

STROJNI ELEMENTI

FAKULTETA ZA
STROJNIŠTVO

Vaja 6:

ZAGONSKA SKLOPKA

Kazalo

Kazalo.....	2
Oznaka uporabljenih simbolov.....	3
1. Definicija naloge.....	4
1.1 Podatki.....	4
1.2 Zahteve naloge.....	5
2. Opis sklopke.....	6
3. Opis preizkuševališča in potek preizkusa.....	8
3.1 Potek preizkusa.....	9
4. Rezultati in vrednotenje rezultatov.....	10
4.1 Diagram momentov in kotnih hitrosti.....	10
4.2 Zdrs, moč trenja in moč pospeševanja.....	12
4.3 Koeficient trenja.....	14
4.4 Delo trenja in delo pospeševanja.....	18
4.5 Vztrajnostni moment pospeševanih mas.....	19
4.6 Toplotni preračun sklopke.....	20
5. Zaključek.....	21
6. Literatura.....	21

Oznaka uporabljenih simbolov

c	specifična toplota jekla	J/kgK
n_{em}	vrtljaji elektromotorja	min ⁻¹
n_{skl}	vrtljaji sklopke	min ⁻¹
s	zdrs ali slip	
J_{vzt}	vztrajnostni moment	mm ⁴
M_{kor}	koristni moment	Nm
M_{pos}	moment pospeševanja	Nm
M_{skl}	moment sklopke	Nm
P_{pos}	moč pospeševanja	W
P_{tr}	moč trenja	W
Q	pri zagonu nastala toplota	J
W_{pos}	delo pospeševanja	W
W_{tr}	delo trenja	W
ϑ_{max}	maksimalna temperatura plašča	K
ϑ_{ok}	temperatura okolice	K

1. Definicija naloge

Za zagonsko sklopko s tornimi segmenti je potrebno teoretično določiti osnovne obratovalne karakteristike in jih primerjati z eksperimentalno dobljenimi rezultati (poteki). Zagonska sklopka je montirana v transmisijo moči tako, da je njen notranji del (rotor) pritrjen na štrcelj elektromotorja, njen zunanji del (plašč) pa prevzema vlogo jermenice za pogon s ploščatim jermenom EKSTREMULTUS. Konstrukcija sklopke in dimenzije so razvidne iz skice (Slika 1).

1.1 Podatki

- koeficient trenja med utežjo in utorom: $\mu_b = 0,24$
- koeficient trenja med utežjo in plaščem sklopke: $\mu_{up} = 0,42$
- torna obloga: azbest TIP A-400
- podatki o masi sklopke:
 - masa sklopke brez uteži: $m_{ski} = 15684 \text{ g}$
 - masa ene uteži s torno oblogo: $m_u = 140,93 \text{ g}$
 - število uteži: $n_u = 14$
- premer jermenice na sklopki: $d_1 = 165 \text{ mm}$
- premer jermenice na vztrajniku: $d_2 = 147,4 \text{ mm}$
- prestavno razmerje jermenskega prenosa: $i = d_1/d_2 = 0,893$
- težiščni polmer uteži: $R_u = 51,3 \text{ mm}$
- notranji polmer odgonskega bobna: $R = 65,0 \text{ mm}$
- število vrtljajev elektromotorja: $n_{m,max} = 1480 \text{ min}^{-1}$
- debelina jermena: $\delta_2 = 2 \text{ mm}$
- širina jermena: $b = 70 \text{ mm}$
- toplotna prevodnost jermena: $\lambda_2 = 0,16 \frac{W}{mK}$
- toplotna prestopnost: $\alpha_1 = \alpha_2 = 25 \frac{W}{m^2K}$
- najvišja dovoljena temperatura plašča sklopke: $\vartheta_{dop} = 45^\circ C$

1.2 Zahteve naloge

V sklopu naloge je potrebno:

