



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VÝPOČTOVÁ ZPRÁVA

CALCULATION REPORT

PŘÍLOHA DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMA THESIS APPENDIX

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Sedlář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hadraba

BRNO 2021

Výpočtová zpráva

1) Výpočet servomotorů

Osa X

gravitační zrychlení	$g_G := 9.81$	[m/s]
požadovaná axiální síla	$F_A := 1500$	[N]
hmotnost KŠ	$m_{KS1} := 0.71$	[kg]
hmotnost vozíků	$m_{voz1} := 4 \cdot 0.51 = 2.04$	[kg]
hmotnost matice KŠ	$m_{mat1} := 0.39$	[kg]
hmotnost nástroje	$m_{nast} := 0.3$	[kg]
hmotnost upínání	$m_{upin} := 1.5$	[kg]
hmotnost stolu	$m_{stul1} := 18.18$	[kg]
hmotnost jiných	$m_{j1} := 1.5$	[kg]
celková hmotnost	$m_1 := m_{nast} + m_{upin} + m_{stul1} + m_{mat1} + m_{voz1} + m_{j1} = 23.91$	[kg]
vzdálenost působící síly	$a_1 := 0.07$	[m]
vzdálenost těžiště	$b_1 := 0.015$	[m]
délka stolu	$L_1 := 0.3$	[m]
naklonení stolu	$\alpha := \frac{13}{36} \cdot \pi$	[rad]
součinitel tření vodicích ploch	$f_1 := 0.005$	[-]
součinitel tření KŠM	$f_2 := 0.003$	[-]
součinitel tření uložení KŠ	$f_3 := 0.003$	[-]
účinnost vedení	$\eta_v := 0.98$	[-]
účinnost KŠM	$\eta_s := 0.92$	[-]
účinnost ložiska	$\eta_L := 0.97$	[-]
celková účinnost	$\eta_c := \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L = 0.875$	[-]
stoupání KŠ	$s_k := 0.01$	[m]
převodový poměr	$i_p := 1$	[-]
střední průměr KŠ	$d_s := 0.0244$	[m]
průměr hřídele pro ložisko	$d_L := 0.017$	[m]

moment setrvačnosti motoru

$$J_{\text{mot}} := 0.000162 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

moment setrvačnosti spojky

$$J_{\text{spoj}} := 0.00001 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

moment setrvačnosti KŠ

$$J_s := \frac{1}{2} \cdot m_{\text{KŠ}} \cdot \left(\frac{d_s}{2} \right)^2 = 5.284 \times 10^{-5} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

Statické hledisko:

moment tíhové složky

$$M_G := \frac{m_1 \cdot g_G \cdot \sin(\alpha) \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot i_p} = 0.387 \quad [\text{Nm}]$$

moment třecích sil vedení

$$M_{GT} := \frac{m_1 \cdot g_G \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot i_p} = 9.02 \times 10^{-4} \quad [\text{Nm}]$$

moment třecích sil v ložisku

$$M_L := \frac{0.5 \cdot (F_A + m_1 \cdot g_G \cdot \cos(\alpha) \cdot f_1) \cdot d_L \cdot f_3}{i_p \cdot \eta_c} = 0.044 \quad [\text{Nm}]$$

předepnutí KŠM

$$F_p := 0.35 \cdot F_A = 525 \quad [\text{N}]$$

moment tření v KŠM

$$M_{\text{KSM}} := \frac{F_p \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0.5 \cdot (F_A + m_1 \cdot g_G \cdot \cos(\alpha) \cdot f_1) \cdot d_s \cdot f_2}{i_p \cdot \eta_c} = 0.21 \quad [\text{Nm}]$$

úhel sklonu vedení $< 0, \pi/2$

$$F_{TV} := \begin{cases} \frac{3 \cdot F_A \cdot a_1 \cdot f_1}{L_1} + m_1 \cdot g_G \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) & \text{if } m_1 \cdot g_G \leq \frac{6 \cdot F_A \cdot a_1}{L_1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

úhel sklonu vedení $\pi/2$

$$F_{TS} := \begin{cases} \frac{3 \cdot (m_1 \cdot g_G \cdot b_1 + F_A \cdot a_1) \cdot f_1}{L_1} & \text{if } m_1 \cdot g_G \leq \frac{6 \cdot F_A \cdot a_1}{L_1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

třecí síla od klopného momentu

$$M_F := \begin{cases} \frac{F_{TS} \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot \eta_c} & \text{if } \alpha = \frac{\pi}{2} \\ \frac{F_{TV} \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot \eta_c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

statický moment redukováný na hřídel motoru

$$M_{\text{zsrhm}} := M_G + M_{GT} + M_L + M_{\text{KSM}} = 0.641 \quad [\text{Nm}]$$

celkový statický moment

$$M_m := \frac{F_A \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot i_p} + M_{\text{zsrhm}} = 3.371 \quad [\text{Nm}]$$

Kinematické hledisko

dobu rozběhu motoru	$t_r := 0.027$	[s]
rychlost rychloposuvu	$v_{rp} := 0.5$	[m/s]
lineární zrychlení rychloposuvu	$a_r := \frac{v_{rp}}{t_r} = 18.519$	[m/s ²]
úhlové zrychlení rychloposuvu	$\varepsilon_s := \frac{a_r \cdot 2 \cdot \pi}{s_k}$	
	$\varepsilon_m := \varepsilon_s \cdot i_p = 1.164 \times 10^4$	[rad/s ²]
dráha při rozběhu na rychloposuv	$s_{rozb} := \frac{1}{2} \cdot a_r \cdot t_r^2 = 6.75 \times 10^{-3}$	[m]

Dynamické Hledisko:

moment přesouvaných hmot:	$M_{Gd} := \begin{cases} \frac{3 \cdot m_1 \cdot g_G \cdot b_1 \cdot f_1 \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot \eta_c \cdot L_1} & \text{if } \alpha = \frac{\pi}{2} \\ \frac{m_1 \cdot g_G \cdot \sin(\alpha) \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot i_p} & \text{otherwise} \end{cases}$	
moment třecích sil vedení	$M_{GTd} := \frac{m_1 \cdot g_G \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha) \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c \cdot i_p} = 9.02 \times 10^{-4}$	[Nm]
moment tření KŠM	$M_{KSMd} := \frac{F_p \cdot s_k}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot \eta_c} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0.5 \cdot m_1 \cdot g_G \cdot \cos(\alpha) \cdot f_1 \cdot d_s \cdot f_2}{i_p \cdot \eta_c} = 0.147$	[Nm]
dynamický moment redukováný na hřídel motoru	$M_{zdrhm} := M_{Gd} + M_{GTd} + M_{KSMd} = 0.535$	[Nm]
moment setrvačnosti přesouvaných hmot	$J_m := m_1 \cdot \left(\frac{s_k}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 6.056 \times 10^{-5}$	[kg.m ²]
celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru	$J_{rhm} := J_{mot} + \frac{J_{spoj}}{i_p^2} + \frac{J_s}{i_p^2} + \frac{J_m}{i_p^2} = 2.854 \times 10^{-4}$	[kg.m ²]
celkový moment motoru:	$M_{md} := J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhm} = 3.855$	[Nm]

Doba rozběhu motoru 1:**Parametry motoru:**

jmenovitý výkon	$P_{jm} := 1200$	[W]
počáteční otáčky	$n_0 := 0$	[ot/s]
jmenovité otáčky	$n_{jm} := 50$	[ot/s]
jmenovitý moment	$M_{jm} := 3.7$	[Nm]
požadované otáčky	$n_p := 50$	[ot/s]

Oblast A:

$$t_A := \frac{2 \cdot \pi J_{rhm}}{M_{jm} \cdot \eta_c} \cdot \int_{n_0}^{n_{jm}} 1 \, dn = 0.028 \quad [s]$$

