Echappement à ancre suisse à repos équidistants

Impulsion d'entrée - Défaut d'isochronisme

Calibre 11 1/2''' - seconde au centre - automatique - balancier à vis

Référence :E:\Résonateur (TA)\Echappement\EASRE - D_entrée - transmission.mcd(R)

Référence :E:\Résonateur (TA)\Echappement\EASRE - I_entrée - transmission roue - ancre.mcd(R)

Référence :E:\Résonateur (TA)\Echappement\EASRE - I_entrée - transmission ancre - balancier.mcd(R)

$T_0 = 0.4\ s$ $\quad f = 2.5\ s^{-1}$ $\quad \omega_0 := 2\cdot\pi\cdot f$ $\quad J_b = 20\,mg\cdot cm^2$ $\quad \theta_0 = 270\,deg$ $\quad \psi := 0$ $\quad ms := 10^{-3}\cdot s$

Couple à la roue d'échappement

$C_B = 10.019\,N\cdot mm$ $\quad \rho_0 = 4.38\times 10^3$ $\quad C_r := \dfrac{C_B}{\rho_0}$ $\quad C_r = 2.287\times 10^{-3}\,N\cdot mm$ $\quad \varepsilon_c := 0.65$

Positions du balancier lors des fonctions d'impulsion

Au début de l'impulsion quasi-statique $\quad x := -10\cdot deg$ $\quad \theta_{fde} := \theta_\psi(\varepsilon, x)$ $\quad \theta_{fde} = -13.479\,deg$

En fin d'impulsion sur le plan d'impulsion de la palette $\quad x := 10\cdot deg$ $\quad \theta_{fip} := \theta_\psi(\varepsilon + \Delta\psi_{ep}, x)$ $\quad \theta_{fip} = 9.543\,deg$

En fin d'impulsion $\quad x := \theta_{fip}$ $\quad \theta_{fie} := \theta_\psi(\varepsilon + \Delta\psi_{ie}, x)$ $\quad \theta_{fie} = 21.788\,deg$

Défaut d'isochronisme provoqué par l'impulsion d'entrée

Perturbation de marche due aux percussions sur le plan d'impulsion de la palette d'entrée

$n_c := 5$ $\quad j := 0 .. n_c - 1$ $\quad t_{ci} := (0.29834\ \ 0.2992\ \ 0.29976\ \ 0.30014\ \ 0.30041)\cdot s$ $\quad t_{ci} := t_{ci}^{T}$

$\tau_{ci_j} := \left(t_{ci_j} - t_{ci_0}\right)$ $\quad \tau_{ci}^{T} = (0\ \ 0.86\ \ 1.42\ \ 1.8\ \ 2.07)\,ms$

$\theta_{ci} := (-7.922\ \ -4.293\ \ -1.917\ \ -0.326\ \ 0.847)\cdot deg$ $\quad \theta_{ci} := \theta_{ci}^{T}$

$\omega b_{ci} := (73.448\ \ 73.735\ \ 73.911\ \ 74.02\ \ 74.092)\cdot s^{-1}$ $\quad \omega b_{ci} := \omega b_{ci}^{T}$

$\omega b'_{ci} := (73.718\ \ 73.907\ \ 74.021\ \ 74.094\ \ 74.149)\cdot s^{-1}$ $\quad \omega b'_{ci} := \omega b'^{T}_{ci}$

$\Delta E_{ci_j} := \dfrac{1}{2}\cdot J_b\cdot\left[\left(\omega b'_{ci_j}\right)^2 - \left(\omega b_{ci_j}\right)^2\right]$ $\quad \Delta E_{ci}^{T} = (39.735\ \ 25.394\ \ 16.273\ \ 10.96\ \ 8.45)\,10^{-9}\cdot joule$

$$\Delta T_{ci}(n_c) := \sum_{j=0}^{n_c-1}\left[\frac{\theta_{ci_j}}{2\cdot\omega_0^3\cdot\theta_0^2\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \left(\theta_{ci_j}\right)^2}}\cdot\left[\left(\omega b'_{ci_j}\right)^2 - \left(\omega b_{ci_j}\right)^2\right]\right] \quad \mu_{ci}(n_c) := -86400\cdot\frac{\Delta T_{ci}(n_c)}{T_0}$$