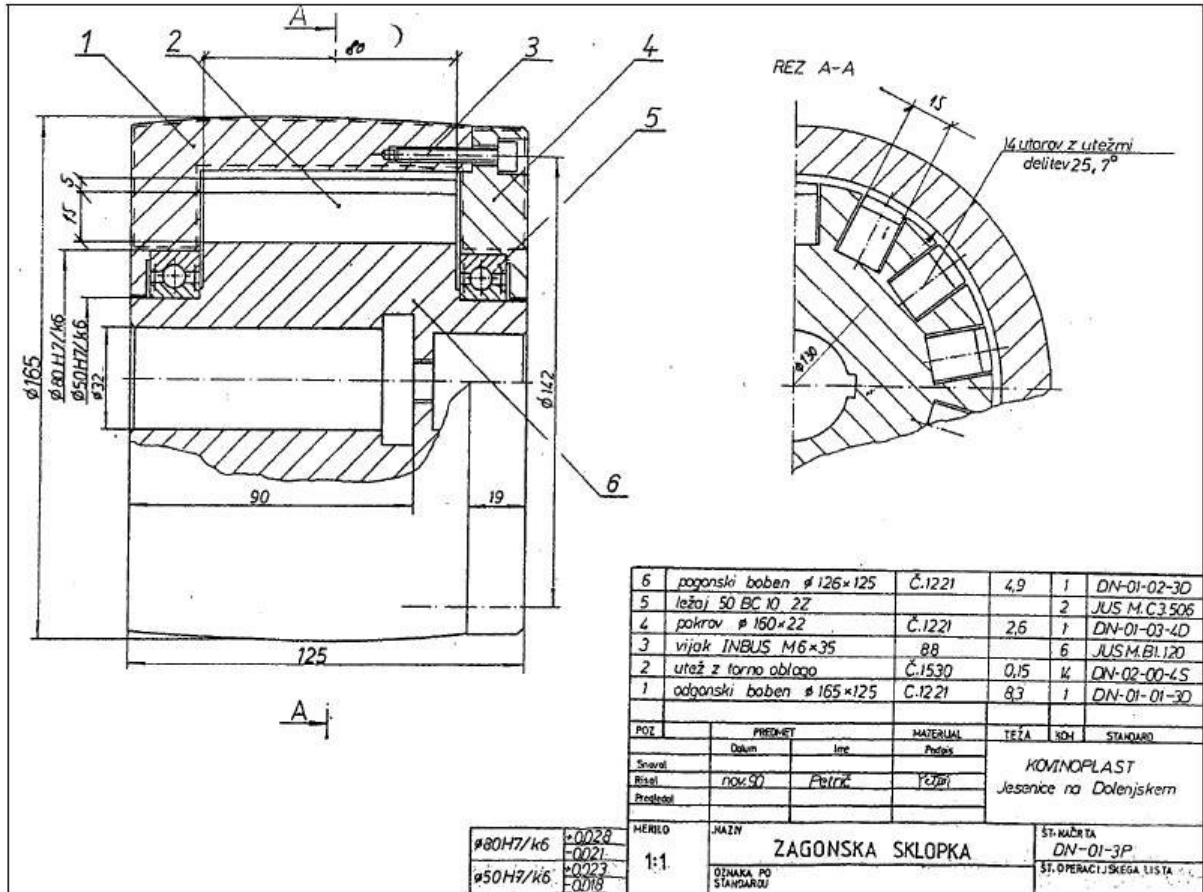
- Narisati shemo preskuševališča s pripadajočimi opisi sestavnih delov. Opisati potek meritev karakteristik zagonske sklopke.
- Narisati izmerjene diagrame karakteristik sklopke $M_{tr}(t)$, $M_{kor}(t)$, $M_{po}(t)$, $\omega_{skl}(t)$, $\omega_{EM}(t)$.
- Izračunati zdrs, moč trenja in moč pospeševanja in prikazati v diagramu njihovo časovno odvisnost.
- Izpeljati enačbo za izračun koeficienta trenja μ v odvisnosti od obratovalnih pogojev in vplivnih geometrijskih karakteristik sklopke za prvi fizikalni model. Narisati diagram koeficienta trenja kot funkcijo časa $\mu(t)$ in diagram koeficienta trenja kot funkcijo zdrsa $\mu(s)$.
- Z uporabo ene od metod numerične integracije izračunati delo trenja W_{tr} in delo pospeševanja W_{pos} .
- Izračunati vztrajnostni moment pospeševanih mas.
- Teoretično izračunati najvišjo temperaturo na plašču sklopke po končanem prvem zagonu ter potreben čas ohlajanja, da bo temperatura sklopke $v_{skl} = v_{ok} + 5^{\circ}C$. Temperatura okolice je $20^{\circ}C$.

2. Opis sklopke

Zagonske sklopke so sklopke, ki se samodejno postopoma vklopijo pri določenih pogojih. Sklopka se začne vklapljati pri neki vrtilni hitrosti in se izključi pri višji vrtilni hitrosti. Take sklopke uporabljamo pri sistemih, kjer je potrebno premagovati velike vztrajnostne momente zaradi velike mase sistema, npr. pri centrifugah, rotacijskih pečeh, težkih vozilih itd. Prednost pogona z vgrajeno zagonsko sklopko je v tem, da se začne prenašati vrtilni moment postopno z naraščanjem vrtilne hitrosti elektromotorja ter da nam omeji maksimalen vrtilni moment. S tem razbremenimo elektromotor in omogočimo postopen zagon celotne transmisije.