Oblast B:

$$t_B := \frac{J_{rhm}}{P_{jm} \cdot \eta_c} \cdot \int_{n_{jm}}^{n_p} n_m \, dn_m = 0 \quad [s]$$

Osa Z

požadovaná axiální síla	$F_{A2} := 1500$	[N]
hmotnost stolu	$m_{stul2} := 29.5$	[kg]
hmotnost KŠ	$m_{KS2} := 0.9$	[kg]
hmotnost matice KŠ	$m_{mat2} := 1.2$	[kg]
hmotnost motoru 1	$m_{mot1} := 8$	[kg]
hmotnost vozíků	$m_{voz2} := 4 \cdot 0.51$	[kg]
hmotnost ložiskového domku	$m_{dom1} := 1$	[kg]
hmotnost příruby motoru	$m_{pr1} := 1.5$	[kg]
hmotnost kolejnič	$m_{kol1} := 2 \cdot 1$	[kg]
hmotnost čela	$m_{celo} := 1$	[kg]
hmotnost stíracích lišt	$m_{ster} := 0.3$	[kg]
hmotnost ložiska	$m_{lozis} := 0.45$	[kg]
hmotnost spojky	$m_{spoj} := 0.12$	[kg]
hmotnost jiných	$m_{j2} := 2.5$	[kg]

	$m_{21} := m_1 + m_{\text{stul2}} + m_{\text{KS1}} + m_{\text{mat2}} + m_{\text{mot1}} + m_{\text{dom1}} + m_{j2}$	
	$m_{22} := m_{\text{pr1}} + m_{\text{kol1}} + m_{\text{celo}} + m_{\text{ster}} + m_{\text{voz2}} + m_{\text{lozis}} + m_{\text{spoj}}$	
celková hmotnost	$m_2 := m_{21} + m_{22} = 74.23$	[kg]
vzdálenost působící síly	$a_2 := 0.146$	[m]
vzdálenost těžiště	$b_2 := 0.05$	[m]
délka stolu	$L_2 := 0.235$	[m]
naklonení stolu	$\alpha_2 := 0$	[rad]
účinnost vedení	$\eta_{v2} := 0.98$	[-]
účinnost KŠM	$\eta_{s2} := 0.92$	[-]
účinnost ložiska	$\eta_{L2} := 0.97$	[-]
celková účinnost	$\eta_{c2} := \eta_{v2} \cdot \eta_{s2} \cdot \eta_{L2}$	
stoupání KŠ	$s_{k2} := 0.01$	[m]
převodový poměr	$i_{p2} := 1$	[-]
střední průměr KŠ	$d_{s2} := 0.0244$	[m]
průměr hřídele pro ložisko	$d_{L2} := 0.017$	[m]
moment setrvačnosti motoru	$J_{\text{mot2}} := 0.000162$	[kg.m ²]
moment setrvačnosti spojky	$J_{\text{spoj2}} := 0.00001$	[kg.m ²]
moment setrvačnosti KŠ	$J_{s2} := \frac{1}{2} \cdot m_{\text{KS2}} \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2$	
Statické hledisko:		
moment tíhové složky	$M_{G2} := \frac{m_2 \cdot g_G \cdot \sin(\alpha_2) \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{c2} \cdot i_{p2}}$	
moment třecích sil vedení	$M_{GT2} := \frac{m_2 \cdot g_G \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_2) \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{c2} \cdot i_{p2}}$	
moment třecích sil v ložisku	$M_{L2} := \frac{0.5 \cdot (F_{A2} + m_2 \cdot g_G \cdot \cos(\alpha_2) \cdot f_1) \cdot d_{L2} \cdot f_3}{i_{p2} \cdot \eta_{c2}}$	
předepnutí KŠM	$F_{p2} := 0.35 \cdot F_{A2}$	[N]

moment tření v KŠM

$$M_{KSM2} := \frac{F_{p2} \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot i_{p2} \cdot \eta_{c2}} \cdot (1 - \eta_{s2}^2) + \frac{0.5 \cdot (F_{A2} + m_2 \cdot g_G \cdot \cos(\alpha_2)) \cdot f_1 \cdot d_{s2} \cdot f_2}{i_{p2} \cdot \eta_{c2}}$$

úhel sklonu vedení $< 0, \pi/2$)

$$F_{TV2} := \begin{cases} \frac{3 \cdot F_{A2} \cdot a_2 \cdot f_1}{L_2} + m_2 \cdot g_G \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_2) & \text{if } m_2 \cdot g_G \leq \frac{6 \cdot F_{A2} \cdot a_2}{L_2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

úhel sklonu vedení $\pi/2$

$$F_{TS2} := \begin{cases} \frac{3 \cdot (m_2 \cdot g_G \cdot b_2 + F_{A2} \cdot a_2) \cdot f_1}{L_2} & \text{if } m_2 \cdot g_G \leq \frac{6 \cdot F_{A2} \cdot a_2}{L_2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

třecí síla od klopného momentu

$$M_{F2} := \begin{cases} \frac{F_{TS2} \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot i_{p2} \cdot \eta_{c2}} & \text{if } \alpha_2 = \frac{\pi}{2} \\ \frac{F_{TV2} \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot i_{p2} \cdot \eta_{c2}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

statický moment redukovaný na hřídel motoru

$$M_{zsrhm2} := M_{G2} + M_{GT2} + M_{L2} + M_{KSM2}$$

celkový statický moment

$$M_{m2} := \frac{F_{A2} \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{c2} \cdot i_{p2}} + M_{zsrhm2} = 2.99 \quad [\text{Nm}]$$

Kinematické hledisko

dobu rozběhu motoru

$$t_{r2} := 0.04 \quad [\text{s}]$$

rychlost rychloposuvu

$$v_{rp2} := 0.5 \quad [\text{m/s}]$$

lineární zrychlení rychloposuvu

$$a_{r2} := \frac{v_{rp2}}{t_{r2}} = 12.5 \quad [\text{m/s}^2]$$

úhlové zrychlení rychloposuvu

$$\epsilon_{s2} := \frac{a_{r2} \cdot 2 \cdot \pi}{s_{k2}} \quad [\text{rad/s}^2]$$

$$\epsilon_{m2} := \epsilon_{s2} \cdot i_{p2}$$

dráha při rozběhu na rychloposuv

$$s_{roz2} := \frac{1}{2} \cdot a_{r2} \cdot t_{r2}^2 = 0.01 \quad [\text{m}]$$

Dynamické hledisko

moment přesouvaných hmot:

$$M_{Gd2} := \begin{cases} \frac{3 \cdot m_2 \cdot g_G \cdot b_2 \cdot f_1 \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot i_{p2} \cdot \eta_{c2} \cdot L_2} & \text{if } \alpha = \frac{\pi}{2} \\ \frac{m_2 \cdot g_G \cdot \sin(\alpha_2) \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{c2} \cdot i_{p2}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

moment třecích sil
vedení

$$M_{GTd2} := \frac{m_2 \cdot g_G \cdot f_1 \cdot \cos(\alpha_2) \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{c2} \cdot i_{p2}}$$

moment tření KŠM

$$M_{KSMd2} := \frac{F_{p2} \cdot s_{k2}}{2 \cdot \pi \cdot i_{p2} \cdot \eta_{c2}} \cdot (1 - \eta_{s2}^2) + \frac{0.5 \cdot m_2 \cdot g_G \cdot \cos(\alpha_2) \cdot f_1 \cdot d_{s2} \cdot f_2}{i_{p2} \cdot \eta_{c2}}$$

moment zátěže
redukovaný
na hřídel motoru
moment
setrvačnosti
přesouvaných hmot

$$M_{zdrhm2} := M_{Gd2} + M_{GTd2} + M_{KSMd2}$$

$$J_{m2} := m_2 \cdot \left(\frac{s_{k2}}{2 \cdot \pi} \right)^2$$

celkový moment setrvačnosti
redukovaný na hřídel motoru

$$J_{rhm2} := J_{mot2} + \frac{J_{spoj2}}{i_{p2}^2} + \frac{J_{s2}}{i_{p2}^2} + \frac{J_{m2}}{i_{p2}^2}$$

celkový moment motoru:

$$M_{md2} := J_{rhm2} \cdot \epsilon_{s2} + M_{zdrhm2} = 3.507 \quad [\text{Nm}]$$