$\Delta T_{ci}(n_c) = -9.716\times 10^{-6}\ s$ $\quad \mu_{ci}(3) = 2.115$ $\quad \mu_{ci}(n_c) = 2.099$

Perturbation de marche due au glissement à la fin de l'impulsion d'entrée

Rapports de transmission $\quad \psi_\theta(\theta) := \arctan\left(\dfrac{\rho_3\cdot\sin(\theta)}{b - \rho_3\cdot\cos(\theta)}\right) - \beta_0$

$\Lambda_{iep}(\theta) := \kappa'_{ie}\left(\psi_\theta(\theta)\right)\cdot KI'_{iep}\left(\psi_\theta(\theta)\right)\cdot\left(\theta_{fde} \le \theta < \theta_{fip}\right)$

$\Lambda_{ied}(\theta) := \kappa'_{ie}\left(\psi_\theta(\theta)\right)\cdot KI'_{ied}\left(\psi_\theta(\theta)\right)\cdot\left(\theta_{fip} \le \theta \le \theta_{fie}\right)$ $\quad \Lambda_{ie}(\theta) := \Lambda_{iep}(\theta) + \Lambda_{ied}(\theta)$

Début et fin du glissement $\theta_{gie} := max(\theta_{ci})$ $\theta_{gie} = 0.847\,deg$ $\theta_{fie} = 21.788\,deg$

$t_{gie} := max(t_{ci})$ $t_{gie} = 0.30041\ s$ $t_{fie} := 0.30531 \cdot s$

$\varphi_{gie} := \omega_0 \cdot t_{gie}$ $\varphi_{gie} = 270.369\,deg$ $\varphi_{fie} := \omega_0 \cdot t_{fie}$ $\varphi_{fie} = 274.779\,deg$

$$\Delta T_{gi} := \frac{C_r}{J_b \cdot \omega_0^{\ 3} \cdot \theta_0} \cdot \int_{\varphi_{gie}}^{\varphi_{fie}} \Lambda_{ie}(\theta_0 \cdot cos(\varphi)) \cdot cos(\varphi)\, d\varphi \qquad \mu_{gi} := -86400 \cdot \frac{\Delta T_{gi}}{T_0} \qquad \mu_{gi} = -8.584$$

Perturbation de marche totale $\mu_{t\_ie} := \mu_{ci}(n_c) + \mu_{gi}$ $\boxed{\mu_{t\_ie} = -6.486}$

Calculs approximatifs du défaut d'isochronisme

Rapports moyens de transmission $\psi_{fip} := \varepsilon + \Delta\psi_{ep}$ $\psi_{fie} := \varepsilon + \Delta\psi_{ie}$

$K_{rap} := 0.5 \cdot (K_{iep}(\varepsilon) + K_{iep}(\psi_{fip}))$ $K_{rap} = 1.082$ $K'_{rap} := 0.5 \cdot (K'_{iep}(\varepsilon) + K'_{iep}(\psi_{fip}))$ $K'_{rap} = 0.769$

$K_{rad} := 0.5 \cdot (K_{ied}(\psi_{fip}) + K_{ied}(\psi_{fie}))$ $K_{rad} = 1.305$ $K'_{rad} := 0.5 \cdot (K'_{ied}(\psi_{fip}) + K'_{ied}(\psi_{fie}))$ $K'_{rad} = 0.86$

$$\kappa_{abp} := \frac{1}{\Delta\psi_{ep}} \cdot \int_{\varepsilon}^{\psi_{fip}} \kappa_{ie}(x)\, dx \qquad \kappa_{abp} = 0.261 \qquad \kappa'_{abp} := \frac{1}{\Delta\psi_{ep}} \cdot \int_{\varepsilon}^{\psi_{fip}} \kappa'_{ie}(x)\, dx \qquad \kappa'_{abp} = 0.246$$

$$\kappa_{abd} := \frac{1}{\Delta\psi_{ed}} \cdot \int_{\psi_{fip}}^{\psi_{fie}} \kappa_{ie}(x)\, dx \qquad \kappa_{abd} = 0.245 \qquad \kappa'_{abd} := \frac{1}{\Delta\psi_{ed}} \cdot \int_{\psi_{fip}}^{\psi_{fie}} \kappa'_{ie}(x)\, dx \qquad \kappa'_{abd} = 0.243$$

