



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH SETRVAČNÍKU JEDNOVZPĚRNÉHO
ČELIŠTOVÉHO DRTIČE

DESIGN OF FLYWHEEL OF JAW CRUSHER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Karel Horký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miroslav Škopán, Csc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Karel Horký
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh setrvačnicku jednovzpěrného čelistového drtiče

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a výpočet velikosti setrvačnicku jednovzpěrného čelistového drtiče DCJ 900 x 600 mm, určeného pro mobilní recyklační linku. Stanovení možné úspory hmotnosti při zvýšení otáček drtiče. Jmenovité otáčky 1450 ot/min.

Cíle diplomové práce:

Přehled metod pro výpočet velikosti setrvačnicků pracovních strojů.

Výpočet velikosti setrvačnicku.

Konstrukční návrh tvaru setrvačnicku.

Analýza změny velikosti setrvačnicku pro zvýšené pracovní otáčky.

Výkres setrvačnicku.

Seznam doporučené literatury:

ŠKOPÁN, Miroslav. Aplikovaná mechanika stavebních a transportních strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. [cit. 1. 10. 2018]. Dostupné z <https://www.vutbr.cz/studis/student.phtml>.

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-2-4-2629-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem setrvačnicku a řemenice jednovzpěrného čelistového drtiče DCJ 900x600. První kapitola je věnována přehledu metod pro výpočet velikosti setrvačnicků pracovních strojů. Druhá kapitola je zaměřena na výpočet velikosti setrvačnicku. Třetí kapitola pojednává o konstrukčním návrhu setrvačnicku. V posledních dvou kapitolách je vypracována analýza změny velikosti setrvačnicku v závislosti na navýšení pracovních otáček a změně součinitele δ .

KLÍČOVÁ SLOVA

Jednovzpěrný čelistový drtič, setrvačnick, řemenice, Wittenbauerova metoda, kinematické schéma, setrvačná síla, rovnovážný moment, výkresová dokumentace

ABSTRACT

Diploma thesis deals with design of a flywheel and a belt pulley of single toggle jaw crusher DCJ 900x600. The first part is dedicated to overview of the methods for calculation of a size of flywheels for working machines. The second part is focused on calculation of a size of the flywheel. The third part treats the constructional design of the flywheel. In the last two parts there is elaborated analysis of a changing size of the flywheel depended on increasing the working rotation speed and change of coefficient δ .

KEYWORDS

Single toggle jaw crusher, flywheel, belt pulley, Wittenbauer's method, kinematics scheme, inertia force, equilibrium moment of a force, drawing documentation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORKÝ, Karel. Návrh setrvačnicku jednovzpěrného čelistového drtiče. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116312>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav Škopán.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Škopána, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Karel Horký

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji svému vedoucímu práce doc. Ing. Miroslavu Škopánovi, CSc. za rady a ochotu při tvorbě této práce.

Děkuji své rodině za poskytnutou materiální a psychickou podporu. Taktéž děkuji všem, kteří mě v průběhu studia podporovali a pomáhali mi.

OBSAH

Úvod	9
1 Metody návrhu a výpočtu setrvačníků.....	10
1.1 Návrh setrvačnicku podle pohybové rovnice.....	10
1.2 Wittenbauerova graficko-analytická metoda	14
2 Výpočet velikosti setrvačnicku	17
2.1 Určení velikosti ekvivalentních momentů a rovnovážných momentů.....	18
2.2 Určení křivky průběhu práce grafickou integrací	117
2.3 Vynesení výsledného grafu a určení velikosti momentu setrvačnosti	118
3 Konstrukční návrh tvaru setrvačnicku.....	121
3.1 Návrh řememice.....	121
3.2 Návrh setrvačnicku	122
4 Analýza změny velikosti setrvačnicku pro zvýšené pracovní otáčky	123
5 Analýza změny velikosti setrvačnicku při změně nerovnoměrnosti chodu	132
Závěr.....	135
Seznam použitých zdrojů.....	136
Seznam použitých zkratk a symbolů	137
Seznam příloh.....	139

ÚVOD

U nerostných surovin je stejně důležitou otázkou jejich těžba jako zpracování a úprava. Těžba a získání surovin je pouze prvním krokem k získání jejich finálních tvarů a rozměrů. Požadované rozměry lze získat mechanickým rozpojováním surovin. Mezi základní druhy mechanického rozpojování patří drcení a mletí. Tyto dvě operace nejsou od sebe rozlišeny principiálně, ale velikostí výsledných zrn materiálu. Mletím se získávají materiály s menším průměrem zrna, než drcením. Mezní rozměr průměru zrna mezi drcením a mletím je 1,25 mm. Základními druhy drtičů jsou drtiče čelist'ové, kuželové, dynamické (úderové), zubové a válcové. Drtiče čelist'ové dále dělíme na jednovzpěrné, dvouvzpěrné, kuželočelist'ové a zdvojené.

Základními konstrukčními prvky jednovzpěrného čelist'ového drtiče jsou čelisti – pevná a pohyblivá, tyto čelisti jsou rýhované a vyrobeny z legovaných ocelí, protože jsou určeny pro přímý kontakt s drceným materiálem. Na frémě (rámu) drtiče je umístěna výstředníková hřídel, na které kyvadlo koná společně s pohyblivou čelistí složený kývavý pohyb a posuvný pohyb vůči pevné čelisti. Složený kývavý a posuvný pohyb kyvadla s pohyblivou čelistí je způsoben otáčením výstředníkové hřídele. Na výstředníkové hřídeli jsou upnuty setrvačnický a řemenice, která je spojena řemenovým převodem s hnacím elektromotorem. Setrvačnický slouží jako akumulátor kinetické energie. [7]

Cílem diplomové práce je vypracování přehledu metod pro výpočet velikosti setrvačnicků pracovních strojů. Dále je práce zaměřena na výpočet velikosti setrvačnicku, jeho konstrukční návrh a výkresy. Součástí práce je také vypracování analýzy změny velikosti setrvačnicku pro zvýšené pracovní otáčky. Návrh se provádí vzhledem k možné úspoře hmotnosti setrvačnicku, zmenšení jeho rozměrů, a tím pádem i případné ekonomické úspoře.

1 METODY NÁVRHU A VÝPOČTU SETRVAČNÍKŮ

U jednovzpěrných čelistových drtičů, jako je DCJ 900x600, je setrvačnick upevněn na výstředníkovém hřídeli a spojen s řemenicí řemenovým převodem, přes který je poháněn elektromotorem. Správný návrh a výpočet setrvačnicku je důležitý především kvůli správnému fungování celého drtiče. Pokud je setrvačnick příliš malý, zvyšuje se nerovnoměrnost chodu zařízení. Pokud je naopak příliš velký, dochází k přetížení motoru a zvyšování nákladů na výrobu daného setrvačnicku. Setrvačnick slouží jako akumulátor kinetické energie. Při nárůstu úhlové rychlosti ω dochází k nahromadění mechanické energie, která je vydána při snižování úhlové rychlosti. [1]

1.1 NÁVRH SETRVAČNÍKU PODLE POHYBOVÉ ROVNICE STROJE

Pro strojní systémy s tzv. konstantním převodem platí, že kinetická energie soustavy je pouze funkcí čtverce rychlostí a potenciální energie funkcí čtverců souřadnic, tj. kinetická i potenciální energie jsou homogenními kvadratickými funkcemi buď rychlosti, nebo polohy. Skutečné strojní systémy jsou však složitější. Rychlost každého z členů mechanismu je závislá nejen na rychlosti hlavního členu, ale i na jeho poloze. Proto je třeba předpokládat, že v průběhu pohybu jednotlivých členů mechanismu se mění rozložení hmotnosti mechanismu jako celku vzhledem ke vztažnému členu. [1]

