \frac{\dot{u}_0/\omega_1}{u_0}$$

moto armonico
di pulsazione ω_1 (periodo T_1)
e ampiezza R costante
sfasato in ritardo di φ
rispetto a $\cos\omega_1 t$

SOMMARIO (Lez. 02)

- Oscillazioni libere non smorzate (in risposta alle sole c.i.).
- Eq.ne dei moti armonici.
- Pulsazione naturale del sistema $\omega_1 = \sqrt{K/m}$.
- Moto armonico di periodo naturale $T_1 = 2\pi/\omega_1$ (e ampiezza costante).
- Ampiezza e sfasamento, rispetto a puro cos o sin.
- Rappresentazione del moto mediante vettori rotanti nel piano di Argand: U sfasata; $\dot{U} \sim \omega_1 U$ in quadratura in anticipo; $\ddot{U} \sim -\omega_1^2 U$ in opposizione di fase.

- Next step: generalizzazione al caso smorzato, con ampiezza decadente nel tempo.