Calcul approximatif de la perturbation de marche due aux chocs

Nombre de chocs considéré $\boxed{nc := 50}$

Début et fin de l'impulsion palette $\theta_1 := \theta_{fde}$ $\theta_1 = -13.479\,deg$ $\theta_2 := \theta_{fip}$ $\theta_2 = 9.543\,deg$

Vitesses moyennes approximatives du balancier et de l'ancre pendant l'impulsion palette

$$\theta_m := \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \qquad \varphi(\theta_0) := \pi + arccos\left(\frac{-\theta_m}{\theta_0}\right) \qquad \omega_b(\theta_0) := -\omega_0 \cdot \theta_0 \cdot sin(\varphi(\theta_0)) \qquad \omega_b(\theta_0) = 74.02\ s^{-1}$$

$\omega_a(\theta_0) := \kappa_{abp} \cdot \omega_b(\theta_0)$ $\omega_a(\theta_0) = 19.295\ s^{-1}$

Vitesse de la roue à la fin du dégagement $\omega r_{fde}(\theta_0) := K_{de}(\varepsilon) \cdot \omega_a(\theta_0)$ $\omega r_{fde}(\theta_0) = -2.985\ s^{-1}$

Durée entre la fin du dégagement et le premier choc sur le plan d'impulsion de la palette

$J_R := J_{rouage}$ $C_r = 2.287 \times 10^{-3}\ N \cdot mm$ $acc_r := C_r \cdot J_R^{-1}$ $acc_r = 3.801 \times 10^4\ s^{-2}$

$\Delta t_0(\theta_0) := 2 \cdot C_r^{-1} \cdot J_R \cdot (K_{rap} \cdot \omega_a(\theta_0) - \omega r_{fde}(\theta_0))$ $\Delta t_0(\theta_0) = 1.256\,ms$ $\tau_{ci_0} := \Delta t_0(\theta_0)$

Vitesses de la roue juste avant le premier choc

$\omega r_{cdp}(\theta_0) := 2 \cdot K_{rap} \cdot \omega_a(\theta_0) - \omega r_{fde}(\theta_0)$ $\omega r_{cdp}(\theta_0) = 44.736\ s^{-1}$ $\omega_{r_0} := \omega r_{cdp}(\theta_0)$

Vitesses de la roue juste avant et juste après les chocs successifs

$$\Omega r(\theta_0, n) := \begin{cases} \varepsilon_c \cdot (\Omega r(\theta_0, n-1) - K_{rap} \cdot \omega_a(\theta_0) \cdot s) + K_{rap} \cdot \omega_a(\theta_0) \cdot s & \text{if } n > 0 \\ \omega r_{cdp}(\theta_0) \cdot s & \text{otherwise} \end{cases} \qquad \omega r(\theta_0, j) := \Omega r(\theta_0, j) \cdot s^{-1}$$

$\omega_{r_j} := \omega r(\theta_0, j)$

$\omega r'(\theta_0, j) := \omega r(\theta_0, j) - (1 + \varepsilon_c) \cdot (\omega r(\theta_0, j) - K_{rap} \cdot \omega_a(\theta_0))$ $\omega'_{r_j} := \omega r'(\theta_0, j)$

$$\omega_r^T = (44.736 \quad 36.385 \quad 30.957 \quad 27.428 \quad 25.135)\ s^{-1}$$

$$\omega'^T_r = (5.366 \quad 10.795 \quad 14.323 \quad 16.616 \quad 18.107)\ s^{-1}$$

Intervalles de temps entre les chocs

$$\Delta\tau_{ci_j} := -2\cdot C_r^{-1}\cdot J_R\cdot\left(K_{rap}\cdot\omega_a(\theta_0) - \omega_{r_j}\right) \qquad \Delta\tau_{ci}^T = (1.256 \quad 0.816 \quad 0.53 \quad 0.345 \quad 0.224)\,ms$$