Doba rozběhu motoru 2:

Parametry motoru:

jemnovitý výkon

$$P_{jm2} := 1200 \quad [\text{W}]$$

počáteční otáčky

$$n_{02} := 0 \quad [\text{ot/s}]$$

jmenovité otáčky

$$n_{jm2} := 50 \quad [\text{ot/s}]$$

jmenovitý moment

$$M_{jm2} := 3.7 \quad [\text{Nm}]$$

požadované otáčky

$$n_{p2} := 50 \quad [\text{ot/s}]$$

Oblast A:

čas rozběhu

$$t_{A2} := \frac{2 \cdot \pi \cdot J_{rhm2}}{M_{jm2} \cdot \eta_c} \cdot \int_{n_0}^{n_{jm}} 1 \, dn = 0.041 \quad [\text{s}]$$

Oblast B:

čas rozběhu

$$t_{B2} := \frac{J_{rhm2}}{P_{jm2} \cdot \eta_c} \cdot \int_{n_{jm}}^{n_p} n_m \, dn_m = 0 \quad [\text{s}]$$

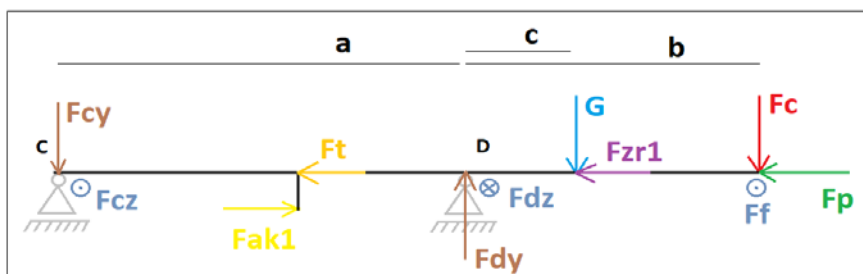
2) Výpočet silových účinků na vozíky a kuličkový šroub

2.1) Čelní soustružení

Výpočet řezných sil:

řezná rychlost	$v_c := \frac{225}{60}$	[m/s]
hloubka řezu	$a_{p1} := 0.0008$	[m]
posuv	$f_{n1} := 0.0002$	[m/ot]
měrná řezná síla	$k_{c1} := 28.5 \cdot 10^8$	[N/m ²]
	$F_{c1} := k_{c1} \cdot a_{p1} \cdot f_{n1} = 456$	[N]
	$F_{f1} := 0.25 \cdot F_{c1} = 114$	[N]
	$F_{p1} := 0.5 \cdot F_{c1} = 228$	[N]

Osa X



Rozměry osy X

	$m_1 := 23.91$	[kg]
	$\alpha_1 := \frac{13\pi}{36}$	[rad]
	$g_G := 9.81$	[m/s ²]
	$a_1 := 0.124$	[m]
	$b_1 := 0.150$	[m]
	$c_1 := 0.001$	[m]
součinitel tření lineárního vedení	$f_t := 0.005$	[-]

Řezný
proces

vnější průměr obrobku	$D_1 := 0.055$	[m]
průměr, po který se mění	$D_2 := 0.01$	[m]
otáčky stoupání KŠ	$s_k := 0.01$	[m]

celková dráha čelního sou.	$s_1 := \frac{D_1}{2} = 0.028$	[m]
dráha s konst. rychl. suportu	$s_{\text{konst}} := \frac{D_2}{2} = 5 \times 10^{-3}$	[m]
počáteční otáčky vřetena	$n_{vř11} := \frac{v_c}{\pi \cdot D_1} = 21.703$	[ot/s]
konečné otáčky vřetena	$n_{vř12} := \frac{v_c}{\pi \cdot D_2} = 119.366$	[ot/s]
počáteční posuv	$v_{p11} := n_{vř11} \cdot f_{n1} = 4.341 \times 10^{-3}$	[m/s]
konečný posuv	$v_{p12} := n_{vř12} \cdot f_{n1} = 0.024$	[m/s]
celkový čas operace	$t_1 := \frac{2 \cdot (s_1 - s_{\text{konst}})}{(v_{p12} + v_{p11})} + \frac{s_{\text{konst}}}{v_{p12}} = 1.804$	[s]
zrychlení během nerovnoměrného pohybu	$zr_1 := \frac{v_{p12} - v_{p11}}{t_1} = 0.011$	[m/s ²]
průměrná rychlost posuvu během procesu	$v_{\text{pos1}} := \frac{s_1}{t_1} = 0.015$	[m/s]
průměrné otáčky kuličkových šroubů během operace osy X a Z	$n_{KŠ11} := \frac{v_{\text{pos1}} \cdot 60}{s_k} = 91.443$	[ot/min]
	$n_{KŠ21} := 0$	[ot/min]

Silové účinky v ose X

tíhová síla	$G_1 := m_1 \cdot g_G = 234.557$	[N]
třecí síla	$F_{t1} := G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot f_t = 0.496$	[N]
síla od zrychlení	$F_{zr1} := m_1 \cdot zr_1 = 0.259$	[N]
Moyd :	$F_{c1} \cdot b_1 + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot c_1 - F_{cy1} \cdot a_1 = 0$	
	$F_{cy1} := \frac{F_{c1} \cdot b_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{a_1} = 552.412$	[N]
Mozd :	$F_{f1} \cdot b_1 - F_{cz1} \cdot a_1 = 0$	
	$F_{cz1} := \frac{F_{f1} \cdot b_1}{a_1} = 137.903$	[N]
x :	$F_{p1} + F_{zr11} - F_{ak11} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 0$	
	$F_{ak11} := F_{p1} + F_{zr1} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 441.335$	[N]

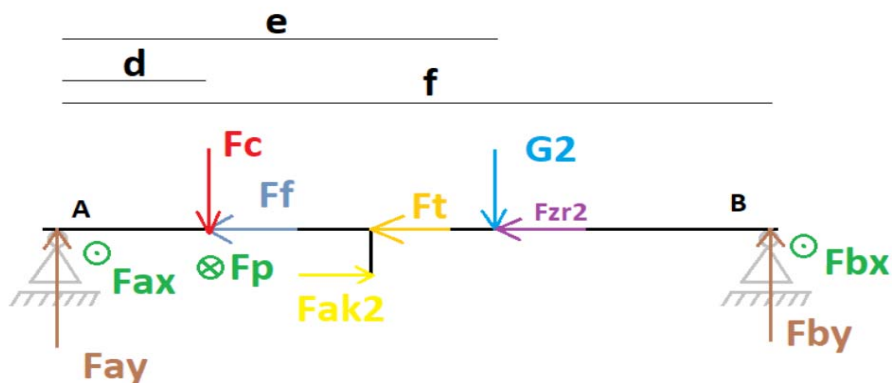
$$y: \quad F_{c1} - F_{dy1} + G_1 \cdot \cos(\alpha) + F_{cy1} = 0$$

$$F_{dy1} := F_{c1} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy1} = 1.108 \times 10^3 \quad [N]$$

