

Chronomètre - balancier bimétallique à vis coupé**Oscillateur**

Fréquence, période, amplitude stationnaire

$$f := 9000 \cdot h^{-1} \quad f = 2.5 \text{ Hz} \quad T_0 := \frac{1}{f} \quad T_0 = 0.4 \text{ s} \quad \omega_0 := 2 \cdot \pi \cdot f \quad \theta_0 := 270 \cdot \text{deg} \quad (\text{choix})$$

Balancier à vis

Angle de levée

$$\lambda_b := 40 \cdot \text{deg}$$

$$\text{serge} \quad D_{s_ext} := 19.2 \cdot \text{mm} \quad e_s := 0.6 \cdot \text{mm} \quad D_{s_int} := D_{s_ext} - 2 \cdot e_s \quad D_{s_int} = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 := 0.245 \cdot \text{mm} \quad e_2 := e_s - e_1 \quad e_2 = 0.355 \text{ mm} \quad h_s := 1.2 \cdot \text{mm}$$

$$\rho_{ac} := 7.8 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad \rho_{lt} := 8.7 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad R_0 := \frac{D_{s_int}}{2} + e_1 \quad R_0 = 9.245 \text{ mm}$$

$$\text{vis} \quad d_{vis} := 1.2 \cdot \text{mm} \quad h_{vis} := 1 \cdot \text{mm} \quad nb_{vis} := 20$$

$$M_1 := \pi \cdot \rho_{ac} \cdot h_s \cdot [R_0^2 - (R_0 - e_1)^2] \quad M_2 := \pi \cdot \rho_{lt} \cdot h_s \cdot [(R_0 + e_2)^2 - R_0^2] \quad M_{serge} := M_1 + M_2$$

$$J_{serge} := \frac{1}{2} \cdot M_1 \cdot [R_0^2 + (R_0 - e_1)^2] + \frac{1}{2} \cdot M_2 \cdot [(R_0 + e_2)^2 + R_0^2] \quad M_{serge} = 350.9 \text{ mg} \quad J_{serge} = 304.3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$M_{vis} := \frac{1}{4} \cdot \rho_{lt} \cdot \pi \cdot d_{vis}^2 \cdot h_{vis}$$

$$J_{vis} := \frac{M_{vis}}{12} \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot d_{vis}^2 + h_{vis}^2 \right) + M_{vis} \cdot \left(\frac{D_{s_ext}}{2} + \frac{h_{vis}}{2} \right)^2 \quad M_{vis} = 9.839 \text{ mg} \quad J_{vis} = 10.054 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

$$M_b := 1.2 \cdot (M_{serge} + nb_{vis} \cdot M_{vis}) \quad M_b = 657.2 \text{ mg}$$

$$J_b := 1.1 \cdot (J_{serge} + nb_{vis} \cdot J_{vis}) \quad J_b = 555.9 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$

Valeur adoptée

$$J_b := 550 \cdot \text{mg} \cdot \text{cm}^2$$

Pivotage

$$D_{pivot_b} := 0.11 \cdot \text{mm}$$

$$D_{appui} := 0.08 \cdot \text{mm}$$

(estimation)

Pare-choc

$$D_{t_p_b} := 0.12 \cdot \text{mm}$$

$$L_{palier_sup_b} := 0.07 \cdot \text{mm}$$

$$L_{palier_inf_b} := 0.07 \cdot \text{mm}$$

Paramètres de frottements

$$f_b := 0.002$$

$$\eta_b := 0.0012$$

$$\kappa_b := 0.0001$$

Constante élastique du spiral

$$C := \omega_0^2 \cdot J_b$$

$$C = 1.357 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$$

Assortiment

Distance des centres balancier - ancre	$b := 5.35 \cdot mm$
Distance des centres ancre - roue d'échappement	$a := 4.15 \cdot mm$
Diamètre de la cheville	$d_{cheville} := 0.60 \cdot mm$
Distance axe de balancier - centre de courbure de la cheville	$\rho_3 := 1.2757 \cdot mm$

Ancre $J_a := \frac{J_b}{100}$ $J_a = 5.5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$ (estimation !)