Dle literatury [1]:

$$\text{Platí: } m_e = m_e(x); \quad J_e = J_e(\varphi)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_e(x) \cdot x^2 \quad E_k = \frac{1}{2} \cdot J_e(\varphi) \cdot \varphi^2$$

Pro rotační člen dynamické soustavy:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J(\varphi) \cdot \varphi^2$$

Langrangeova rovnice druhého druhu:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta E_k}{\delta q_j} \right) - \frac{\delta E_k}{\delta q_j} + \frac{\delta W}{\delta q_j} + \frac{\delta E_p}{\delta q_j} = Q_j \quad (1)$$

kde: W...disipativní energie

Dosazení do levé strany Lagrangeovy rovnice druhého druhu:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta E_k}{\delta q_j} \right) = J'(\varphi) \cdot \varphi^2 + J(\varphi) \cdot \varphi \cdot \dot{\varphi}$$

$$\frac{\delta E_k}{\delta q_j} = \frac{1}{2} \cdot J'(\varphi) \cdot \varphi^2$$

$$\frac{\delta W}{\delta q_j} = 0$$

$$\frac{\delta E_p}{\delta q_j} = 0$$

Prvotní hnací síla $F(\varphi)$ překonává pracovní moment $M_R(\varphi)$, pak rovnici výkonu lze zapsat jako:

$$P = \left[F(\varphi) \cdot \frac{dx}{d\varphi} - M_R(\varphi) \right] \cdot \varphi \quad (2)$$

Výraz v hranaté závorce je ekvivalentní moment na hnacím hřídeli stroje:

$$M_e(\varphi) = F(\varphi) \cdot \frac{dx}{d\varphi} - M_R(\varphi) \quad (3)$$

Dosazením lze získat pohybovou rovnici stroje:

$$J'(\varphi) \cdot \varphi^2 + J(\varphi) \cdot \varphi'' - \frac{1}{2} \cdot J'(\varphi) \cdot \varphi^2 = \left[F(\varphi) \cdot \frac{dx}{d\varphi} - M_R(\varphi) \right] \cdot \varphi \quad (4)$$

Úpravou:

$$J(\varphi) \cdot \varphi'' + \frac{1}{2} \cdot J'(\varphi) \cdot \varphi^2 = M_e(\varphi)$$

Nerovnoměrnost chodu

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{stř}} \quad (5)$$

kde: $\omega_{min}, \omega_{max}$ je v průběhu 1 otáčky

$$\omega_{stř} = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} \quad (6)$$

Platí:

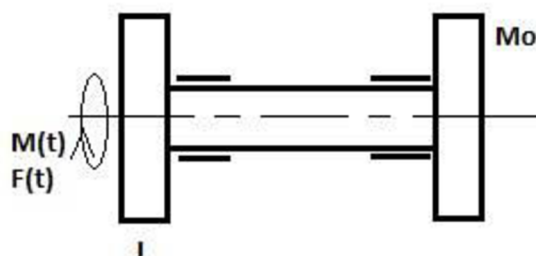
$$\omega_{max} = \omega_{min} \cdot \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) \quad (7)$$

$$\omega_{min} = \omega_{max} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (8)$$

$$\omega_{max}^2 = \omega_{stř}^2 \cdot \left(1 + \delta + \frac{\delta}{4} \right) \quad \text{Pro malá } \delta \ll 1 \quad (9)$$

$\delta \sim 0,05 \div 0,15$ pro pomaloběžné stroje

$\delta \sim 0,01$ pro rychloběžné stroje



Obr. 1 Výpočtový model setrvačníku [1]

Pohybová rovnice stroje:

$$J(\varphi) \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = F(\varphi) \cdot \frac{ds}{d\varphi} - M(\varphi) - \frac{1}{2} \cdot J'(\varphi) \cdot \varphi^2 \quad (10)$$

kde: $\frac{1}{2} \cdot J'(\varphi) \cdot \varphi^2$ je moment vzniklý změnou setrvačných sil

Oblast provozu se předpokládá za ustálený stav:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = 0$$

$$\varphi \cdot = konst. \approx \frac{d\varphi}{dt} = konst.$$

$$F(\varphi) \cdot \frac{dx}{d\varphi} - M(\varphi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{d\varphi} \cdot \left[J(\varphi) \cdot \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right] \quad (11)$$

Úpravou:

$$\frac{1}{2} \cdot [J(\varphi) \cdot \omega_{max}^2 - J(\varphi_0) \cdot \omega_{min}^2] = \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \left[F(\varphi) \cdot \frac{ds}{d\varphi} - M(\varphi) \right] d\varphi \quad (12)$$

kde: $\int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \left[F(\varphi) \cdot \frac{ds}{d\varphi} - M(\varphi) \right] d\varphi$ odpovídá práci momentu vnějších silových účinků na hřídel stroje

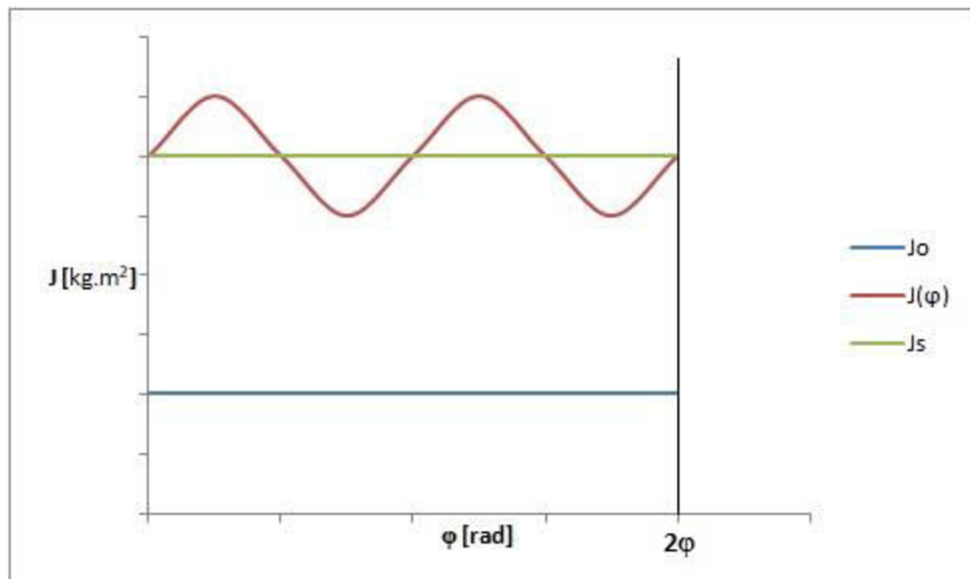
Moment setrvačnosti na hnacím hřídeli:

$$J(\varphi) = J_S + J_0 + J_1(\varphi) \quad (13)$$

kde: J_S moment setrvačnosti setrvačníku

J_0 moment setrvačnosti hřídele, motoru a dalších částí

$J_1(\varphi)$ proměnná část



Obr. 2 Graf průběhů momentu setrvačnosti [1]

Práce:

$$A = \frac{1}{2} \cdot [J_S + J_0 + J_1(\varphi_{\max})] \cdot \omega_{stř}^2 \cdot (1 + \delta) - \frac{1}{2} \cdot [J_S + J_0 + J_1(\varphi_{\min})] \cdot \omega_{stř}^2 \cdot (1 - \delta) \quad (14)$$

Z toho:

$$J_S = \frac{A}{\omega_{stř}^2 \cdot \delta} - J_0 - \frac{1}{2 \cdot \delta} \cdot [J_1(\varphi_{\max}) \cdot (1 + \delta) - J_1(\varphi_{\min}) \cdot (1 - \delta)] \quad (15)$$