$$z: \quad F_{f1} - F_{dz1} + F_{cz1} = 0$$

$$F_{dz1} := F_{f1} + F_{cz1} = 251.903 \quad [N]$$

Osa Z



Rozměry osy Z

$$d_1 := 0.029 \quad [m]$$

$$f_1 := 0.147 \quad [m]$$

$$e_1 := 0.055 \quad [m]$$

$$m_2 := 74.23 \quad [kg]$$

Silové účinky v ose Z

$$G_2 := m_2 \cdot g_G = 728.196 \quad [N]$$

$$F_{t2} := G_2 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot f_t = 1.539 \quad [N]$$

$$zr_{21} := 0 \quad [m/s^2]$$

$$F_{zr21} := m_1 \cdot zr_{21} \quad [N]$$

$$Moya: \quad F_{c1} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1) - F_{by1} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{by1} := \frac{F_{c1} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{f_1} = 205.103 \quad [N]$$

$$Moxa: \quad F_{p1} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1) - F_{bx1} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{bx1} := \frac{(F_{p1} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1))}{f_1} = 291.907 \quad [N]$$

$$x: \quad F_{p1} - F_{ax1} - F_{bx1} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ax1} := F_{p1} - F_{bx1} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) = 596.063 \quad [N]$$

$$\begin{aligned}
 y: \quad & F_{c1} - F_{ay1} - F_{by1} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) = 0 \\
 & F_{ay1} := F_{c1} - F_{by1} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) = 558.646 \quad [N] \\
 z: \quad & F_{f1} - F_{ak21} + F_{zr21} + F_{t2} = 0 \\
 & F_{ak21} := F_{f1} + F_{zr21} + F_{t2} = 115.539 \quad [N]
 \end{aligned}$$

2.2) Podélné soustružení (Hrubování):

Výpočet řezných sil:

$$\begin{aligned}
 v_{c2} &:= \frac{225}{60} \quad [m/s] \\
 a_{p2} &:= 0.0008 \quad [m] \\
 f_{n2} &:= 0.0005 \quad (m/ot) \quad [m/ot] \\
 k_{c2} &:= 28.5 \cdot 10^8 \quad [N/mm^2] \\
 F_{c2} &:= k_{c2} \cdot a_{p2} \cdot f_{n2} = 1.14 \times 10^3 \quad [N] \\
 F_{f2} &:= 0.45 \cdot F_{c2} = 513 \quad [N] \\
 F_{p2} &:= 0.8 \cdot F_{c2} = 912 \quad [N]
 \end{aligned}$$

Osa X

$$\begin{aligned}
 z_{r12} &:= 0 \quad [m/s^2] \\
 F_{zr12} &:= m_1 \cdot z_{r12} \\
 Moyd: \quad & F_{c2} \cdot b_1 + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot c_1 - F_{cy2} \cdot a_1 = 0 \\
 & F_{cy2} := \frac{F_{c2} \cdot b_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{a_1} \\
 Mozd: \quad & F_{f2} \cdot b_1 - F_{cz2} \cdot a_1 = 0 \\
 & F_{cz2} := \frac{F_{f2} \cdot b_1}{a_1} \\
 x: \quad & F_{p2} + F_{zr12} - F_{ak12} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 0 \\
 & F_{ak12} := F_{p2} + F_{zr12} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} \\
 y: \quad & F_{c2} - F_{dy2} + G_1 \cdot \cos(\alpha) + F_{cy2} = 0 \\
 & F_{dy2} := F_{c2} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy2} \\
 z: \quad & F_{f2} - F_{dz2} + F_{cz2} = 0 \\
 & F_{dz2} := F_{f2} + F_{cz2}
 \end{aligned}$$

Osa Z

$$\begin{aligned} \text{otáčky vřetene} \quad n_{vř2} &:= \frac{v_{c2}}{\pi \cdot D_1} \\ \text{rychlost posuvu} \quad v_{f2} &:= f_{n2} \cdot n_{vř2} \\ \text{dráha posuvu} \quad s_2 &:= 0.040 \quad [\text{m}] \\ \text{celkový čas operace} \quad t_2 &:= \frac{s_2}{v_{f2}} = 3.686 \quad [\text{s}] \end{aligned}$$

$$n_{KŠ22} := \frac{v_{f2} \cdot 60}{s_k}$$

$$n_{KŠ12} := 0$$

$$zr_{22} := 0$$

$$F_{zr22} := m_2 \cdot zr_{22}$$

$$\begin{aligned} \text{Moya:} \quad F_{c2} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1) - F_{by2} \cdot f_1 &= 0 \\ F_{by2} &:= \frac{F_{c2} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{f_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Moxa:} \quad F_{p2} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1) - F_{bx2} \cdot f_1 &= 0 \\ F_{bx2} &:= \frac{(F_{p2} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1))}{f_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x: \quad F_{p2} - F_{ax2} - F_{bx2} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) &= 0 \\ F_{ax2} &:= F_{p2} - F_{bx2} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y: \quad F_{c2} - F_{ay2} - F_{by2} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) &= 0 \\ F_{ay2} &:= F_{c2} - F_{by2} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z: \quad F_{f2} - F_{ak22} + F_{zr22} + F_{t2} &= 0 \\ F_{ak22} &:= F_{f2} + F_{zr22} + F_{t2} \end{aligned}$$

2.3) Podélné soustružení(dokončování):**Výpočet řezných sil:**

$$v_{c3} := \frac{225}{60} \quad [\text{m/s}]$$

$$a_{p3} := 0.00011 \quad [\text{m}]$$

$$f_{n3} := 0.0003 \quad (\text{m/ot}) \quad [\text{m/ot}]$$

$$k_{c3} := 28.5 \cdot 10^8 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$F_{c3} := k_{c3} \cdot a_{p3} \cdot f_{n3} = 94.05 \quad [\text{N}]$$

$$F_{f3} := 0.45 \cdot F_{c3} = 42.322 \quad [\text{N}]$$

$$F_{p3} := 0.8 \cdot F_{c3} = 75.24 \quad [\text{N}]$$

Osa X

$$z_{r13} := 0$$

$$F_{zr13} := m_1 \cdot z_{r13}$$

$$\text{Moyd :} \quad F_{c3} \cdot b_1 + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot c_1 - F_{cy3} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cy3} := \frac{F_{c3} \cdot b_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{a_1}$$

$$\text{Mozd :} \quad F_{f3} \cdot b_1 - F_{cz3} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cz3} := \frac{F_{f3} \cdot b_1}{a_1}$$

$$x : \quad F_{p3} + F_{zr13} - F_{ak13} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 0$$

$$F_{ak13} := F_{p3} + F_{zr13} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1}$$

$$y : \quad F_{c3} - F_{dy3} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy3} = 0$$

$$F_{dy3} := F_{c3} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy3}$$

$$z : \quad F_{f3} - F_{dz3} + F_{cz3} = 0$$

$$F_{dz3} := F_{f3} + F_{cz3}$$

Osa Z**Řezný proces:**

$$n_{vr3} := \frac{v_{c3}}{\pi \cdot D_1}$$

$$v_{f3} := f_{n3} \cdot n_{vř3}$$

$$s_3 := 0.04 \quad [m]$$

$$t_3 := \frac{s_3}{v_{f3}} = 6.144 \quad [s]$$

$$n_{KŠ23} := \frac{v_{f3} \cdot 60}{s_k} = 39.065$$

$$n_{KŠ13} := 0$$

$$zr_{23} := 0$$

$$F_{zr23} := m_2 \cdot zr_{23}$$

$$\text{Moya :} \quad F_{c3} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1) - F_{by3} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{by3} := \frac{F_{c3} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{f_1}$$

$$\text{Moxa :} \quad F_{p3} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1) - F_{bx3} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{bx3} := \frac{(F_{p3} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1))}{f_1}$$

$$x : \quad F_{p3} - F_{ax3} - F_{bx3} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ax3} := F_{p3} - F_{bx3} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1)$$

$$y : \quad F_{c3} - F_{ay3} - F_{by3} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ay3} := F_{c3} - F_{by3} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1)$$

$$z : \quad F_{f3} - F_{ak23} + F_{zr23} + F_{t2} = 0$$

$$F_{ak23} := F_{f3} + F_{zr23} + F_{t2}$$

2.4) Zapichování :