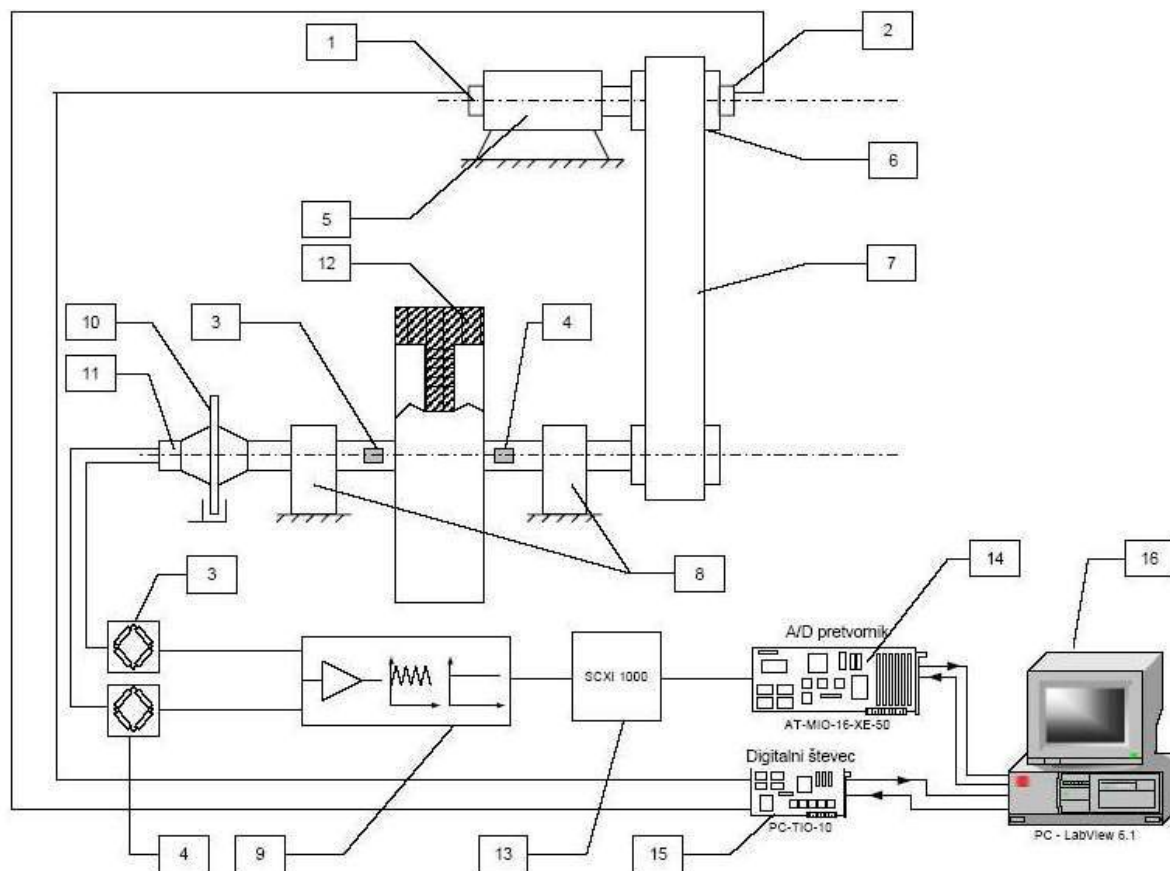
Vse zagonske sklopke imajo enak princip delovanja. Zaradi rotacije gredi se pojavijo centrifugalne sile, ki pri dovolj veliki vrtilni hitrosti premaknejo ekscentrično maso ob zunanjo steno sklopke in povečajo torno silo med zagonskim in gnanim delom določene zveze.

Poznamo različne izvedbe zagonskih sklopk. V našem primeru imamo sklopko KOVINOPLAST (Slika 1), pri kateri zagotovimo potrebno torno silo preko radialno pomičnih uteži s tornimi oblogami. Te uteži so vstavljene v utore po obodu, katere zaradi centrifugalne sile pritiskajo na obod gnanega dela in ustvarjajo torne razmere. Druga vrsta sklopke pa je sklopka s kroglicami, kjer zagotovimo torno silo preko kroglic, ki se zaradi vrtenja postavijo po obodu sklopke. S spreminjanjem števila kroglic spreminjamo velikost centrifugalne sile in s tem velikost torne sile.



Slika 1: Sestavna skica zagonske sklopke

3. Opis preizkuševališča in potek preizkusa



Slika 2: Shema preskuševališča z merilno verigo

- 1 - Inkrementalni dajalnik impulzov
- 2 - Inkrementalni dajalnik impulzov
- 3 - Merilni lističi vezani v vidstonov mostiček
- 4 - Merilni lističi vezani v vidstonov mostiček
- 5 - Elektromotor
- 6 - Odgonski boben (jermenica)
- 7 - Ploščati jermen
- 8 - Vležajene gredi
- 9 - Usmerniška enota
- 10 - Diskasta zavora
- 11 - Odjemna glava
- 12 - Vztrajnik
- 13 - Ojačevalnik
- 14 - A/D pretvornik
- 15 - Kartica (digitalni števec)
- 16 – Osebni računalnik z programsko opremo LabView

3.1 Potek preizkusa

Zagonska sklopka KOVINOPLAST je montirana na os elektromotorja in pravzaprav predstavlja jermenico, ki preko jermena prenaša moment na gred z vztrajnikom in diskasto zavoro s prestavo i. Število vrtljajev motorja in sklopke merimo s pomočjo inkrementalnih dajalnikov impulzov (1) in (2). Digitalni signal se od inkrementalnih dajalnikov impulzov direktno vodi do kartice (15) s števcem digitalnih signalov, kjer merimo število impulzov na določeni časovni interval in tako dobimo vrtilno frekvenco. Na merilnem mestu (3) z merilnimi lističi merimo koristen navor, na mestu (4) pa celoten navor. Preko odjemne glave na poziciji (11) in merilne verige peljemo signale iz merilnih mest na osebni računalnik – karica (14), kjer jih s pomočjo računalniškega programa LabView obdelamo.

Vključili smo elektromotor, po 1.35sec je dosegel maksimalno število obratov, da se je v sklopki na kladicah pojavila dovolj velika centrifugalna sila jih potisnila ob odgonski boben (bombirano jermenico). Ploščati jermen, ki prenaša vrtilno hitrost in moment iz sklopke na vztrajnik in simulator obremenitve (avtomobilska diskasta zavora).

Koristen in celoten navor merimo z merilnimi lističi. Merilnim lističem se zaradi spremembe dolžine spreminja upornost, ta pojav pa uporabimo za merjenje zasuka gredi in s tem posredno tudi vrtilnega momenta. V primeru torzijsko obremenjene gredi se v gredi pojavijo tangencialne napetosti, katere povzročajo pojav normalnih napetosti pod kotom 45° glede na smer momenta. V ta namen nalepimo lističe po obodu pod 45° . Preko odjemne glave in merilne verige peljemo signale iz merilnih mest na osebni računalnik, kjer jih s pomočjo računalniškega programa obdelamo.