Angle de repos $\varepsilon := 2.5 \cdot \text{deg}$

Angles d'impulsion partagée

entrée	palette	$\Delta\psi_{ep} := 6 \cdot \text{deg}$		
	roue	$\Delta\psi_{ed} := 3 \cdot \text{deg}$	$\Delta\psi_{ie} := \Delta\psi_{ep} + \Delta\psi_{ed}$	$\Delta\psi_{ie} = 9 \text{ deg}$
sortie	palette	$\Delta\psi_{sp} := 7.5 \cdot \text{deg}$		
	roue	$\Delta\psi_{sd} := 1.5 \cdot \text{deg}$	$\Delta\psi_{is} := \Delta\psi_{sp} + \Delta\psi_{sd}$	$\Delta\psi_{is} = 9 \text{ deg}$

Angles de tirage

entrée	$\beta_{te} := 15 \cdot \text{deg}$	$\beta_e := \beta_{te} - \varepsilon$
sortie	$\beta_{ts} := 13 \cdot \text{deg}$	$\beta_s := \beta_{ts} + \varepsilon$

Chemin perdu $\Delta\psi_{cp} := 0.5 \cdot \text{deg}$

Angle de levée de l'ancre $\lambda_a := \varepsilon + \Delta\psi_{ie} + \Delta\psi_{cp}$ $\lambda_a = 12 \text{ deg}$ $\text{éch} := \frac{91.7}{a}$

Distance axe de l'ancre - centre de courbure de la cheville en position de repos

$$\rho_2 := \sin\left(\frac{\lambda_b}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda_a}{2}\right)^{-1} \cdot \rho_3 \quad \rho_2 = 4.174 \text{ mm} \quad \rho_2 \cdot \cos\left(\frac{\lambda_a}{2}\right) + \rho_3 \cdot \cos\left(\frac{\lambda_b}{2}\right) = 5.35 \text{ mm}$$

Roue d'échappement $z_e := 15$ $\alpha_0 := 30 \cdot \text{deg}$ $R_d := a \cdot \cos(\alpha_0)$ $R_d = 3.594 \text{ mm}$

Angles d'impulsion partagée palette $\Delta\alpha_p := 6.5 \cdot \text{deg}$ dent $\Delta\alpha_d := 4 \cdot \text{deg}$

Chute $\Delta\alpha_{ch} := 1.5 \cdot \text{deg}$

$$\gamma' := \arctan\left(\frac{R_d \cdot \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}{a - R_d \cdot \cos(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}\right) \quad \gamma' = 59.207 \text{ deg} \quad R_B := \frac{R_d \cdot \sin(\alpha_0 - \Delta\alpha_p)}{\sin(\gamma')} \quad R_B = 1.668 \text{ mm}$$

$$\alpha' := \arctan\left(\frac{R_B \cdot \sin(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}{a - R_B \cdot \cos(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}\right) \quad \alpha' = 23.637 \text{ deg} \quad R_{re_ext} := \frac{R_B \cdot \sin(\gamma' + \Delta\psi_{ed})}{\sin(\alpha')}$$

$$R_{re_ext} = 3.681 \text{ mm} \quad R_{fond_dent} := 0.76 \cdot R_d \quad R_{fond_dent} = 2.731 \text{ mm} \quad R_{re_m} := \frac{R_{re_ext} + R_{fond_dent}}{2}$$

$$R_{re_m} = 3.206 \text{ mm} \quad R_{re_int} := 0.7 \cdot R_d \quad R_{re_int} = 2.516 \text{ mm} \quad \text{épaisseur}_{re} := 0.2 \cdot \text{mm}$$

$$\rho_a := 7.85 \cdot 10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad M_{re} := \pi \cdot \rho_a \cdot (R_{re_m}^2 - R_{re_int}^2) \cdot \text{épaisseur}_{re} \quad J_{re} := \frac{1}{2} \cdot M_{re} \cdot (R_{re_m}^2 + R_{re_int}^2)$$

$$M_{re} = 19.484 \text{ mg} \quad J_{re} = 1.618 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2 \quad (\text{approx})$$

Angle parcouru par la roue $\Delta\alpha_p + \Delta\alpha_d + \Delta\alpha_{ch} = 12 \text{ deg}$ vérification $\frac{360 \cdot \text{deg}}{2 \cdot z_e} = 12 \text{ deg}$

Moment d'inertie sur l'axe de la roue d'échappement:

$$J_r := 1.1 \cdot J_{re} \quad J_r = 1.78 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$$