Pro stroje s konstantním převodem platí:

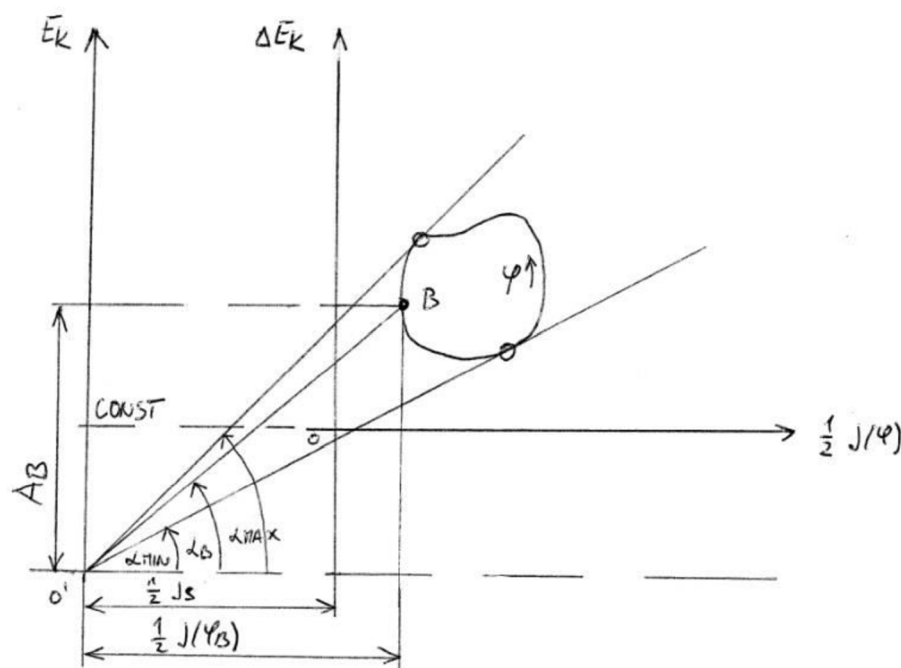
$$J_S = \frac{A}{\omega_{stř}^2 \cdot \delta} - J_0 \quad (16)$$

1.2 WITTENBAUEROVA GRAFICKO - ANALYTICKÁ METODA

Metoda Wittenbauerova je metodou graficko-analytickou. Výstupem metody jsou 4 grafy závislostí – průběhu rovnovážného momentu na natočení kliky, ekvivalentního momentu na natočení kliky, práce na klice vůči jejímu natočení a výsledný graf, do kterého je vynesena závislost práce na klice k ekvivalentnímu momentu setrvačnosti při stejném natočení kliky. Zjednodušením Wittenbauerovy metody je Rädingerova metoda, která se vztahuje na nižší počet poloh natočení kliky. [6]

Dle literatury [6]:

Podstatou Wittenbauerovy metody je sledování závislosti kinetické energie stroje vztažené na hlavní člen (např. klikovou hřídel) na změně rozložení hmotnosti k témuž členu. [6]



Obr. 3 Podstata Wittenbauerovy metody [6]

Pro libovolný bod B odpovídající určité poloze kliky hřídele stroje φ_B udává hodnotu celkové práce A_B všech sil působících na stroj totožnou s velikostí kinetické energie stroje v téže poloze φ_B (při odpovídajícím „redukovaném“ momentu setrvačnosti $J(\varphi_B)$).

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{A_B}{\frac{1}{2} \cdot J(\varphi_B)} = \omega_B^2 \quad (17)$$

V poloze „B“ poté platí:

$$A_B = \frac{1}{2} \cdot J(\varphi_B) \cdot \omega_B^2 \quad (18)$$

Úhlová rychlost kolísá v rozmezí ω_{min} , ω_{max}

$$tg \alpha_{max} = \omega_{max}^2 \quad (19)$$

$$tg \alpha_{min} = \omega_{min}^2 \quad (20)$$

$$\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2 = tg \alpha_{max} - tg \alpha_{min} \quad (21)$$

Graf je vyneseno v měřítku: energií - m_E

$$E_k = [E_k] \cdot m_E$$

momentu setrvačnosti - m_J $J(\varphi) = J(\varphi) \cdot m_J$

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot J(\varphi) \cdot \omega^2 \quad (22)$$

Z toho vyplývá:

$$\omega^2 = 2 \cdot \frac{[E_K] \cdot m_E}{[J(\varphi)] \cdot m_J} \quad (23)$$

Označíme:

$$\frac{[E_K]}{[J(\varphi)]} = [tg \alpha] = tg \varphi$$

Kde: α úhly v pomyslném grafu bez měřítek

$\varphi = [\alpha]$ úhly ve skutečném grafu ovlivněném měřítky

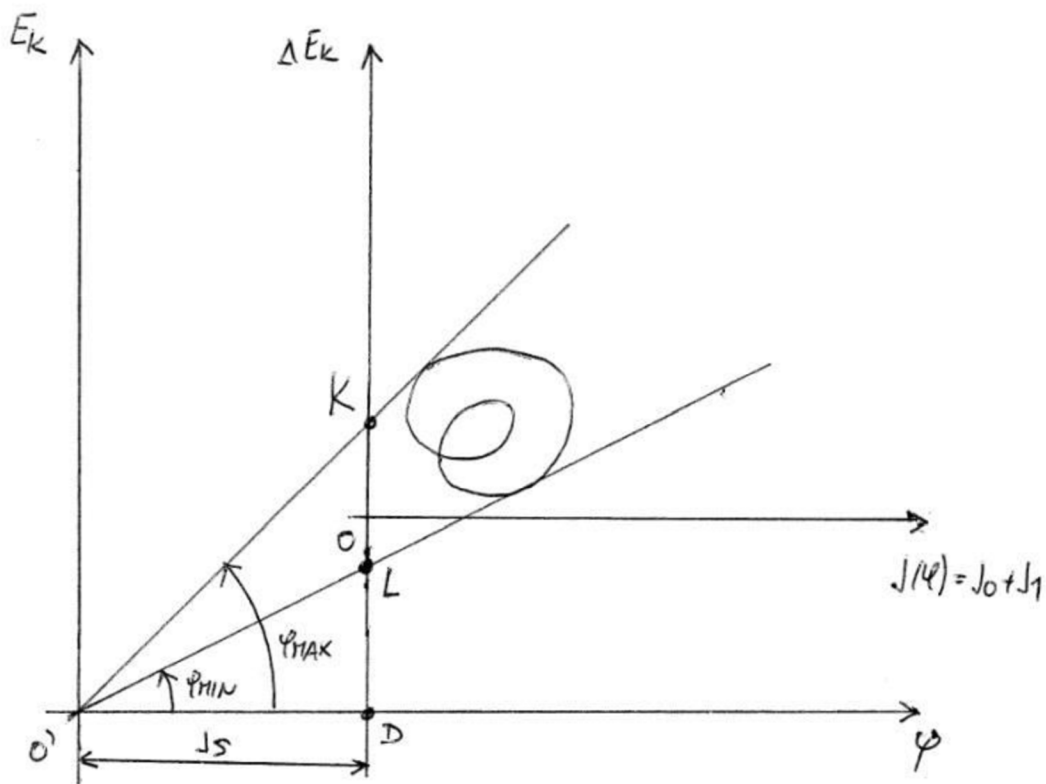
$$\omega^2 = 2 \cdot \frac{m_e}{m_j} \cdot tg \alpha \quad (24)$$