Na preskuševališču merimo:

- čas
- vrtljaje sklopke (na sklopki z optičnim senzorjem)
- vrtljaje elektromotorja
- moment ki ga sklopka prenaša (pred vztrajnikom na gredi z merilnimi lističi).
- moment sklopke (na gredi za vztrajnikom z merilnimi lističi).
- temperaturo pred zagonom sklopke
- temperaturo po zagonu sklopke

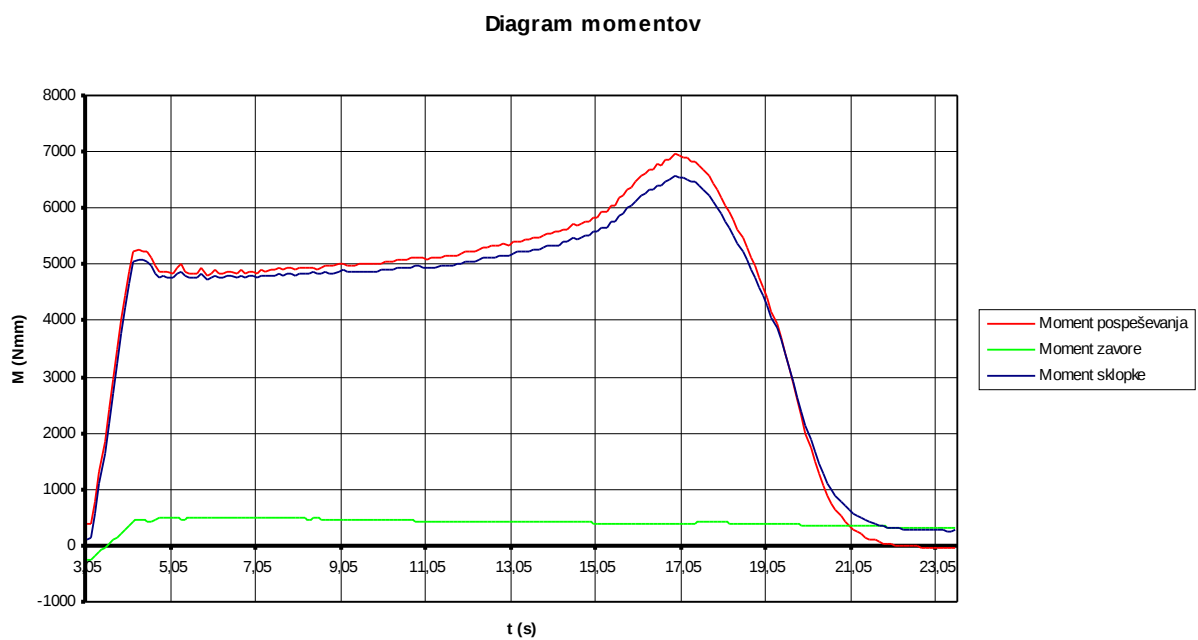
4. Rezultati in vrednotenje rezultatov

4.1 Diagram momentov in kotnih hitrosti

4.1.1 Diagram momentov

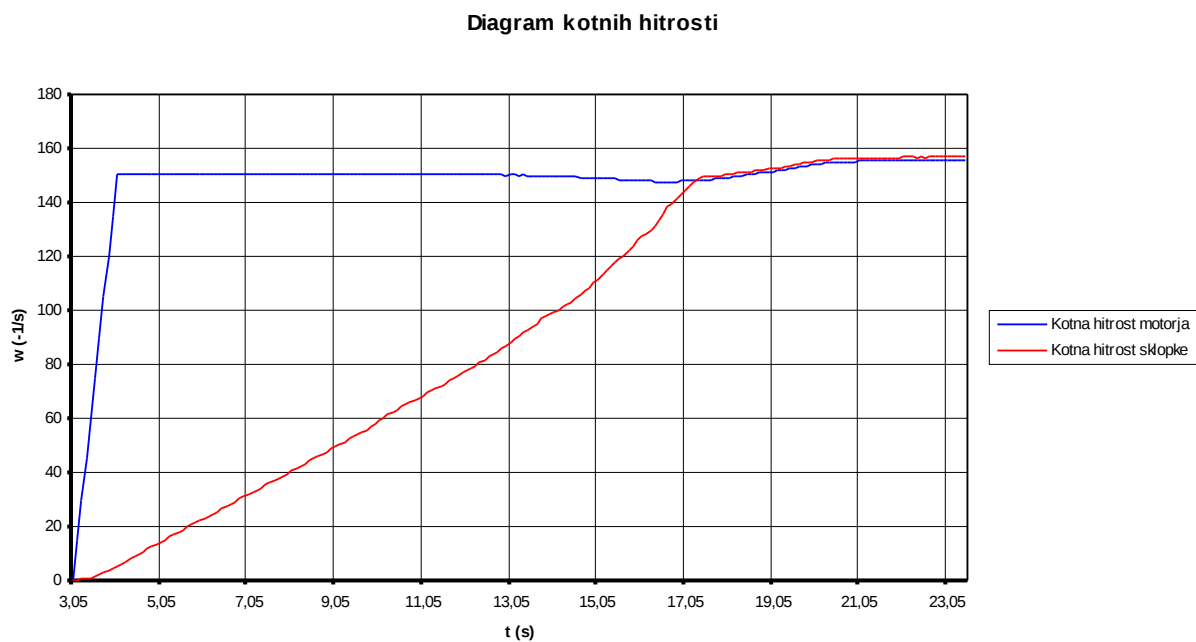
Na sliki 3 so prikazana spreminjanja momenta sklopke M_{skl} , koristnega momenta (momenta zavore) M_{kor} ter momenta pospeševanja M_{pos} v odvisnosti od časa.