Výpočet řezných sil:

$$v_{c4} := \frac{235}{60} \quad [m/s]$$

$$a_{p4} := 0.0005 \quad [m]$$

$$f_{n4} := 0.00008 \quad (m/ot) \quad [m/ot]$$

$$k_{c4} := 28.5 \cdot 10^8 \quad [N/m^2]$$

$$F_{c4} := k_{c4} \cdot a_{p4} \cdot f_{n4} = 114 \quad [N]$$

Osa X

$$F_{f4} := 0 \cdot F_{c4} = 0 \quad [N]$$

$$F_{p4} := 0.6 \cdot F_{c4} = 68.4 \quad [N]$$

$$D_{14} := 0.055 \quad [m]$$

$$D_{24} := 0.050 \quad [m]$$

$$s_{14} := \frac{D_{14}}{2}$$

$$s_{\text{konst}4} := \frac{D_{24}}{2}$$

$$n_{vř14} := \frac{v_{c4}}{\pi \cdot D_{14}}$$

$$n_{vř24} := \frac{v_{c4}}{\pi \cdot D_{24}}$$

$$v_{p14} := n_{vř14} \cdot f_{n4}$$

$$v_{p24} := n_{vř24} \cdot f_{n4}$$

$$t_4 := \frac{2 \cdot (s_{14} - s_{\text{konst}4})}{(v_{p24} + v_{p14})} = 1.313 \quad [s]$$

$$z_{r14} := \frac{v_{p24} - v_{p14}}{t_4}$$

$$v_{\text{pos}4} := \frac{s_{14}}{t_4}$$

$$n_{Kš14} := \frac{v_{\text{pos}4} \cdot 60}{s_k}$$

$$n_{Kš24} := 0$$

$$F_{zr14} := m_1 \cdot z_{r14}$$

$$\text{Moyd : } F_{c4} \cdot b_1 + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot c_1 - F_{cy4} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cy4} := \frac{F_{c4} \cdot b_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{a_1}$$

$$\text{Mozd : } F_{f4} \cdot b_1 - F_{cz4} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cz4} := \frac{F_{f4} \cdot b_1}{a_1} = 0$$

$$x: \quad F_{p4} + F_{zr14} - F_{ak14} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 0$$

$$F_{ak14} := F_{p4} + F_{zr14} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1}$$

$$y: \quad F_{c4} - F_{dy4} + G_1 \cdot \cos(\alpha) + F_{cy4} = 0$$

$$F_{dy4} := F_{c4} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy4}$$

$$z: \quad F_{f4} - F_{dz4} + F_{cz4} = 0$$

$$F_{dz4} := F_{f4} + F_{cz4}$$

Osa Z

$$zr_{24} := 0$$

$$F_{zr24} := m_2 \cdot zr_{24}$$

$$\text{Moya:} \quad F_{c4} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1) - F_{by4} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{by4} := \frac{F_{c4} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{f_1}$$

$$\text{Moxa:} \quad F_{p4} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1) - F_{bx4} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{bx4} := \frac{(F_{p4} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1))}{f_1}$$

$$x: \quad F_{p4} - F_{ax4} - F_{bx4} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ax4} := F_{p4} - F_{bx4} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1)$$

$$y: \quad F_{c4} - F_{ay4} - F_{by4} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ay4} := F_{c4} - F_{by4} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1)$$

$$z: \quad F_{f4} - F_{ak24} + F_{zr24} + F_{t2} = 0$$

$$F_{ak24} := F_{f4} + F_{zr24} + F_{t2}$$

2.5) Zatížení od rychloposuvu

$$F_{c5} := 0 \quad [N]$$

$$F_{f5} := 0 \quad [N]$$

$$F_{p5} := 0 \quad [N]$$

Osa X

zrychlení soustavy během RP $z_{r15} := 10.638$ [m/s²]

síla od zrychlení $F_{zr15} := m_1 \cdot z_{r15}$

počet RP osy X $P_{RP1} := 4$

celkový čas jednoho RP
(pouze zrychlování) $t_{15} := 0.048$ [s]

celková dráha RP osy X $s_{15} := 2 \cdot P_{RP1} \cdot \frac{1}{2} \cdot z_{r15} \cdot t_{15}^2$

průměrná rychlost během RP $v_{pos15} := \frac{s_{15}}{2 \cdot P_{RP1} \cdot t_{15}}$

průměrné otáčky KŠ $n_{KŠ15} := \frac{v_{pos15} \cdot 60}{s_k}$

Silové účinky v ose X

$$\text{Moyd : } F_{c5} \cdot b_1 + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot c_1 - F_{cy5} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cy5} := \frac{F_{c5} \cdot b_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{a_1}$$

$$\text{Mozd : } F_{f5} \cdot b_1 - F_{cz5} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cz5} := \frac{F_{f5} \cdot b_1}{a_1}$$

$$x : F_{p5} + F_{zr15} - F_{ak15} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 0$$

$$F_{ak15} := F_{p5} + F_{zr15} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1}$$

$$y : F_{c5} - F_{dy5} + G_1 \cdot \cos(\alpha) + F_{cy5} = 0$$

$$F_{dy5} := F_{c5} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy5}$$

$$z : F_{f5} - F_{dz5} + F_{cz5} = 0$$

$$F_{dz5} := F_{f5} + F_{cz5}$$

Osa Z

zrychlení soustavy během RP $z_{r25} := 10.638$ [m/s²]

síla od zrychlení $F_{zr25} := m_2 \cdot z_{r25}$

počet RP osy Z $P_{RP2} := 9$ [-]

celkový čas jednoho RP
(pouze zrychlování) $t_{25} := 0.048$ [s]

celková dráha RP osy Z $s_{25} := 2P_{RP2} \cdot \frac{1}{2} \cdot z_{r25} \cdot t_{25}^2$

průměrná rychlost během RP $v_{pos25} := \frac{s_{25}}{t_{25} \cdot P_{RP2} \cdot 2}$

průměrné otáčky KŠ $n_{KŠ25} := \frac{v_{pos25} \cdot 60}{s_k}$

Silové účinky v ose Z

Moya : $F_{c5} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1) - F_{by5} \cdot f_1 = 0$

$$F_{by5} := \frac{F_{c5} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{f_1}$$

Moxa : $F_{p5} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1) - F_{bx5} \cdot f_1 = 0$

$$F_{bx5} := \frac{(F_{p5} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1))}{f_1}$$

x : $F_{p5} - F_{ax5} - F_{bx5} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) = 0$

$$F_{ax5} := F_{p5} - F_{bx5} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1)$$

y : $F_{c5} - F_{ay5} - F_{by5} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) = 0$

$$F_{ay5} := F_{c5} - F_{by5} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1)$$

z : $F_{f5} - F_{ak25} + F_{zr25} + F_{t2} = 0$

$$F_{ak25} := F_{f5} + F_{zr25} + F_{t2}$$

$$t_5 := 2 \cdot (P_{RP1} \cdot t_{15} + P_{RP2} \cdot t_{25}) = 1.248 \quad [s]$$