Z čehož vyplývá:

$$tg \varphi_{max} = \omega_{max}^2 \cdot \frac{m_J}{2 \cdot m_E} = \frac{m_J}{2 \cdot m_E} \cdot \omega_S^2 \cdot (1 + \delta) \quad (25)$$

$$tg \varphi_{min} = \omega_{min}^2 \cdot \frac{m_J}{2 \cdot m_E} = \frac{m_J}{2 \cdot m_E} \cdot \omega_S^2 \cdot (1 - \delta) \quad (26)$$

Ve skutečnosti však není znám počátek O' , proto se užívá tento postup:



Obr. 4 Skutečná podstata Wittenbauerovy metody [6]

Nejprve je zakreslena závislost $\Delta E_K = f[J(\varphi)]$ pro jednotlivé polohy kliky φ

Je známo, že:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{\overline{KD}}{\overline{O'D}} \quad (27)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\min} = \frac{\overline{LD}}{\overline{O'D}} \quad (28)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} - \operatorname{tg} \varphi_{\min} = \frac{m_J}{m_E} \cdot \omega_s^2 \cdot \delta \quad (29)$$

Z toho vyplývá:

$$\overline{KL} \cdot m_E \equiv A \quad (30)$$

$$\overline{O'D} \cdot m_J \equiv J_s \quad (31)$$

$$J_s = \frac{\overline{KL} \cdot m_E}{\omega_s^2 \cdot \delta} \quad (32)$$

2 VÝPOČET VELIKOSTI SETRVAČNÍKU

Výpočet velikosti setrvačnicku je proveden Wittenbauerovou graficko-analytickou metodou, která je v praxi často nahrazována metodami jednoduššími na provedení, ale tyto metody nejsou tak přesné jako metoda Wittenbauerova. Setrvačnick je navržen pro drtič DCJ 900x600 od společnosti RESTA s.r.o., která sídlí v Přerově. Tato společnost se zabývá problematikou recyklace stavebních odpadů a je jedním z největších českých výrobců a provozovatelů mobilních drtičů a třídících zařízení. [3]



Obr. 6 Jednovzpěrný čelistový drtič DCJ 900x600 [4]

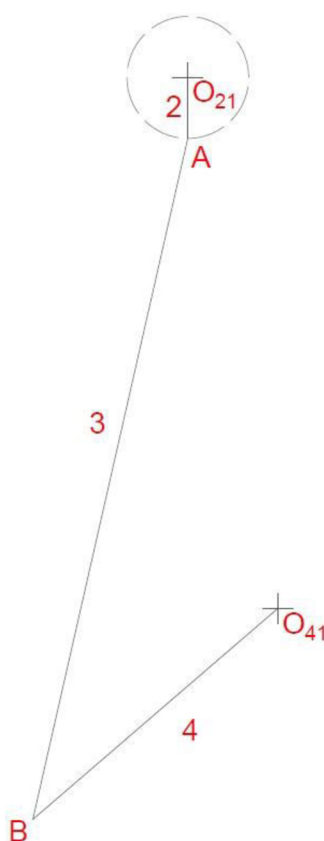
Tab. 1 Parametry jednovzpěrného čelistového drtiče DCJ 900x600 [4]

Vstupní otvor [mm]	Štěrbina [mm]	Maximální výkon [t/h]	Výkon el. motoru [kW]	Hmotnost [t]
900x600	40 - 170	210	75	10,5

2.1 URČENÍ EKVIVALENTNÍCH MOMENTŮ SETRVAČNOSTI A ROVNOVÁŽNÝCH MOMENTŮ

Základem Wittenbauerovy graficko-analytické metody je určení ekvivalentních momentů setrvačnosti a rovnovážných momentů v různých polohách natočení hnací hřídele, v tomto výpočtu je poloh celkem 25, tzn. po 15 úhlových stupních od 0° po 360° . Pro jednotlivá natočení hřídele je vždy vyneseno kinematické schéma a z něho jsou určeny rychlosti a zrychlení jednotlivých členů soustavy podle základních kinematických zákonitostí. Následně je určen ekvivalentní moment setrvačnosti pro danou polohu natočení a moment vnějších sil, který je vztažený na hnací hřídel. Moment je určen pomocí metody Žukovského páky. Při znalosti všech těchto rovnovážných momentů je vyneseno graf závislosti momentů na natočení klikové hřídele a taktéž graf závislosti ekvivalentních momentů setrvačnosti na natočení kliky.

Kinematické schéma jednovzpěrného čelistového drtiče



Obr. 7 Kinematické schéma jednovzpěrného čelistového drtiče pro natočení hřídele 0°

Kde: $r_2 = 100$ mm

poloměr hřídele

$l_3 = 1150$ mm

vzdálenost mezi osou otáčení pohyblivé čelisti a osou otáčení mezi pohyblivou čelistí a vzpěrnou deskou

$l_4 = 530 \text{ mm}$	délka vzpěrné desky
$C_3 = 555 \text{ mm}$	vzdálenost od bodu A k těžišti členu 3
$n = 275 \text{ min}^{-1}$	otáčky hřídele DCJ 900x600
O_{21}	osa otáčení hnací hřídele
A	osa otáčení mezi hřídelí a pohyblivou čelistí
B	osa otáčení mezi pohyblivou čelistí a vzpěrnou deskou
O_{41}	osa otáčení mezi deskou a jejím uložením

Při výpočtu je využito měřítko 1:5, tudíž:

$$r_2 = 20 \text{ mm}$$

$$l_3 = 230 \text{ mm}$$

$$l_4 = 106 \text{ mm}$$

$$c_3 = 111 \text{ mm}$$

Na obr. 7 je zobrazeno kinematické schéma jednovzpěrného čelistového drtiče v poloze natočení hřídele $0^\circ \sim 360^\circ$. Pro další pozice platí, že nárůst úhlu natočení hřídele je ve směru smyslu jeho otáčení, tzn. proti směru hodinových ručiček.

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele $0^\circ \sim 360^\circ$

Měřítko rychlostí:

$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost hřídele:

$$\omega_{21} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (33)$$

$$\omega_{21} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{275}{60} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost bodu A:

$$\overline{v}_A = \omega_{21} \cdot r_2 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (34)$$

$$\overline{v}_A = 28,798 \cdot 0,1 = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

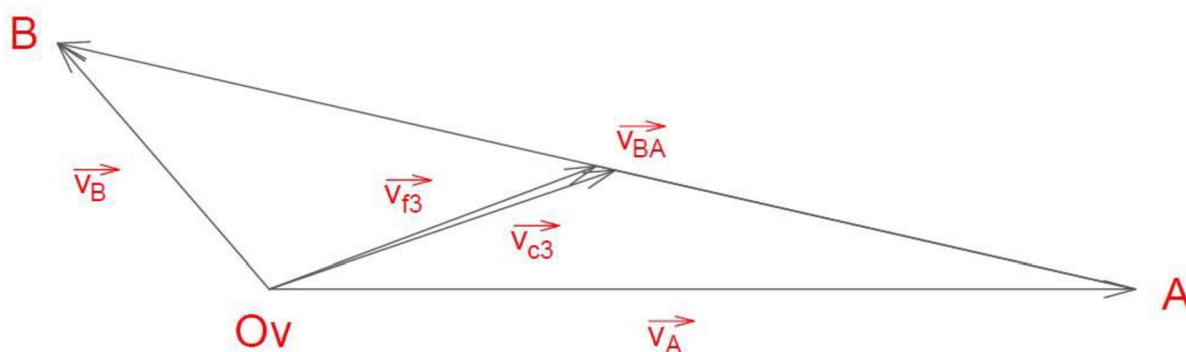
Rovnice rychlostí:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{BA} \quad (35)$$

Úhlová rychlost hřídele, rychlost bodu A a rovnice rychlostí je pro všechna natočení hřídele konstantní při nezměněných otáčkách hřídele, tj. $n = 275 \text{ min}^{-1}$.