$$M_{pos}(t) = M_{skl}(t) - M_{kor}(t) \quad (1)$$



Slika 3: Diagram vrtilnih momentov $M_{skl}(t)$, $M_{kor}(t)$, $M_{pos}(t)$

4.1.2 Diagram kotnih hitrosti

Slika 4: Diagram kotnih hitrosti $\omega_{skl}(t)$, $\omega_{EM}(t)$

4.2 Zdrs, moč trenja in moč pospeševanja

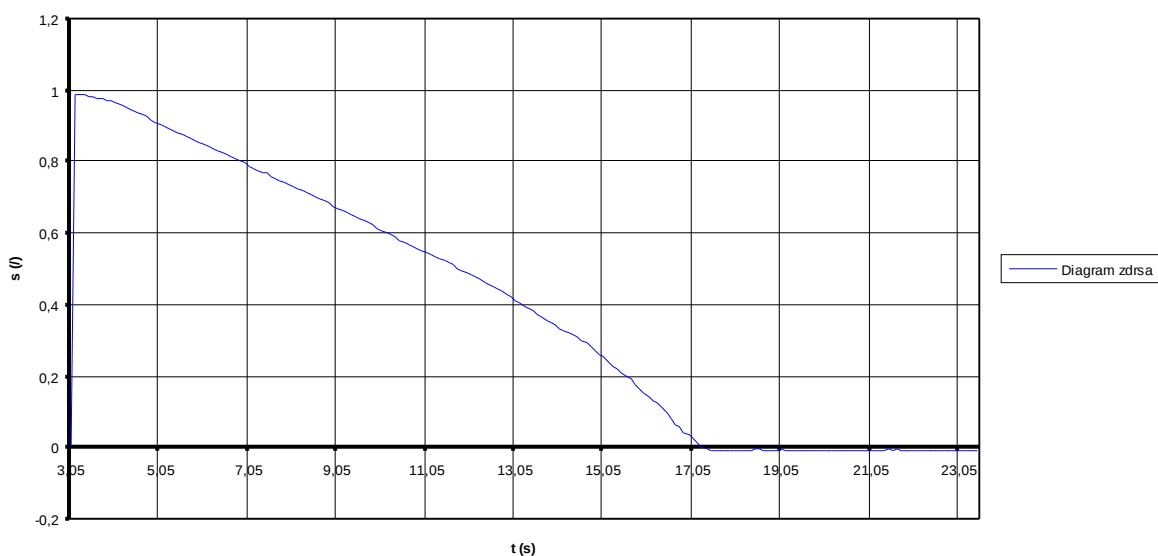
4.2.1 Zdrs

Zdrs je definiran kot relativna normirana razlika med n_{em} in n_{skl} :

$$S = \frac{\omega_{mot} - \omega_{skl}}{\omega_{mot}} = \frac{n_{mot} - n_{skl}}{n_{mot}} = \frac{1434 - 49,2}{1434} = 0,966 \quad (2)$$

$n_{mot}=1434 \text{ min}^{-1}$; $n_{skl}= 49,2 \text{ min}^{-1}$ podatka iz meritev

Diagram zdrs



Slika 5: Digram zdrs S(t)

4.2.2 Moč trenja in moč pospeševanja

Moč trenja:

$$P_{tr} = M_{tr} \cdot (\omega_{em} - \omega_{skl}) \quad (3)$$

$$M_{tr,dej} = M_{skl,dej} \rightarrow M_{skl,dej} = M_{skl,izm} / i = 52,078 / 0,893 = 58,31 \text{ Nm}$$

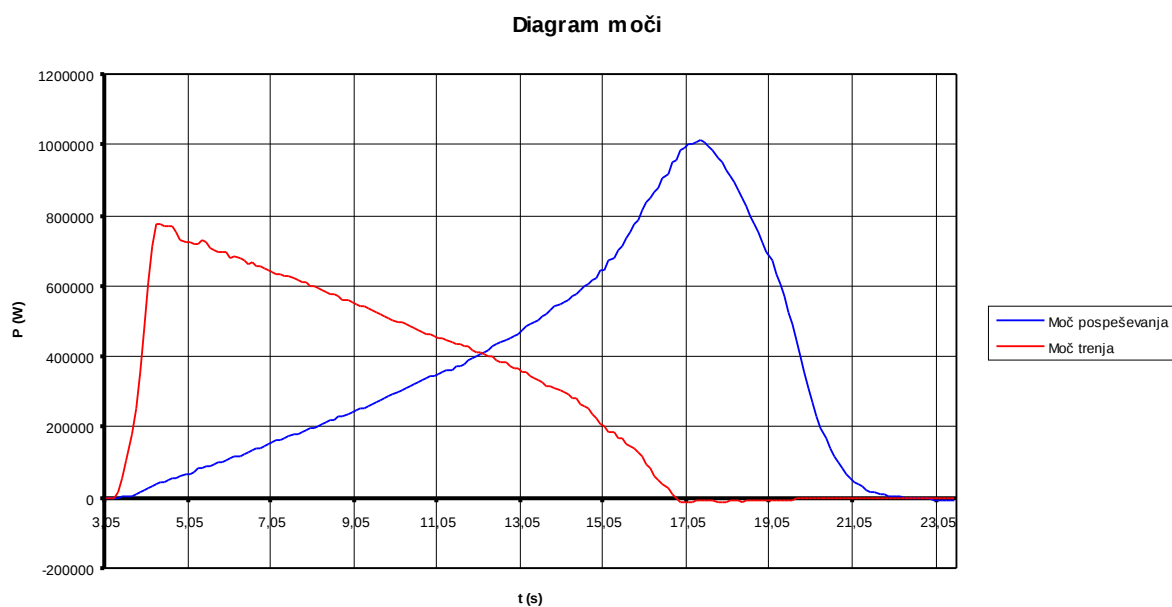
$$\omega_{mot} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{mot}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1434 \text{ min}^{-1}}{60} = 150,17 \text{ s}^{-1}$$