2.6) Soustružení závitu**Výpočet řezných sil:**

$$v_{c6} := \frac{145}{60} \quad [m/s]$$

$$a_{p6} := 0.00016 \quad [m]$$

$$f_{n6} := 0.001 \quad (m/ot) \quad [m/ot]$$

$$k_{c6} := 28.5 \cdot 10^8 \quad [N/m^2]$$

Osa X

$$F_{c6} := k_{c6} \cdot a_{p6} \cdot f_{n6} = 456 \quad [N]$$

$$F_{f6} := 0.45 \cdot F_{c6} = 513 \quad [N]$$

$$F_{p6} := 0.8 \cdot F_{c6} = 364.8 \quad [N]$$

$$n_{vř6} := \frac{v_{c6}}{\pi \cdot D_1}$$

$$v_{f6} := f_{n6} \cdot n_{vř6}$$

$$s_6 := 5 \cdot 0.010 = 0.05 \quad [m]$$

$$t_6 := \frac{s_6}{v_{f6}} = 3.575 \quad [s]$$

$$n_{KŠ26} := \frac{v_{f6} \cdot 60}{s_k}$$

$$n_{KŠ16} := 0$$

$$zr_{16} := 0$$

$$F_{zr16} := m_1 \cdot zr_{16}$$

$$\text{Moyd : } F_{c6} \cdot b_1 + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot c_1 - F_{cy6} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cy6} := \frac{F_{c6} \cdot b_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{a_1}$$

$$\text{Mozd : } F_{f6} \cdot b_1 - F_{cz6} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cz6} := \frac{F_{f6} \cdot b_1}{a_1}$$

$$x : F_{p6} + F_{zr16} - F_{ak16} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 0$$

$$F_{ak16} := F_{p6} + F_{zr16} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1}$$

$$y : F_{c6} - F_{dy6} + G_1 \cdot \cos(\alpha) + F_{cy6} = 0$$

$$F_{dy6} := F_{c6} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy6}$$

$$z : F_{f6} - F_{dz6} + F_{cz6} = 0$$

$$F_{dz6} := F_{f6} + F_{cz6}$$

Osa Z

$$zr_{26} := 0$$

$$F_{zr26} := m_2 \cdot z_{r26}$$

$$\text{Moya : } F_{c6} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1) - F_{by6} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{by6} := \frac{F_{c6} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{f_1}$$

$$\text{Moxa : } F_{p6} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1) - F_{bx6} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{bx6} := \frac{(F_{p6} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1))}{f_1}$$

$$x : F_{p6} - F_{ax6} - F_{bx6} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ax6} := F_{p6} - F_{bx6} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1)$$

$$y : F_{c6} - F_{ay6} - F_{by6} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ay6} := F_{c6} - F_{by6} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1)$$

$$z : F_{f6} - F_{ak26} + F_{zr26} + F_{t2} = 0$$

$$F_{ak26} := F_{f6} + F_{zr26} + F_{t2}$$

2.7) Upichování

Výpočet řezných sil:

$$v_{c7} := \frac{235}{60} \quad [\text{m/s}]$$

$$a_{p7} := 0.0005 \quad [\text{m}]$$

$$f_{n7} := 0.00015 \quad (\text{m/ot}) \quad [\text{m/ot}]$$

$$k_{c7} := 28.5 \cdot 10^8 \quad [\text{N/m}^2]$$

$$F_{c7} := k_{c7} \cdot a_{p7} \cdot f_{n7} = 213.75 \quad [\text{N}]$$

$$F_{f7} := 0.25 \cdot F_{c7} = 53.437 \quad [\text{N}]$$

$$F_{p7} := 0.5 \cdot F_{c7} = 106.875 \quad [\text{N}]$$

Osa X

$$D_{17} := 0.055 \quad [\text{m}]$$

$$D_{27} := 0.01 \quad [\text{m}]$$

$$s_{17} := \frac{D_{17}}{2}$$

$$s_{\text{konst}7} := \frac{D_{27}}{2}$$

$$n_{vř17} := \frac{v_{c7}}{\pi \cdot D_{17}}$$

$$n_{vř27} := \frac{v_{c7}}{\pi \cdot D_{27}}$$

$$v_{p17} := n_{vř17} \cdot f_{n7}$$

$$v_{p27} := n_{vř27} \cdot f_{n7}$$

$$t_7 := \frac{2 \cdot (s_{17} - s_{konst7})}{(v_{p27} + v_{p17})} + \frac{s_{konst7}}{v_{p27}} = 2.303 \quad [s]$$

$$v_{pos7} := \frac{s_{17}}{t_7}$$

$$n_{KŠ17} := \frac{v_{pos7} \cdot 60}{s_k}$$

$$n_{KŠ27} := 0$$

$$z_{r17} := \frac{v_{p27} - v_{p17}}{t_7}$$

$$F_{zr17} := m_1 \cdot z_{r17}$$

$$\text{Moyd :} \quad F_{c7} \cdot b_1 + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) \cdot c_1 - F_{cy7} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cy7} := \frac{F_{c7} \cdot b_1 + G_1 \cdot c_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{a_1}$$

$$\text{Mozd :} \quad F_{f7} \cdot b_1 - F_{cz7} \cdot a_1 = 0$$

$$F_{cz7} := \frac{F_{f7} \cdot b_1}{a_1}$$

$$x : \quad F_{p7} + F_{zr17} - F_{ak17} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1} = 0$$

$$F_{ak17} := F_{p7} + F_{zr17} + G_1 \cdot \sin(\alpha_1) + F_{t1}$$

$$y : \quad F_{c7} - F_{dy7} + G_1 \cdot \cos(\alpha) + F_{cy7} = 0$$

$$F_{dy7} := F_{c7} + G_1 \cdot \cos(\alpha_1) + F_{cy7}$$

$$z : \quad F_{f7} - F_{dz7} + F_{cz7} = 0$$

$$F_{dz7} := F_{f7} + F_{cz7}$$

Osa Z

$$zr_{27} := 0$$

$$F_{zr27} := m_2 \cdot zr_{27}$$

$$\text{Moya : } F_{c7} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1) - F_{by7} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{by7} := \frac{F_{c7} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \cos(\alpha_1)}{f_1}$$

$$\text{Moxa : } F_{p7} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1) - F_{bx7} \cdot f_1 = 0$$

$$F_{bx7} := \frac{(F_{p7} \cdot d_1 + G_2 \cdot e_1 \cdot \sin(\alpha_1))}{f_1}$$

$$x : F_{p7} - F_{ax7} - F_{bx7} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ax7} := F_{p7} - F_{bx7} + G_2 \cdot \sin(\alpha_1)$$

$$y : F_{c7} - F_{ay7} - F_{by7} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1) = 0$$

$$F_{ay7} := F_{c7} - F_{by7} + G_2 \cdot \cos(\alpha_1)$$

$$z : F_{f7} - F_{ak27} + F_{zr27} + F_{t2} = 0$$

$$F_{ak27} := F_{f7} + F_{zr27} + F_{t2}$$

Souhrn působících sil:

Osa Z

$F_{ay1} = 558.646$	[N]	$F_{ax1} = 596.063$	[N]	$F_{ak21} = 115.539$	[N]
$F_{ay2} = 1.108 \times 10^3$	[N]	$F_{ax2} = 1.145 \times 10^3$	[N]	$F_{ak22} = 514.539$	[N]
$F_{ay3} = 268.101$	[N]	$F_{ax3} = 473.439$	[N]	$F_{ak23} = 43.861$	[N]
$F_{ay4} = 284.115$	[N]	$F_{ax4} = 467.949$	[N]	$F_{ak24} = 1.539$	[N]
$F_{ay5} = 192.605$	[N]	$F_{ax5} = 413.042$	[N]	$F_{ak25} = 791.197$	[N]
$F_{ay6} = 558.646$	[N]	$F_{ax6} = 705.875$	[N]	$F_{ak26} = 514.539$	[N]
$F_{ay7} = 364.186$	[N]	$F_{ax7} = 498.833$	[N]	$F_{ak27} = 54.976$	[N]
$F_{by1} = 205.103$	[N]	$F_{bx1} = 291.907$	[N]	$n_{K\check{S}21} = 0$	[ot/min]
$F_{by2} = 340.042$	[N]	$F_{bx2} = 426.846$	[N]	$n_{K\check{S}22} = 65.109$	[ot/min]
$F_{by3} = 133.698$	[N]	$F_{bx3} = 261.771$	[N]	$n_{K\check{S}23} = 39.065$	[ot/min]
$F_{by4} = 137.634$	[N]	$F_{bx4} = 260.421$	[N]	$n_{K\check{S}24} = 0$	[ot/min]
$F_{by5} = 115.144$	[N]	$F_{bx5} = 246.928$	[N]	$n_{K\check{S}25} = 1.532 \times 10^3$	[ot/min]
$F_{by6} = 205.103$	[N]	$F_{bx6} = 318.895$	[N]	$n_{K\check{S}26} = 83.918$	[ot/min]
$F_{by7} = 157.313$	[N]	$F_{bx7} = 268.012$	[N]	$n_{K\check{S}27} = 0$	[ot/min]