Kde: v_B rychlost bodu B [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

v_{BA} rychlost bodu B okolo A [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]



Obr. 8 Schéma rychlostí pro natočení hřídele $0^\circ \sim 360^\circ$

$$v_{BA} = 3,65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 14,6 \text{ cm}$$

$$v_B = 1,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 4,2 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 1,225 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \approx 4,9 \text{ cm}$$

Kde: v_{c3} rychlost těžiště C_3 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}] \quad (36)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}] \quad (37)$$

$$a_B^n = \frac{1,05^2}{0,53} = 2,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (38)$$

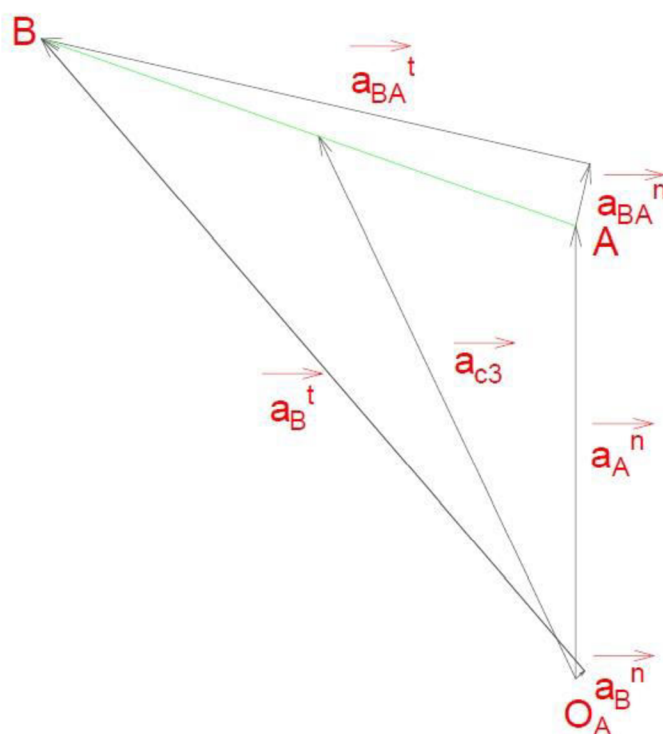
$$a_{BA}^n = \frac{3,65^2}{1,15} = 11,58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (39)$$

Kde: a_B^t tečné zrychlení bodu B [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

a_{BA}^t tečné zrychlení B okolo A [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]



Obr. 9 Schéma zrychlení pro natočení hřídele $0^\circ \sim 360^\circ$

$$a_{BA}^t = 101 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 10,1 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 108 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 10,8 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (40)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{1,05^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{1,225^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{2,5^2}{28,798^2} + 4,1 = 9,089 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 1,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \quad v_3 = v_{BA} = 3,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 1,225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \quad \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \quad \varphi = 0^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (41)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 0^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 0^\circ}} = 2,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \quad J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m_3 = 2061,87 \text{ kg}; \quad m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

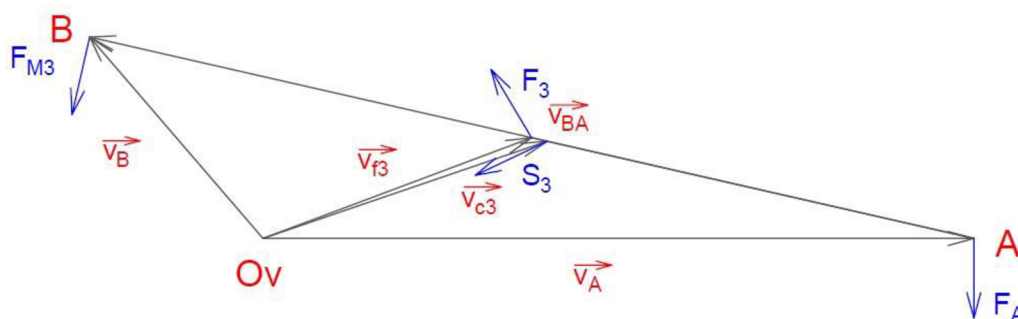
Kde: λ štíhlost [-]

ω_3 úhlová rychlost členu 3 [rad.s⁻¹]

J_2, J_3 moment setrvačnosti členů 2 a 3 [kg.m²]

m_3, m_4 hmotnost členů 3 a 4 [kg]

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 10 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 0°~360°s vynesením sil

Kde: S_3 setrvačná síla v těžišti členu 3 [N]

F_{M3} síla vzniklá rozložením setrvačného momentu [N]

F_A síla v bodě A [N]

F_3 rovnovážná síla působící v polovině členu 3 [N]

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (42)$$

Kde: $h_3 = 0,9 \text{ cm}$ kolmá vzdálenost nositelky síly S_3 od bodu O_V [cm]

$\widetilde{v}_{F3} = 4,5 \text{ cm}$ rychlost v působišti síly F_3 dosazená v jednotkách délky [cm]

\widetilde{v}_A rychlost bodu A dosazená v jednotkách délky [cm]

\widetilde{v}_{BA} rychlost bodu B okolo A dosazená v jednotkách délky [cm]

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \text{ [N]} \quad (43)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 108 = 222681,96 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (44)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{101}{1,15^2} = 12110,07 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} \text{ [N]} \quad (45)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128798} = 26043,48 \text{ N}$$

Kde: P výkon hnacího elektromotoru [W]

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 222681,96 \cdot 0,9 - 12110,07 \cdot 14,6}{4,5} = 71917,23 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 \text{ [Nm]} \quad (46)$$

$$M_3 = M_{rov} = 71917,23 \cdot 0,1 = 7191,72 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 15°

Měřitko rychlostí:

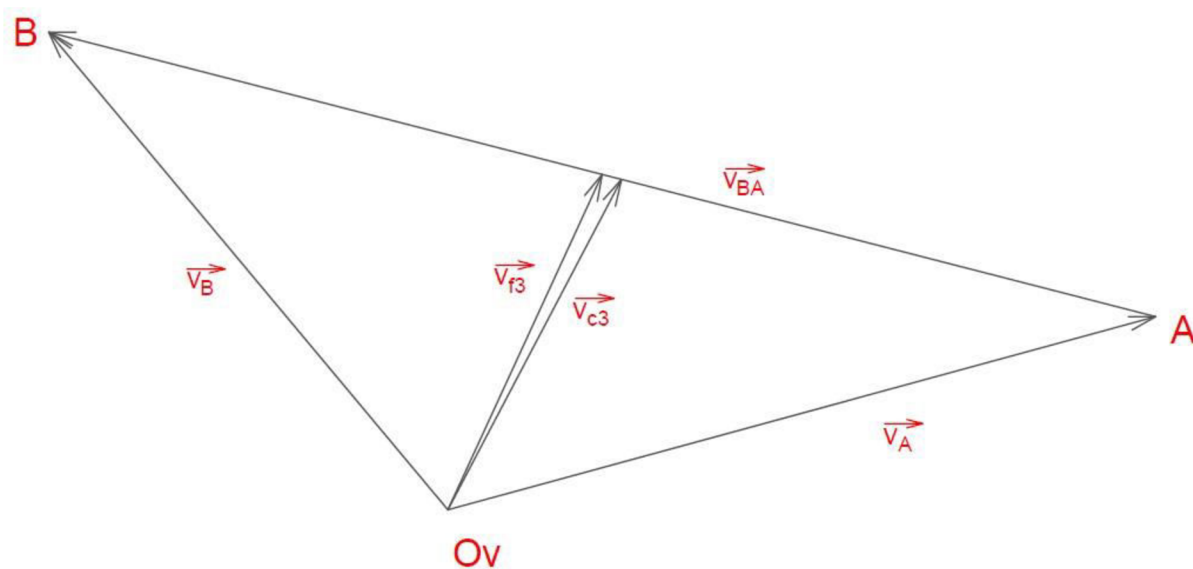
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{BA} \quad (47)$$