$$\omega_{skl} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{skl}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 49,2 \text{ min}^{-1}}{60} = 5,15 \text{ s}^{-1}$$

$$P_{tr} = 58,31 \cdot (150,17 - 5,15) = 8456,11 \text{ W}$$

Moč pospeševanja:

$$P_{pos} = M_{pos} \cdot \omega_{skl}$$



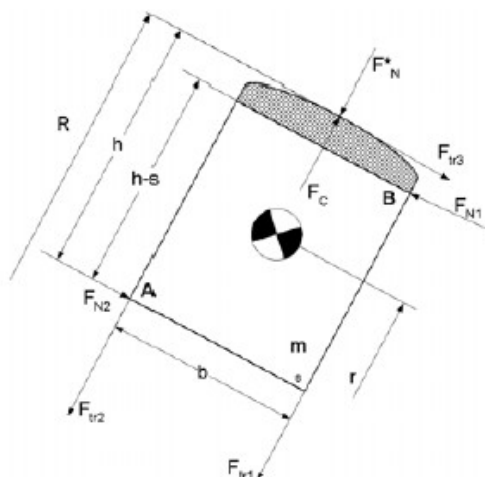
Slika 6: Diagram moči trenja $P_{tr}(t)$ in moči pospeševanja $P_{pos}(t)$

4.3 Koeficient trenja

Pri fizikalnem modelu predpostavimo, da se kladica premika proti zunanjemu obroču sklopke.

Model prikazuje slika 9.

Model 1:



Slika 7: Fizikalni model za kladico sklopke

$$\sum F_{ix} = 0; F_c - F_N^* - F_{tr1} - F_{tr2} = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_{iy} = 0; F_{N1} - F_{N2} - F_{tr3} = 0 \quad (5)$$

$$\sum M_{iA} = 0; F_{tr3} \cdot h + F_{tr1} \cdot b - F_{N1} \cdot (h - s) + F_N^* \cdot \frac{b}{2} - F_c \cdot \frac{b}{2} = 0 \quad (6)$$

$$F_{tr1} = F_{N1} \cdot \mu_b \quad (7)$$

$$F_{tr2} = F_{N2} \cdot \mu_b \quad (8)$$

$$F_{tr3} = F_N^* \cdot \mu_{sp} \quad (9)$$

$$F_c = m_u \cdot \omega_{em}^2 \cdot r \quad (10)$$

$$M_{tr} = F_N^* \cdot \mu_{sp} \cdot R \cdot n_u \qquad M_{tr} = M_{skl}' = M_{skl} \cdot \frac{d_1}{d_2} \qquad (11)$$

$$\begin{aligned} F_N^* \cdot \mu_{sp} \cdot h - F_{N1} \cdot (h - s) + F_{N1} \cdot \mu_b \cdot b - F_C \cdot \frac{b}{2} + F_N^* \cdot \frac{b}{2} &= 0 \\ F_{N1} - F_{N2} - F_N^* \cdot \mu_{sp} &= 0 \\ -F_N^* + F_C - F_{N1} \cdot \mu_b - F_{N2} \cdot \mu_b &= 0 \end{aligned} \qquad (12)$$

$$\begin{aligned} F_{N1} \cdot \mu_b + F_{N2} \cdot \mu_b + F_N^* &= F_C \\ F_{N1} - F_{N2} - F_N^* \cdot \mu_{sp} &= 0 \\ F_{N1}(\mu_b \cdot b - h + s) + F_N^* \left(\mu_{sp} \cdot h + \frac{b}{2}\right) &= F_C \cdot \frac{b}{2} \end{aligned} \qquad (13)$$

$$[A] \cdot [B] = [C] \qquad (14)$$

$$F_N^* = \frac{\det A_3}{\det A} \qquad (15)$$

$$\begin{array}{ccc|ccc}
 \mu_b & & & F_{N1} & & F_C \\
 & & & & & \\
 1 & & & F_{N2} & & 0 \\
 & & & & & \\
 \mu_b \cdot b - h + s & & 0 & F_N & & F_C \\
 & & & & & \\
 & & & & &
 \end{array}
 \quad (16)$$

$$\det A = \mu_b \left(-1 \left(\mu_{sp} \cdot h + \frac{b}{2} \right) \right) - \mu_b \left(\left(\mu_{sp} \cdot h + \frac{b}{2} \right) + \left(\mu_{sp} (\mu_b \cdot b - h + s) \right) \right) + (\mu_b \cdot b - h + s)$$

$$\det A = -\mu_b \cdot \mu_{sp} \cdot h - \mu_b \cdot \frac{b}{2} - \mu_{sp} \cdot \mu_b \cdot h - \mu_b \cdot \frac{b}{2} - \mu_b \cdot \mu_{sp} (\mu_b \cdot b - h + s) + (\mu_b \cdot b - h + s)$$