Instants des chocs à partir de la fin du dégagement

$$\Delta t_{ci}(\theta_0, j) := \frac{-2\cdot J_R}{C_r}\cdot\left(K_{rap}\cdot\omega_a(\theta_0) - \omega r_{cdp}(\theta_0)\right)\cdot\frac{\varepsilon_c\cdot\left(1-\varepsilon_c^{\,j}\right)}{1-\varepsilon_c} + \Delta t_0(\theta_0) \qquad \Delta t_{ci}(\theta_0, nc) = 3.587\,ms$$

$$\tau_{ci_j} := \Delta t_{ci}(\theta_0, j) \qquad \tau_{ci}^T = (1.256 \quad 2.072 \quad 2.602 \quad 2.947 \quad 3.171)\,ms$$

Positions de la roue, de l'ancre et du balancier au moment des chocs

$$\alpha_{ci}(\theta_0, j) := -\alpha_0 + K_{rap}\cdot\omega_a(\theta_0)\cdot\Delta t_{ci}(\theta_0, j) \qquad \alpha_{fde} := -\alpha_0$$

$$\alpha ci_j := \alpha_{ci}(\theta_0, j) \qquad \alpha ci^T = (-28.498 \quad -27.522 \quad -26.888 \quad -26.475 \quad -26.207)\,deg$$

$$\Delta\alpha_{ci}(\theta_0, j) := \alpha_{ci}(\theta_0, j) + \alpha_0 \qquad \Delta\alpha_{ci}(\theta_0, 0) = 1.502\,deg \qquad \Delta\alpha_{ci}(\theta_0, nc) = 4.291\,deg$$

$$\psi_{ci}(\theta_0, j) := \varepsilon + \omega_a(\theta_0)\cdot\Delta t_{ci}(\theta_0, j) \qquad \psi_{fde} := \varepsilon \qquad \psi_{ci}(\theta_0, 0) - \varepsilon = 1.388\,deg$$

$$\psi ci_j := \psi_{ci}(\theta_0, j) \qquad \psi ci^T = (3.888 \quad 4.79 \quad 5.377 \quad 5.758 \quad 6.006)\,deg$$

$$\theta_{ci}(\theta_0, j) := \theta_{ie}\left(\psi_{ci}(\theta_0, j)\right) \qquad \theta_{fde} = -13.479\,deg \qquad \theta_{ci}(\theta_0, 0) - \theta_{fde} = 5.438\,deg$$

$$\theta ci_j := \theta_{ci}(\theta_0, j) \qquad \theta ci^T = (-8.041 \quad -4.586 \quad -2.359 \quad -0.916 \quad 0.022)\,deg$$

Fin théorique des percussions

$$\Delta t_{asymp}(\theta_0) := \frac{-2\cdot J_R}{C_r}\cdot\left(K_{rap}\cdot\omega_a(\theta_0) - \omega r_{cdp}(\theta_0)\right)\cdot\frac{\varepsilon_c}{1-\varepsilon_c} + \Delta t_0(\theta_0) \qquad \Delta t_{asymp}(\theta_0) = 3.587\,ms$$

$$\Delta\alpha_{asymp}(\theta_0) := K_{rap}\cdot\omega_a(\theta_0)\cdot\Delta t_{asymp}(\theta_0) \qquad \Delta\alpha_{asymp}(\theta_0) = 4.291\,deg \qquad \Delta\alpha_p = 6.5\,deg$$

$$\Delta\psi_{asymp}(\theta_0) := \omega_a(\theta_0)\cdot\Delta t_{asymp}(\theta_0) \qquad \Delta\psi_{asymp}(\theta_0) = 3.966\,deg \qquad \Delta\psi_{ep} = 6\,deg$$

Energie transmise au balancier à chaque percussion

$$\Delta E_{ci}(\theta_0, j) := -0.5\cdot J_R\cdot\left(\omega r'(\theta_0, j)^2 - \omega r(\theta_0, j)^2\right) \qquad \Delta Ec_j := \Delta E_{ci}(\theta_0, j)$$

$$\Delta Ec^T = (59.357 \quad 36.331 \quad 22.664 \quad 14.33 \quad 9.145)\,10^{-9}\cdot joule$$