Obr. 11 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 15°

$$v_{BA} = 4,475 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 17,9 \text{ cm}$$

$$v_B = 2,375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 9,5 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 5,6 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (48)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \, m \cdot s^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (49)$$

$$a_B^n = \frac{2,375^2}{0,53} = 10,66 \, m \cdot s^{-2}$$

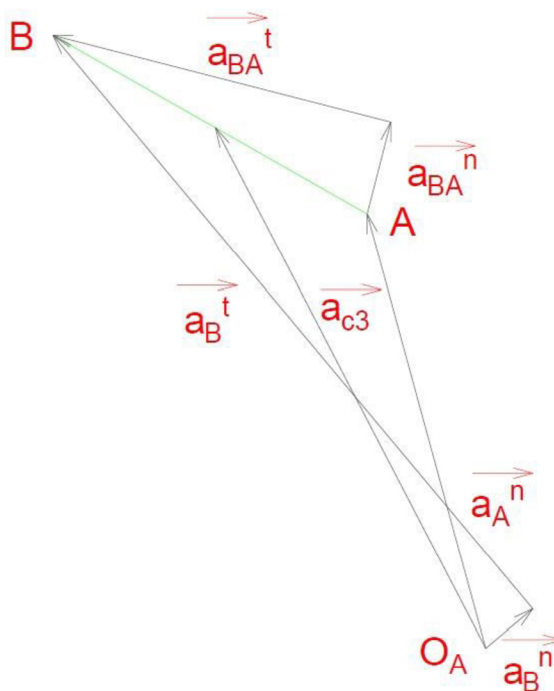
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (50)$$

$$a_{BA}^n = \frac{4,475^2}{1,15} = 17,41 \, m \cdot s^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (51)$$



Obr. 12 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 15°

$$a_{BA}^t = 64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 6,4 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 106 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 10,6 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (52)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{2,375^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{1,4^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{2,42^2}{28,798^2} + 4,1 = 10,416 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 2,375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 4,475 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 15^\circ$$

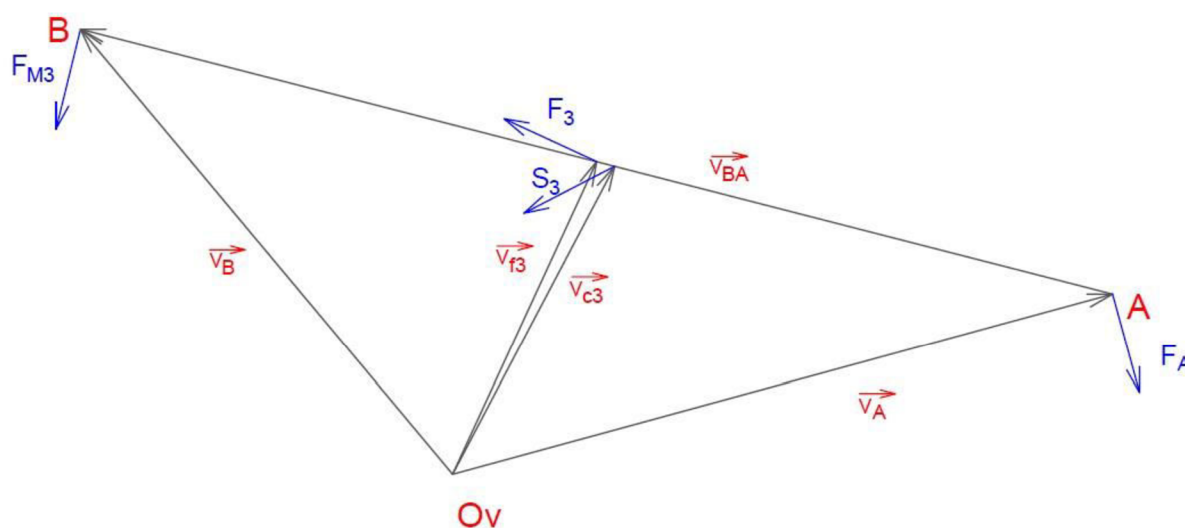
$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (53)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 15^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 15^\circ}} = 2,42 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 13 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 15° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F_3} = 0 \quad (54)$$

Kde: $h_3 = 3,1 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F_3} = 5,5 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C_3} [N] \quad (55)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 106 = 218558,22 \text{ N}$$

Síla F_{M_3} :

$$F_{M_3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (56)$$

$$F_{M_3} = 158,57 \cdot \frac{64}{1,15^2} = 7673,71 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (57)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,1 \cdot 28,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 218558,22 \cdot 3,1 - 7673,71 \cdot 17,9}{5,5} = -93612,55 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (58)$$

$$M_3 = M_{rov} = -93612,55 \cdot 0,1 = -9361,26 \text{ N}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 30°

Měřitko rychlostí:

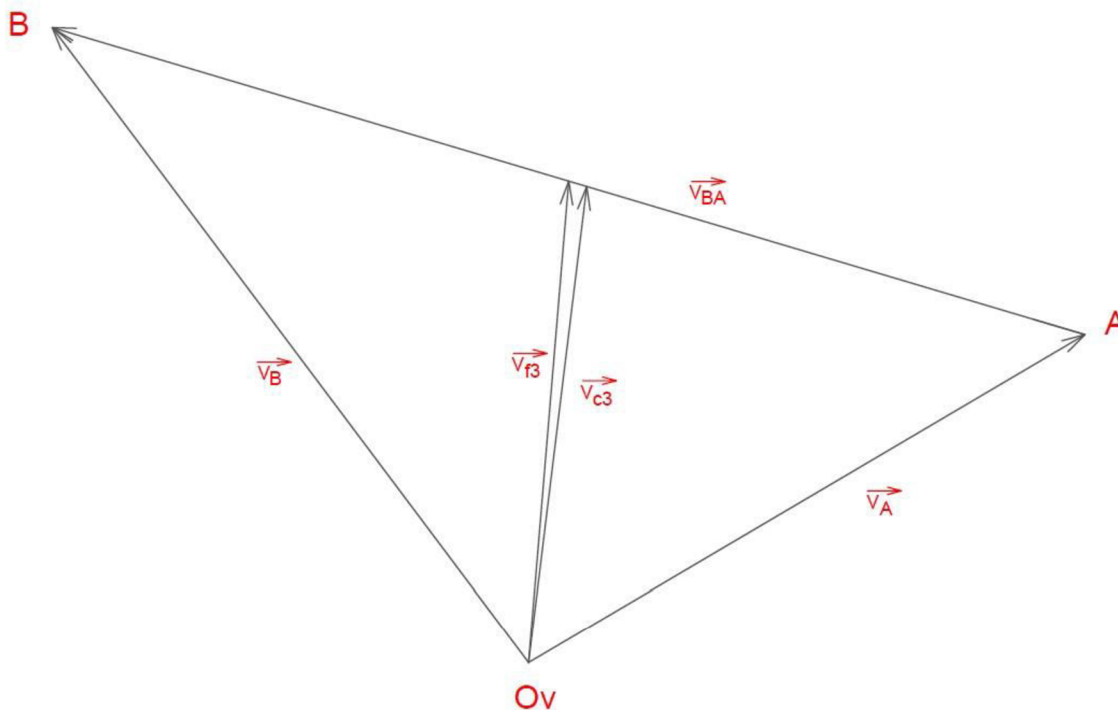
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{BA} \quad (59)$$