$$\det A = -2\mu_b \cdot \mu_{sp} \cdot h - \mu_b \cdot \mu_{sp} (\mu_b \cdot b - h + s) + (h - s)$$

$$\det A = \mu_b \cdot \mu_{sp} (2h + \mu_b \cdot b - h + s) - h + s = -\mu_b \cdot \mu_{sp} (h + s + \mu_b \cdot b) - (h + s)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \mu_b & \mu_b & F_{N1} \\ 1 & -1 & 0 \\ \mu_b \cdot b - h + s & 0 & F_C \cdot b/2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\det A_3 = \mu_b(-1)F_C \cdot \frac{b}{2} - \mu_b \cdot F_C \frac{b}{2} - 0 + F_C(\mu_b \cdot b - h + s)$$

$$\det A_3 = F_C(-h + s) \quad (18)$$

$$F_N^* = \frac{\det A_3}{\det A} = \frac{F_C(s-h)}{-\mu_b \cdot \mu_{sp}(h+s+\mu_b \cdot b) - (h+s)} =$$

$$M_{tr} = F_N^* \cdot R \cdot \mu_{sp} \cdot n_u$$

$$F_N^* = \frac{M_{tr}}{R \cdot \mu_{sp} \cdot n_u}$$

$$\frac{F_C(s-h)}{-\mu_b \cdot \mu_{sp}(h+s+\mu_b \cdot b) - (h+s)} = \frac{M_{tr}}{R \cdot \mu_{sp} \cdot n_u} \quad (19)$$

$$\frac{F_C(h-s)R \cdot \mu_{sp} \cdot n_u}{M_{tr}} = -\mu_b \cdot \mu_{sp}(h+s+\mu_b \cdot b) - (h+s)$$

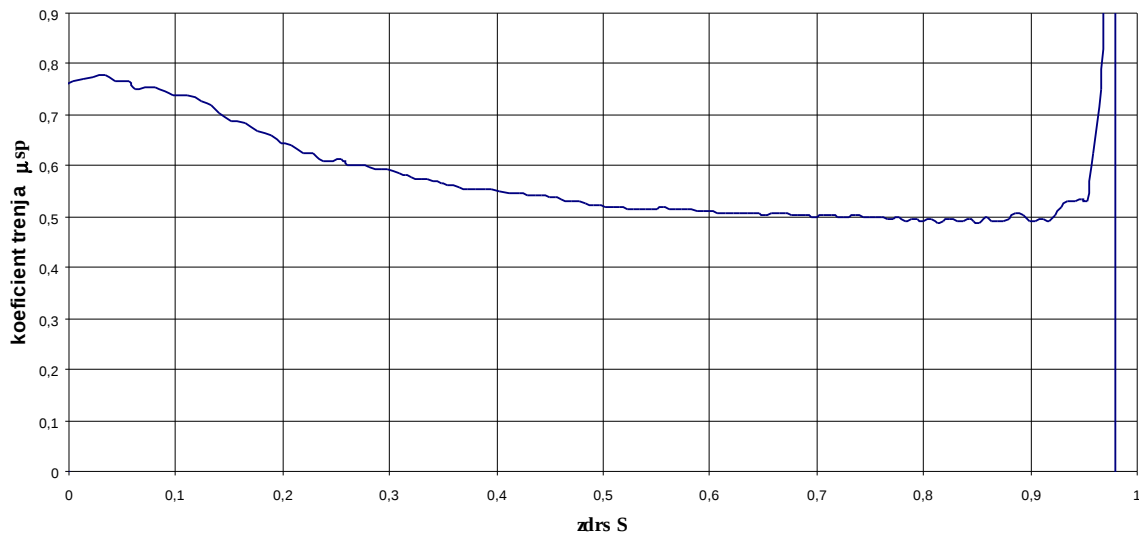
$$\frac{-F_C(h-s)R \cdot \mu_{sp} \cdot n_u}{M_{tr}} + \mu_b \cdot \mu_{sp}(h+s+\mu_b \cdot b) = -(h+s)$$

$$\mu_{sp} \left(\frac{F_C(h-s)R \cdot n_u}{M_{tr}} - \mu_b(h+s+\mu_b \cdot b) \right) = h-s \quad (20)$$

Z enačbo 21 izračunamo koeficient trenja:

$$\mu_{sp} = \left(\frac{h-s}{\frac{F_C(h-s)R \cdot n_u}{M_{tr}} - \mu_b(h+s+\mu_b \cdot b)} \right) \quad (21)$$

Diagram koeficienta trenja



Slika 8: Diagram koeficienta trenja kot funkcija zdrsa

4.4 Delo trenja in delo pospeševanja

Delo trenja je definirano kot integral moči trenja v času zagona:

$$W_{tr} = \int_0^{t_z} P_{tr}(t) dt \quad (22)$$

Izračunamo pa ga lahko tudi po trapezni formuli.

$$W_{tr} = \sum_{i=1}^n (t_{i+1} - t_i) \cdot \frac{P_{tr,i} + P_{tr,i+1}}{2} = (4,05 - 4,15) \cdot \frac{8456,11 + 9134,09}{2} = 879,51 J$$

Delo pospeševanja:

$$W_{pos} = \int_0^{t_z} P_{pos}(t) dt \quad (23)$$

4.5 Vztrajnostni moment pospeševanih mas

Sprememba kinetične energije sistema:

$$W_{pos} = W_K = \frac{1}{2} \cdot J_{cel} \cdot \omega_m^2 \quad (24)$$

$$\omega_m = \frac{1}{t_z} \cdot \int_0^{t_z} \omega_{skl}'(t) dt = 114,3s^{-1} \quad (25)$$