Perturbation de marche

$$\Delta T_{ci}(\theta_0, n_c) := \frac{1}{J_b\cdot\omega_0^{\,3}\cdot\theta_0^{\,3}}\cdot\sum_{j=0}^{n_c-1}\left[\theta_{ci}(\theta_0, j)\cdot\Delta E_{ci}(\theta_0, j)\cdot\left(\Delta\alpha_{ci}(\theta_0, nc) \le \Delta\alpha_p\right)\right]$$

$$\Delta T_{ci}(\theta_0, n_c) = -1.528\times 10^{-5}\,s \qquad \mu_{acp}(\theta_0, n_c) := -86400\cdot\frac{\Delta T_{ci}(\theta_0, n_c)}{T_0}$$

$$\mu_{aci}(\theta_0) := \mu_{acp}(\theta_0, nc) \qquad \mu_{acp}(\theta_0, n_c) = 3.301 \qquad \mu_{aci}(\theta_0) = 3.218$$

Calcul approximatif de la perturbation de marche due au glissement entre la fin des chocs et la fin de l'impulsion

Début du glissement $\Delta\alpha_{ci}(\theta_0, nc) = 4.291\,deg$ $\quad \psi_{ci}(\theta_0, nc) = 6.466\,deg$ $\quad \theta_{ci}(\theta_0, nc) = 1.763\,deg$

Fin de l'impulsion palette $\Delta\alpha_p = 6.5\,deg$ $\quad \psi_2 := \varepsilon + \Delta\psi_{ep}$ $\quad \theta_2 := \theta_{fip}$ $\quad \theta_2 = 9.543\,deg$

Fin de l'impulsion $\Delta\alpha_p + \Delta\alpha_d = 10.5\,deg$ $\quad \psi_3 := \varepsilon + \Delta\psi_{ie}$ $\quad \theta_3 := \theta_{fie}$ $\quad \theta_3 = 21.788\,deg$

$$\varphi_3(\theta_0) := \pi + \arccos\left(-\theta_3\cdot\theta_0^{-1}\right) \qquad \varphi_3(\theta_0) = 274.629\,deg$$

$$\varphi_2(\theta_0) := \pi + \arccos\left(-\theta_2\cdot\theta_0^{-1}\right) \qquad \varphi_2(\theta_0) = 272.026\,deg$$

$$\varphi_1(\theta_0) := \begin{cases} \pi + \arccos\left(-\theta_{ci}(\theta_0, nc)\cdot\theta_0^{-1}\right) & \text{if } \Delta\alpha_{ci}(\theta_0, nc) \le \Delta\alpha_p \\ \varphi_2(\theta_0) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\left(\Delta\alpha_{ci}(\theta_0, nc) \le \Delta\alpha_p\right) = 1 \qquad \varphi_1(\theta_0) = 270.374\,deg$$

Linéarisation des rapports de transmission $\quad \theta_1 = -13.479\,deg$ $\quad \psi_1 := \varepsilon$ $\quad \psi_1 = 2.5\,deg$

Fin de l'impulsion palette $\quad \psi'_{ip} := \dfrac{\psi_2 - \psi_1}{\theta_2 - \theta_1}$ $\quad \psi'_{ip} = 0.261$

$$K'_{ip} := K'_{iep}(\psi_1) \qquad X'_{ip} := \frac{K'_{iep}(\psi_2) - K'_{iep}(\psi_1)}{\psi_2 - \psi_1} \qquad \kappa'_{ip} := \kappa'_{ie}(\psi_1) \qquad \chi'_{ip} := \frac{\kappa'_{ie}(\psi_2) - \kappa'_{ie}(\psi_1)}{\psi_2 - \psi_1}$$

$$K'_{aip}(\theta) := K'_{ip} + X'_{ip}\cdot\left[\psi'_{ip}\cdot(\theta - \theta_1)\right] \qquad \kappa'_{aip}(\theta) := \kappa'_{ip} + \chi'_{ip}\cdot\left[\psi'_{ip}\cdot(\theta - \theta_1)\right]$$