Obr. 14 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 30°

$$v_{BA} = 4,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 19,2 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 14,2 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 8,4 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (60)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]} \quad (61)$$

$$a_B^n = \frac{3,55^2}{0,53} = 23,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

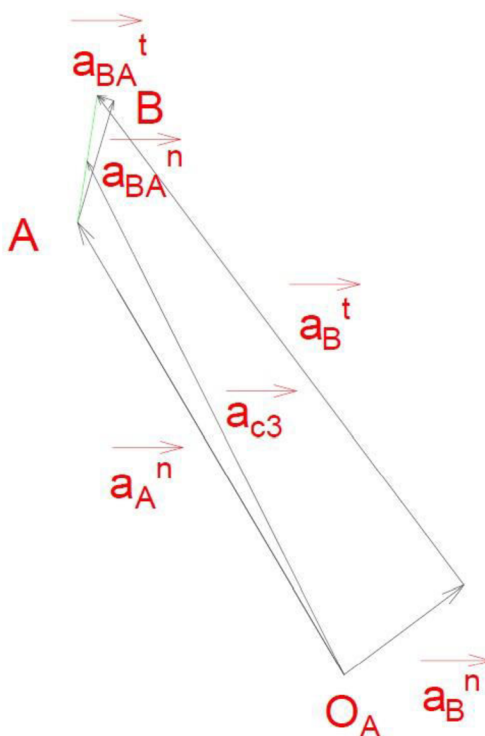
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]} \quad (62)$$

$$a_{BA}^n = \frac{4,8^2}{1,15} = 20,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (63)$$



Obr. 15 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 30°

$$a_{BA}^t = 45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 4,5 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 9,0 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \quad [kg \cdot m^2] \quad (64)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,55^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,1^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{2,172^2}{28,798^2} + 4,1 = 16,688 \text{ kg} \cdot m^2$$

$$v_4 = v_B = 3,55 \text{ m} \cdot s^{-1}; \quad v_3 = v_{BA} = 4,8 \text{ m} \cdot s^{-1}$$

$$v_{c3} = 2,1 \text{ m} \cdot s^{-1}; \quad \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot s^{-1}$$

$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \quad \varphi = 30^\circ$$

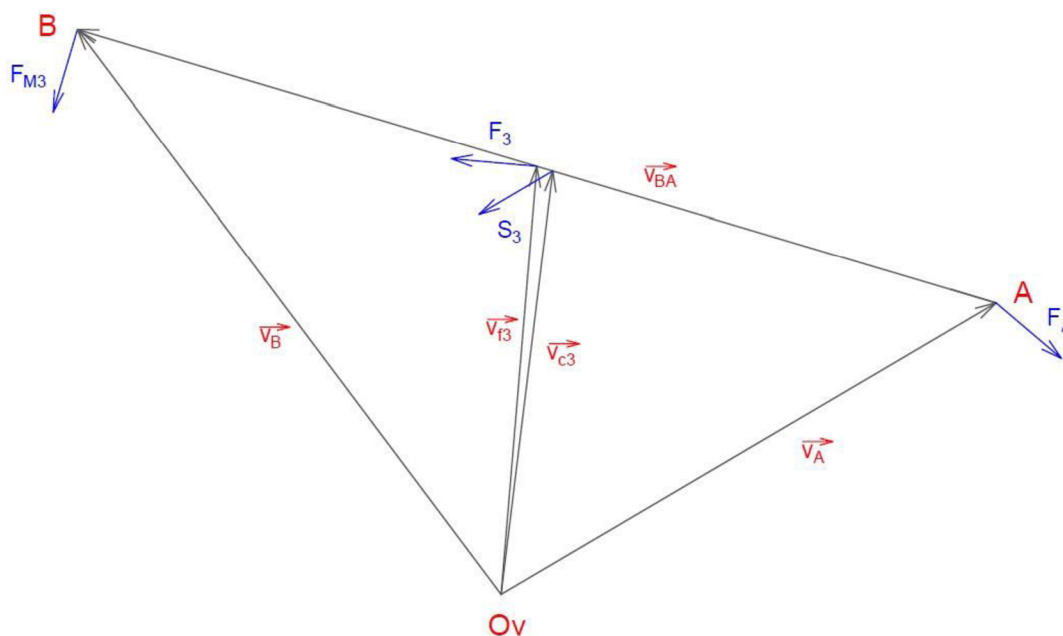
$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [rad \cdot s^{-1}] \quad (65)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 30^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 30^\circ}} = 2,172 \text{ rad} \cdot s^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot m^2; \quad J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot m^2$$

$$m_3 = 2061,87 \text{ kg}; \quad m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 16 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 30° s vynesení sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F_3} = 0 \quad (66)$$

Kde: $h_3 = 7,1 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F_3} = 8,5 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C_3} [N] \quad (67)$$

$$S_3 = 2061,87,90 = 185568,30 \text{ N}$$

Síla F_{M_3} :

$$F_{M_3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (68)$$

$$F_{M_3} = 158,57 \cdot \frac{45}{1,15^2} = 5395,58 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (69)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 185568,3 \cdot 7,1 - 5395,58 \cdot 19,2}{8,5} = -131895,2 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (70)$$

$$M_3 = M_{rov} = -131895,2 \cdot 0,1 = -13189,52 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 45°

Měřitko rychlostí:

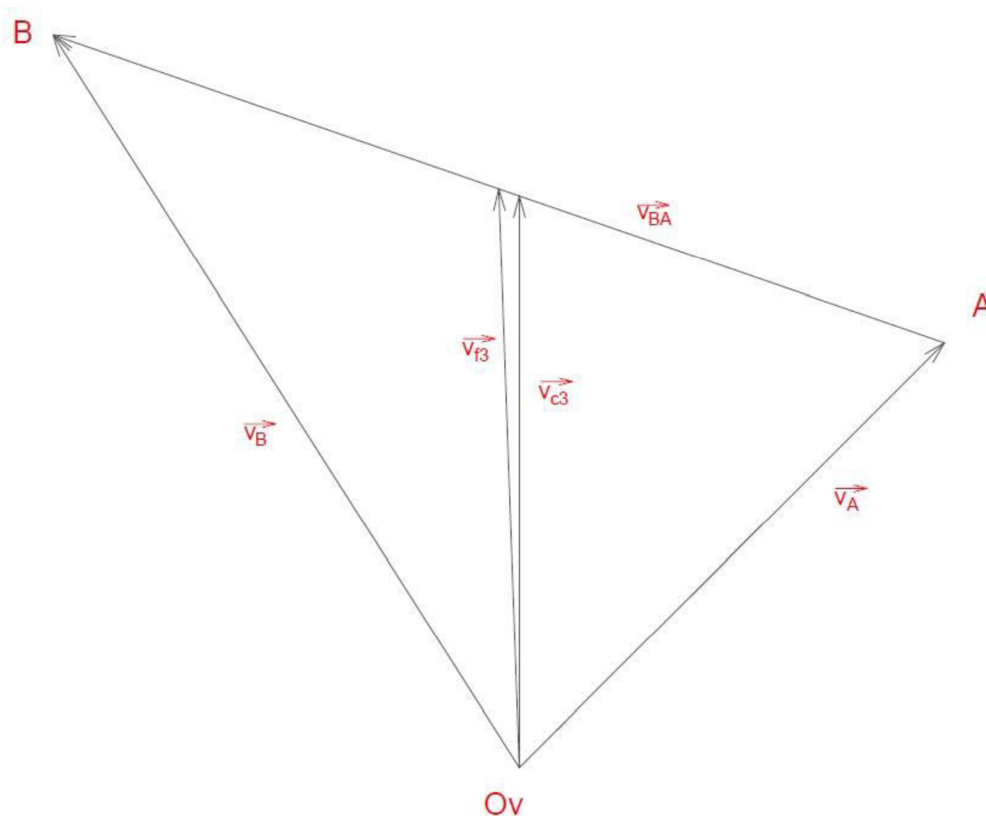
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{BA} \quad (71)$$