Osa X

$F_{cy1} = 552.412$	[N]	$F_{cz1} = 137.903$	[N]	$F_{ak11} = 441.335$	[N]
$F_{cy2} = 1.38 \times 10^3$	[N]	$F_{cz2} = 620.565$	[N]	$F_{ak12} = 1.125 \times 10^3$	[N]
$F_{cy3} = 114.57$	[N]	$F_{cz3} = 51.197$	[N]	$F_{ak13} = 288.317$	[N]
$F_{cy4} = 138.703$	[N]	$F_{cz4} = 0$	[N]	$F_{ak14} = 281.48$	[N]
$F_{cy5} = 0.799$	[N]	$F_{cz5} = 0$	[N]	$F_{ak15} = 467.431$	[N]
$F_{cy6} = 552.412$	[N]	$F_{cz6} = 620.565$	[N]	$F_{ak16} = 577.877$	[N]
$F_{cy7} = 259.368$	[N]	$F_{cz7} = 64.642$	[N]	$F_{ak17} = 320.11$	[N]
$F_{dy1} = 1.108 \times 10^3$	[N]	$F_{dz1} = 251.903$	[N]	$n_{K\check{S}11} = 91.443$	[ot/min]
$F_{dy2} = 2.619 \times 10^3$	[N]	$F_{dz2} = 1.134 \times 10^3$	[N]	$n_{K\check{S}12} = 0$	[ot/min]
$F_{dy3} = 307.748$	[N]	$F_{dz3} = 93.519$	[N]	$n_{K\check{S}13} = 0$	[ot/min]
$F_{dy4} = 351.831$	[N]	$F_{dz4} = 0$	[N]	$n_{K\check{S}14} = 125.669$	[ot/min]
$F_{dy5} = 99.928$	[N]	$F_{dz5} = 0$	[N]	$n_{K\check{S}15} = 1.532 \times 10^3$	[ot/min]
$F_{dy6} = 1.108 \times 10^3$	[N]	$F_{dz6} = 1.134 \times 10^3$	[N]	$n_{K\check{S}16} = 0$	[ot/min]
$F_{dy7} = 572.246$	[N]	$F_{dz7} = 118.08$	[N]	$n_{K\check{S}17} = 71.63$	[ot/min]

3) Výpočet životnosti lineárního vedení HIWIN

Osa X

faktor tvrdosti	$f_h := 0.8$	[-]
zátěžový faktor	$f_w := 3.5$	[-]
teplotní faktor	$f_T := 1$	[-]
dynamická únosnost	$C_{dyn} := 26480$	[N]
celkový čas osy X	$t_{c1} := t_1 + t_4 + 2P_{RP1} \cdot t_{15} + t_7 = 5.805$	[s]
celková dráha osy X	$s_{c1} := s_1 + (s_{14} - s_{konst4}) + s_{15} + s_{17} = 0.156$	[m]
průměrná rychlost	$v_{p1} := \frac{s_{c1}}{t_{c1}} \cdot 60 = 1.608$	[m/min]

Zatížení vozíků

$$P_{11} := \frac{|F_{dy1}| + |F_{dz1}|}{2}$$

$$P_{41} := \frac{|F_{dy4}| + |F_{dz4}|}{2}$$

$$P_{51} := \frac{|F_{dy5}| + |F_{dz5}|}{2}$$

$$P_{71} := \frac{|F_{dy7}| + |F_{dz7}|}{2}$$

ekvivalentní zátěž

$$P_{m1} := \sqrt[3]{\frac{1}{s_{c1}} \cdot [P_{11}^3 \cdot s_1 + P_{41}^3 \cdot (s_{14} - s_{konst4}) + P_{51}^3 \cdot s_{15} + P_{71}^3 \cdot (s_{17})]} = 397.824 \text{ [N]}$$

jmenovitá životnost v dráze	$L_{d1} := \left(\frac{f_h \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_w \cdot P_{m1}} \right)^3 \cdot 50000 = 1.761 \times 10^8$	[m]
-----------------------------	---	-----

jmenovitá životnost v hodinách	$L_{hlin1} := \frac{L_{d1}}{v_{p1} \cdot 60} = 1.825 \times 10^6$	[h]
--------------------------------	---	-----

požadovaná životnost	$L_{pož} := 80 \cdot 10^3$	[h]
----------------------	----------------------------	-----

poměr vypočetné životnosti a požadované životnosti	$s_{h1} := \frac{L_{hlin1}}{L_{pož}} = 22.818$	[-]
--	--	-----

Osa Z

	$t_{c2} := t_2 + t_3 + 2P_{RP2} \cdot t_{25} + t_6 = 14.269$	[s]
--	--	-----

	$s_{c2} := s_2 + s_3 + s_{25} + s_6 = 0.351$	[m]
--	--	-----

$$v_{p2} := \frac{s_{c2}}{t_{c2}} \cdot 60 = 1.474 \quad [\text{m/min}]$$

$$P_{22} := \frac{|F_{ay2}| + |F_{ax2}|}{2}$$

$$P_{32} := \frac{|F_{ay3}| + |F_{ax3}|}{2}$$

$$P_{52} := \frac{|F_{ay5}| + |F_{ax5}|}{2}$$

$$P_{62} := \frac{|F_{ay6}| + |F_{ax6}|}{2}$$

$$P_{m2} := \sqrt[3]{\frac{1}{s_{c2}} \cdot (P_{22}^3 \cdot s_2 + P_{32}^3 \cdot s_3 + P_{52}^3 \cdot s_{25} + P_{62}^3 \cdot s_6)} = 605.866 [\text{N}]$$

$$L_{d2} := \left(\frac{f_h \cdot f_T \cdot C_{dyn}}{f_w \cdot P_{m2}} \right)^3 \cdot 50000 = 4.985 \times 10^7 \quad [\text{m}]$$

$$L_{hlin2} := \frac{L_{d2}}{v_{p2} \cdot 60} = 5.636 \times 10^5 \quad [\text{h}]$$

$$s_{h2} := \frac{L_{hlin2}}{L_{pož}} = 7.044 \quad [-]$$

4)Výpočet kuličkového šroubu HIWIN:

Osa X

koeficient uložení	$k_d := 0.42$	
průměr hřídele	$d_{k1} := 21.8$	[mm]
vzdálenost mezi ložisky	$l_{d1} := 170$	[mm]
jmenovitý průměr KŠ	$D_{jm1} := 25$	[mm]
maximální uvažované otáčky	$n_{u1} := 3000$	[ot/min]

Otáčkový faktor

$$D_n := D_{jm1} \cdot n_{u1} = 7.5 \times 10^4 \quad \text{musí být menší než } 90\,000$$