$$\Lambda_{aip}(\theta) := K'_{aip}(\theta)\cdot\kappa'_{aip}(\theta)$$

$$\Delta T_{aip}(\theta_0) := \frac{C_r}{J_b\cdot\omega_0^3\cdot\theta_0}\cdot\int_{\varphi_1(\theta_0)}^{\varphi_2(\theta_0)} \Lambda_{aip}(\theta_0\cdot\cos(\varphi))\cdot\cos(\varphi)\,d\varphi \qquad \mu_{aip}(\theta_0) := -86400\cdot\frac{\Delta T_{aip}(\theta_0)}{T_0}$$

$$\mu_{aip}(\theta_0) = -1.392$$

Plan d'impulsion de la dent $\quad \psi'_{id} := \dfrac{\psi_3 - \psi_2}{\theta_3 - \theta_2}$ $\quad \psi'_{id} = 0.245$

$$K'_{id} := K'_{ied}(\psi_2) \qquad X'_{id} := \frac{K'_{ied}(\psi_3) - K'_{ied}(\psi_2)}{\psi_3 - \psi_2} \qquad \kappa'_{id} := \kappa'_{ie}(\psi_2) \qquad \chi'_{id} := \frac{\kappa'_{ie}(\psi_3) - \kappa'_{ie}(\psi_2)}{\psi_3 - \psi_2}$$

$$K'_{aid}(\theta) := K'_{id} + X'_{id}\cdot\left[\psi'_{id}\cdot(\theta - \theta_2)\right] \qquad \kappa'_{aid}(\theta) := \kappa'_{id} + \chi'_{id}\cdot\left[\psi'_{id}\cdot(\theta - \theta_2)\right]$$

$$\Lambda_{aid}(\theta) := K'_{aid}(\theta)\cdot\kappa'_{aid}(\theta)$$

$$\Delta T_{aid}(\theta_0) := \frac{C_r}{J_b\cdot\omega_0^3\cdot\theta_0}\cdot\int_{\varphi_2(\theta_0)}^{\varphi_3(\theta_0)} \Lambda_{aid}(\theta_0\cdot\cos(\varphi))\cdot\cos(\varphi)\,d\varphi \qquad \mu_{aid}(\theta_0) := -86400\cdot\frac{\Delta T_{aid}(\theta_0)}{T_0}$$

$$\mu_{aid}(\theta_0) = -7.197$$

Défaut d'isochronisme à l'impulsion (percussions puis glissement)

Transmission par le plan d'impulsion de la palette $\quad \mu_{aci}(\theta_0) + \mu_{aip}(\theta_0) = 1.826$

Impulsion complète $\quad \mu_{aie}(\theta_0) := \mu_{aci}(\theta_0) + \mu_{aip}(\theta_0) + \mu_{aid}(\theta_0)$ $\quad \boxed{\mu_{aie}(\theta_0) = -5.371}$

Défaut d'isochronisme à l'impulsion en supposant une transmission sans percussions

Glissement sur le plan d'impulsion de la palette

$\lambda_{ip2} := X'_{ip}\cdot\psi'^{\,2}_{ip}\cdot\chi'_{ip}$ $\quad\lambda_{ip1} := \left[\left(\kappa'_{ip} - \chi'_{ip}\cdot\psi'_{ip}\cdot\theta_1\right)\cdot X'_{ip} + \chi'_{ip}\cdot\left(K'_{ip} - X'_{ip}\cdot\psi'_{ip}\cdot\theta_1\right)\right]\cdot\psi'_{ip}$

$\lambda_{ip0} := \left(\kappa'_{ip} - \chi'_{ip}\cdot\psi'_{ip}\cdot\theta_1\right)\cdot\left(K'_{ip} - X'_{ip}\cdot\psi'_{ip}\cdot\theta_1\right)$ $\quad\lambda_{ip0} = 0.181$ $\quad\lambda_{ip1} = -0.088$ $\quad\lambda_{ip2} = -0.035$