Vztrajnostni momenti rotirajočih mas

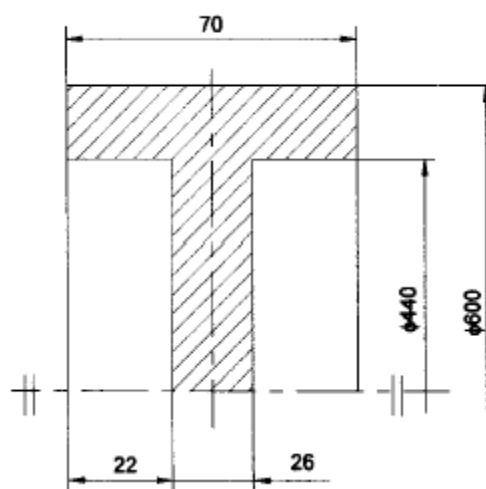
$$J_{cel} = J_{vzt} + J_{rot} = 5,7 + 7,6 = 13,3 \text{ kgm}^2 \quad (26)$$

$$J_{vzt} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{\pi}{32} \cdot d^4 \cdot h \cdot \rho = \quad (27)$$

$$= \frac{\pi}{32} \cdot 0,6^4 \cdot 0,07 \cdot 7850 - 2 \cdot \left(\frac{\pi}{32} \cdot 0,44^4 \cdot 0,022 \cdot 7850 \right) = 5,7 \text{ kgm}^2$$

$$J_{rot} = J_{cel} - J_{vzt} = \quad (28)$$

$$= \frac{2 \cdot W_{pos}}{\omega_m^2} - J_{vzt} = \frac{2 \cdot 87185}{(114,3)^2} - 5,7 = 7,6 \text{ kgm}^2$$



Slika 7: Dimenzije vztrajnika

4.6 Toplotni preračun sklopke

Namen toplotnega preračuna je izračun maksimalne teoretične temperature sklopke pri zagonu in času, ki je potreben, da se sklopka ohladi na temperaturo, ki je 5°C višja od temperature okolice.

Potek temperatura pri zagonu prikazuje slika 8.

$$W_{tr, cel} = Q = m \cdot c \cdot (\vartheta_{max} - \vartheta_{ok}) \Rightarrow \vartheta_{max} = \vartheta_{ok} + \frac{W_{tr, cel}}{m \cdot c}$$

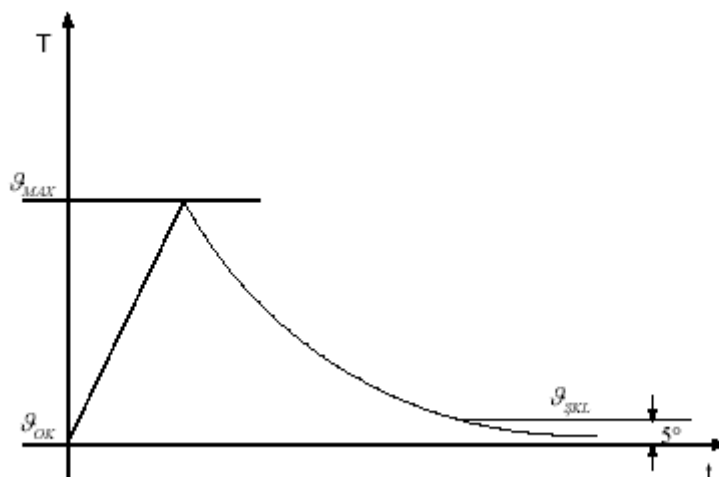
$$\vartheta_{ok} = 23^{\circ}\text{C} = 296\text{K}$$

$$\vartheta_{pred} = 34,3^{\circ}\text{C} = 307,3\text{K}$$

$$\vartheta_{max} = 43,4^{\circ}\text{C} = 316,4\text{K}$$

$$W_{tr, cel} = Q = m \cdot c \cdot (\vartheta_{max} - \vartheta_{ok}) \Rightarrow \vartheta_{max} = \vartheta_{ok} + \frac{W_{tr, cel}}{m \cdot c}$$

$$\vartheta_{max} = 296 + \frac{879,51}{0,49 \cdot 4,9} = \text{K} \Rightarrow 54,1^{\circ}\text{C}$$



Slika 8: Diagram temperature

5. Zaključek

Po teoretični razlagi delovanja sklopke ter predstavitvijo merilnega sistema (merjeni podatki) smo zagnali elektromotor. Delovanje sklopke je bilo takoj opaziti, motor se je vrtel z veliko večjimi vrtljaji kot sklopka, jermen in vztrajnik. V nekaj sekundah sta se elektromotor in sklopka vrtela z istimi vrtljaji. Sledilo je izklop elektromotorja ter prisilno zaviranje vztrajnika zaradi njegove velike vztrajnostne mase.

Pri merjenju temperature plašča sklopke je prišlo do odstopanja, ker se toplota širi tudi po gredi ne le v plašč sklopke.

Vrtljaji elektromotorja so pri izračunih konstantni (1480 min^{-1}), dejansko pa malo nihajo, zato nekateri izračuni niso čisto natančni.

Pri obdelavi podatkov sem na začetku odrezal približno 25 podatkov ker smo čas začeli meriti pred zagonom elektromotorja.

6.Literatura

[1] Vili Malnarič, Miha Janežič: **Zagonska sklopka**; Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 2005

[2] Bojan Kraut: **Krautov strojniški priročnik**; Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1998