Kontrola maximálních otáček

kritické otáčky	$n_{k1} := k_d \cdot \frac{d_{k1}^4}{l_{d1}^2} \cdot 10^8 = 3.168 \times 10^4$	[ot/min]
maximální přípustné otáčky	$n_{max} := n_{k1} \cdot 0.8 = 2.535 \times 10^4$	[ot/min]

Kontrola vzpěrné tuhosti:

koeficient závislosti na uložení	$k_k := 0.26$	[-]
nepodepřená délka hřídele	$l_{k1} := 130$	[mm]
max. teoretická dovolená axiální síla	$F_{k1} := k_k \cdot \frac{d_{k1}^4}{l_{k1}^2} \cdot 10^5 = 3.475 \times 10^5$	[N]
max. dovolená provozní axiální síla	$F_{kmax} := F_{k1} \cdot 0.5 = 1.737 \times 10^5$	[N]

Výpočet životnosti

dynamická únosnost

$$C_{\text{dyn1}} := 16400 \quad [\text{N}]$$

počet různých otáčkových
režimů během jednoho cyklu

$$i := 1 \dots 7$$

$$t_{x_i} :=$$

$$F_{ak1_i} :=$$

$$n_{x_i} :=$$

F_{ak11}
F_{ak12}
F_{ak13}
F_{ak14}
F_{ak15}
F_{ak16}
F_{ak17}

$n_{KŠ11}$
$n_{KŠ12}$
$n_{KŠ13}$
$n_{KŠ14}$
$n_{KŠ15}$
$n_{KŠ16}$
$n_{KŠ17}$

$\frac{t_1}{t_{c1}} \cdot 100$
$\frac{t_2}{t_{c1}} \cdot 100$
$\frac{t_3}{t_{c1}} \cdot 100$
$\frac{t_4}{t_{c1}} \cdot 100$
$\frac{t_{15} \cdot P_{RP1} \cdot 2}{t_{c1}} \cdot 100$
$\frac{t_6}{t_{c1}} \cdot 100$
$\frac{t_7}{t_{c1}} \cdot 100$

střední otáčky

$$n_{m1} := \sum_i \left(n_{x_i} \cdot \frac{t_{x_i}}{100} \right) = 186.609 \quad [\text{ot/min}]$$

střední zatížení

$$F_{m1} := \sqrt[3]{\sum_i \left[\left(F_{ak1_i} \right)^3 \cdot \frac{n_{x_i} \cdot t_{x_i}}{n_{m1} \cdot 100} \right]} = 425.336 \quad [\text{N}]$$

životnost v otáčkách

$$L_{o1} := \left(\frac{C_{\text{dyn1}}}{F_{m1}} \right)^3 \cdot 10^6 = 5.732 \times 10^{10} \quad [\text{ot}]$$

životnost v hodinách

$$L_{hkš1} := \left(\frac{C_{\text{dyn1}}}{F_{m1}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{m1} \cdot 60} = 5.12 \times 10^6 \quad [\text{h}]$$

poměr vypočtené a požadované
životnosti

$$s_{h3} := \frac{L_{hkš1}}{L_{\text{pož}}} = 63.998 \quad [-]$$

Osa Z

$$d_{k2} := 21.8 \quad [\text{mm}]$$

$$l_{d2} := 270 \quad [\text{mm}]$$

jmenovitý průměr KŠ

$$D_{jm2} := 25 \quad [\text{mm}]$$

maximální otáčky v operaci

$$n_{u2} := 3000 \quad [\text{ot/min}]$$

otáčkový
faktor

$$D_{n2} := D_{jm2} \cdot n_{u2} = 7.5 \times 10^4 \quad \text{musí být menší než } 90\,000$$

**Kontrola maximálních
otáček**

$$n_{k2} := k_d \cdot \frac{d_{k2}^4}{l_{d2}^2} \cdot 10^8 = 1.256 \times 10^4 \quad [\text{ot/min}]$$

$$n_{max2} := n_{k2} \cdot 0.8 = 1.005 \times 10^4 \quad [\text{ot/min}]$$

Kontrola vzpěrné tuhosti:

$$l_{k2} := 220 \quad [\text{mm}]$$

$$F_{k2} := k_k \cdot \frac{d_{k2}^4}{l_{k2}^2} \cdot 10^5 = 1.213 \times 10^5 \quad [\text{N}]$$

$$F_{kmax2} := F_{k2} \cdot 0.5 = 6.066 \times 10^4 \quad [\text{N}]$$

$$C_{dyn2} := 16400 \quad [\text{N}]$$

Výpočet životností

$$F_{ak2_i} := \quad n_{z_i} := \quad t_{z_i} :=$$

F_{ak21}	$n_{KŠ21}$	$\frac{t_1}{t_{c2}} \cdot 100$
F_{ak22}	$n_{KŠ22}$	$\frac{t_2}{t_{c2}} \cdot 100$
F_{ak23}	$n_{KŠ23}$	$\frac{t_3}{t_{c2}} \cdot 100$
F_{ak24}	$n_{KŠ24}$	$\frac{t_4}{t_{c2}} \cdot 100$
F_{ak25}	$n_{KŠ25}$	$\frac{t_5 \cdot P_{RP2} \cdot 2}{t_{c2}} \cdot 100$
F_{ak26}	$n_{KŠ26}$	$\frac{t_6}{t_{c2}} \cdot 100$
F_{ak27}	$n_{KŠ27}$	$\frac{t_7}{t_{c2}} \cdot 100$

$$n_{m2} := \sum_i \left(n_{z_i} \cdot \frac{t_{z_i}}{100} \right) = 147.424$$

$$F_{m2} := \sqrt[3]{\sum_i \left[\left(F_{ak2i} \right)^3 \cdot \frac{n_{z_i} \cdot t_{z_i}}{n_{m2} \cdot 100} \right]} = 702.448 \quad [N]$$

$$L_{o2} := \left(\frac{C_{dyn2}}{F_{m2}} \right)^3 \cdot 10^6 = 1.273 \times 10^{10} \quad [ot]$$

$$L_{hkš2} := \left(\frac{C_{dyn2}}{F_{m2}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{m2} \cdot 60} = 1.439 \times 10^6 \quad [h]$$

$$s_{h4} := \frac{L_{hkš2}}{L_{pož}} = 17.984 \quad [-]$$

4)Výpočet životnosti kosoúhlého ložiska HIWIN:**Osa X**

výpočtový součinitel	$X := 0.63$	
	$Y_2 := 1.24$	
hmotnost KŠ 1	$m_{KS1} := 0.71$	[kg]
dynamická únosnost	$C_{11} := 18800$	[N]
radiální síla	$F_{r1} := m_{KS1} \cdot g_G = 6.965$	[N]
axiální síla	$F_{a1} := F_{m1} = 425.336$	
ekvivalentní zatížení	$P_1 := X \cdot F_{r1} + Y_2 \cdot F_{a1} = 531.804$	
životnost v hodinách	$L_{10h1} := \frac{10^6}{60n_{m1}} \cdot \left(\frac{C_{11}}{P_1} \right)^3 = 3.946 \times 10^6$	[h]
poměr vypočtené a požadované životnosti	$s_{h5} := \frac{L_{10h1}}{L_{pož}} = 49.323$	[-]

Osa Z

	$m_{KS2} := 0.9$	[kg]
	$C_{12} := 18800$	[N]
	$F_{r2} := m_{KS2} \cdot g_G = 8.829$	[N]
	$F_{a2} := F_{m2} = 702.448$	[N]
	$P_2 := X \cdot F_{r2} + Y_2 \cdot F_{a2} = 876.598$	[N]
	$L_{10h2} := \frac{10^6}{60n_{m2}} \cdot \left(\frac{C_{12}}{P_2} \right)^3 = 1.115 \times 10^6$	[h]
	$s_{h6} := \frac{L_{10h2}}{L_{pož}} = 13.94$	[-]