$\varphi_{ip1}(\theta_0) := \pi + \arccos\left(\dfrac{-\theta_1}{\theta_0}\right)$ $\quad\varphi_{ip2}(\theta_0) := \pi + \arccos\left(\dfrac{-\theta_2}{\theta_0}\right)$

$$I_{ip0}(\theta_0) := \frac{-\lambda_{ip0}}{\theta_0}\cdot\left(\sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2} - \sqrt{\theta_0^2 - \theta_1^2}\right)$$

$$I_{ip1}(\theta_0) := \frac{-\lambda_{ip1}}{2\cdot\theta_0}\cdot\left[\theta_2\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2} - \theta_0^2\cdot\left(\varphi_{ip2}(\theta_0) - \varphi_{ip1}(\theta_0)\right) - \theta_1\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_1^2}\right]$$

$$I_{ip2}(\theta_0) := \left(\frac{-\lambda_{ip2}}{3\cdot\theta_0}\right)\cdot\left[\theta_2^2\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2} + 2\cdot\theta_0^2\cdot\left[\sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2} - \left(\sqrt{\theta_0^2 - \theta_1^2}\right)\right] - \theta_1^2\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_1^2}\right]$$

$\Delta T_{gip}(\theta_0) := \dfrac{C_r}{J_b\cdot\omega_0^3\cdot\theta_0}\cdot\left(I_{ip0}(\theta_0) + I_{ip1}(\theta_0) + I_{ip2}(\theta_0)\right)$ $\quad\mu_{gip}(\theta_0) := -86400\cdot\dfrac{\Delta T_{gip}(\theta_0)}{T_0}$ $\quad\mu_{gip}(\theta_0) = 1.827$

Glissement sur le plan d'impulsion de la dent

$\lambda_{id2} := X'_{id}\cdot\psi'^{\,2}_{id}\cdot\chi'_{id}$ $\quad\lambda_{id1} := \left[\left(\kappa'_{id} - \chi'_{id}\cdot\psi'_{id}\cdot\theta_2\right)\cdot X'_{id} + \chi'_{id}\cdot\left(K'_{id} - X'_{id}\cdot\psi'_{id}\cdot\theta_2\right)\right]\cdot\psi'_{id}$

$\lambda_{id0} := \left(\kappa'_{id} - \chi'_{id}\cdot\psi'_{id}\cdot\theta_2\right)\cdot\left(K'_{id} - X'_{id}\cdot\psi'_{id}\cdot\theta_2\right)$ $\quad\lambda_{id0} = 0.286$ $\quad\lambda_{id1} = -0.318$ $\quad\lambda_{id2} = 0.086$

$\varphi_{id2}(\theta_0) := \pi + \arccos\left(\dfrac{-\theta_2}{\theta_0}\right)$ $\quad\varphi_{id3}(\theta_0) := \pi + \arccos\left(\dfrac{-\theta_3}{\theta_0}\right)$

$$I_{id0}(\theta_0) := \frac{-\lambda_{id0}}{\theta_0}\cdot\left(\sqrt{\theta_0^2 - \theta_3^2} - \sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2}\right)$$

$$I_{id1}(\theta_0) := \frac{-\lambda_{id1}}{2\cdot\theta_0}\cdot\left[\theta_3\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_3^2} - \theta_0^2\cdot\left(\varphi_{id3}(\theta_0) - \varphi_{id2}(\theta_0)\right) - \theta_2\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2}\right]$$

$$I_{id2}(\theta_0) := \left(\frac{-\lambda_{id2}}{3\cdot\theta_0}\right)\cdot\left[\theta_3^2\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_3^2} + 2\cdot\theta_0^2\cdot\left[\sqrt{\theta_0^2 - \theta_3^2} - \left(\sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2}\right)\right] - \theta_2^2\cdot\sqrt{\theta_0^2 - \theta_2^2}\right]$$

$\Delta T_{gid}(\theta_0) := \dfrac{C_r}{J_b\cdot\omega_0^3\cdot\theta_0}\cdot\left(I_{id0}(\theta_0) + I_{id1}(\theta_0) + I_{id2}(\theta_0)\right)$ $\quad\mu_{gid}(\theta_0) := -86400\cdot\dfrac{\Delta T_{gid}(\theta_0)}{T_0}$ $\quad\mu_{gid}(\theta_0) = -7.197$

Défaut d'isochronisme par glissement sur les plans d'impulsion de palette et de dent

$\mu_{gie}(\theta_0) := \mu_{gip}(\theta_0) + \mu_{gid}(\theta_0)$ $\quad\boxed{\mu_{gie}(\theta_0) = -5.37}$

Défaut d'isochronisme par la théorie élémentaire (sans frottements)

Angle d'impulsion du balancier: $\theta_{fde} = -13.479\,deg$ $\quad \theta_{fie} = 21.788\,deg$ $\quad \theta_{fie} - \theta_{fde} = 35.267\,deg$

Angle d'impulsion de la roue $\quad \Delta\alpha_p + \Delta\alpha_d = 10.5\,deg$ $\quad \Lambda_{i\_el} := \dfrac{\Delta\alpha_p + \Delta\alpha_d}{\theta_{fie} - \theta_{fde}}$ $\quad \Lambda_{i\_el} = 0.298$

$$\Delta T_{i\_el}(\theta_0, C_r) := \frac{C_r}{J_b \cdot \omega_0^{\,3} \cdot \theta_0^{\,2}} \cdot \Lambda_{i\_el} \cdot \left(\sqrt{\theta_0^{\,2} - \theta_{fde}^{\,2}} - \sqrt{\theta_0^{\,2} - \theta_{fie}^{\,2}}\right) \qquad \Delta T_{i\_el}(\theta_0, C_r) = 3.756 \times 10^{-5}\,s$$

$$\mu_{i\_el}(\theta_0) := -86400 \cdot \frac{\Delta T_{i\_el}(\theta_0, C_r)}{T_0} \qquad \boxed{\mu_{i\_el}(270 \cdot deg) = -8.112}$$

Comparaisons

Pour $\quad \theta_0 = 270\,deg \quad \mu_{ci}(n_c) = 2.099 \quad \mu_{t\_ie} = -6.486$

$\mu_{aci}(270 \cdot deg) = 3.218 \qquad \mu_{aci}(180 \cdot deg) = 10.356 \qquad \mu_{aci}(90 \cdot deg) = 27.475$

$\mu_{aie}(270 \cdot deg) = -5.371 \qquad \mu_{aie}(180 \cdot deg) = -16.306 \qquad \mu_{aie}(90 \cdot deg) = -142.326$

$\mu_{gie}(270 \cdot deg) = -5.37 \qquad \mu_{gie}(180 \cdot deg) = -18.174 \qquad \mu_{gie}(90 \cdot deg) = -147.65$

$\mu_{i\_el}(270 \cdot deg) = -8.112 \qquad \mu_{i\_el}(180 \cdot deg) = -27.457 \qquad \mu_{i\_el}(90 \cdot deg) = -223.116$

Nombre de chocs dent - palette pendant l'impulsion

$j := 0 .. nc \qquad l := 0 .. 10 \qquad \boldsymbol{\Theta_0}_l := 250 \cdot deg + l \cdot 10 \cdot deg \qquad V_{j,l} := \theta_{ci}(\boldsymbol{\Theta_0}_l, j)$

$$N_c(v, \theta_{fde}) := \left| \begin{array}{l} j \leftarrow 0 \\ \text{while } \; v_j \le \theta_{fip} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{break } \; \text{if } \; j > nc - 1 \\ j \leftarrow j + 1 \end{array} \right. \\ j \end{array} \right. \qquad \boldsymbol{N}_l := N_c\left(V^{\langle l \rangle}, \theta_{fde}\right)$$

$$\boldsymbol{\Theta_0}^T = (250 \;\; 260 \;\; 270 \;\; 280 \;\; 290 \;\; 300 \;\; 310 \;\; 320 \;\; 330 \;\; 340 \;\; 350)\,deg$$

$$\boldsymbol{N}^T = (50 \;\; 50 \;\; 50 \;\; 50 \;\; 50 \;\; 50 \;\; 50 \;\; 50 \;\; 50 \;\; 7 \;\; 5)$$

Graphes

$n := 10 \qquad \Delta\theta := \dfrac{280 \cdot deg - 180 \cdot deg}{n} \qquad i := 0 .. n \qquad \theta 0_i := 180 \cdot deg + i \cdot \Delta\theta$