Obr. 17 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 45°

$$v_{BA} = 4,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 19,0 \text{ cm}$$

$$v_B = 4,375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 17,5 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 2,825 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,3 \text{ cm}$$

Měřítka zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (72)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (73)$$

$$a_B^n = \frac{4,375^2}{0,53} = 36,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

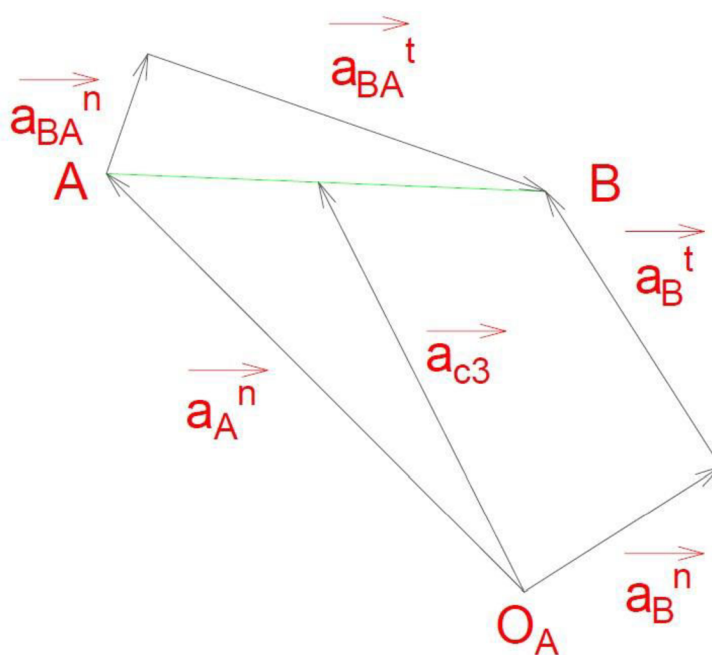
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (74)$$

$$a_{BA}^n = \frac{4,75^2}{1,15} = 19,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (7)$$



Obr. 18 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 45°

$$a_{BA}^t = 61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 6,1 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 6,5 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \quad [kg \cdot m^2] \quad (75)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{4,375^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,825^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{1,775^2}{28,798^2} + 4,1 = 25,641 \text{ kg} \cdot m^2$$

$$v_4 = v_B = 4,375 \text{ m} \cdot s^{-1}; \quad v_3 = v_{BA} = 4,75 \text{ m} \cdot s^{-1}$$

$$v_{C3} = 2,825 \text{ m} \cdot s^{-1}; \quad \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot s^{-1}$$

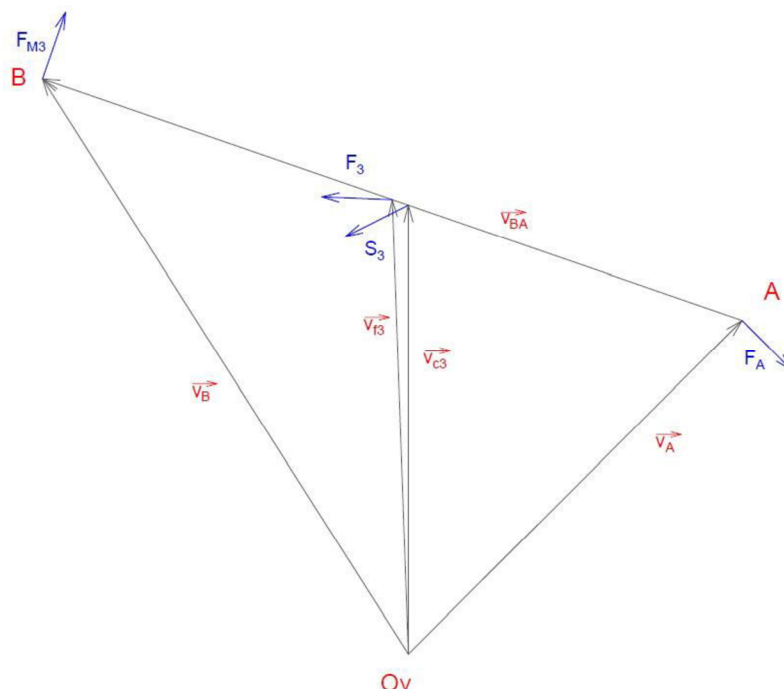
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \quad \varphi = 45^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [rad \cdot s^{-1}] \quad (76)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 45^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 45^\circ}} = 1,775 \text{ rad} \cdot s^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot m^2; \quad J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot m^2; \quad m_3 = 2061,87 \text{ kg}; \quad m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 19 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 45° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F_3} = 0 \quad (77)$$

Kde: $h_3 = 10,2 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F_3} = 11,3 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C_3} [N] \quad (78)$$

$$S_3 = 2061,87,65 = 134021,55 \text{ N}$$

Síla F_{M_3} :

$$F_{M_3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (79)$$

$$F_{M_3} = 158,57 \cdot \frac{61}{1,15^2} = 7314,0 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (80)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 134021,55 \cdot 10,2 + 7314,19}{11,3} = -82126,81 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (81)$$

$$M_3 = M_{rov} = -82126,81 \cdot 0,1 = -8212,68 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 60°

Měřitko rychlostí:

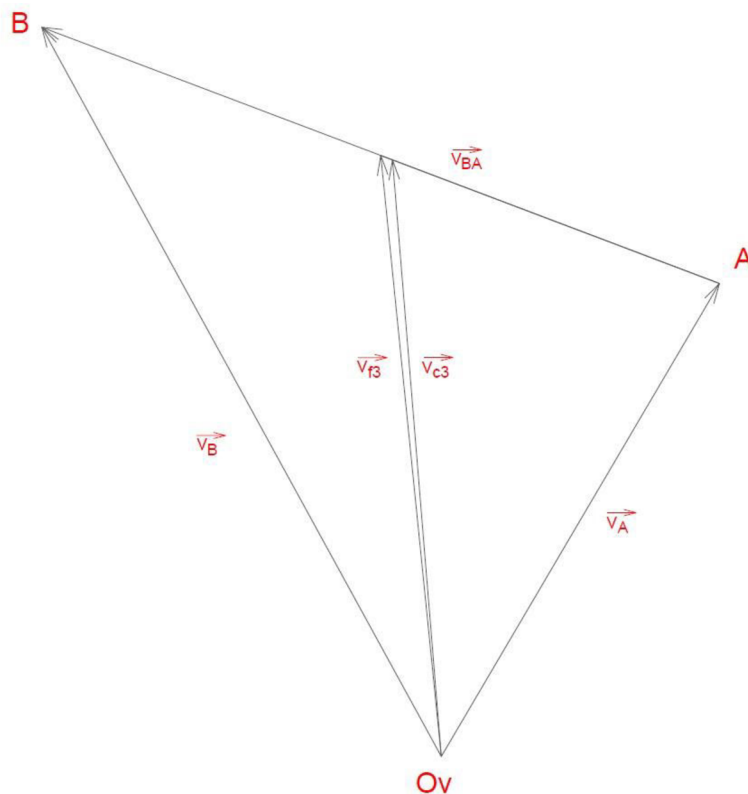
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\bar{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{BA} \quad (82)$$



Obr. 20 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 60°

$$v_{BA} = 3,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 15,0 \text{ cm}$$

$$v_B = 4,325 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 17,3 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 3,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,6 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (83)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (84)$$

$$a_B^n = \frac{4,325^2}{0,53} = 35,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

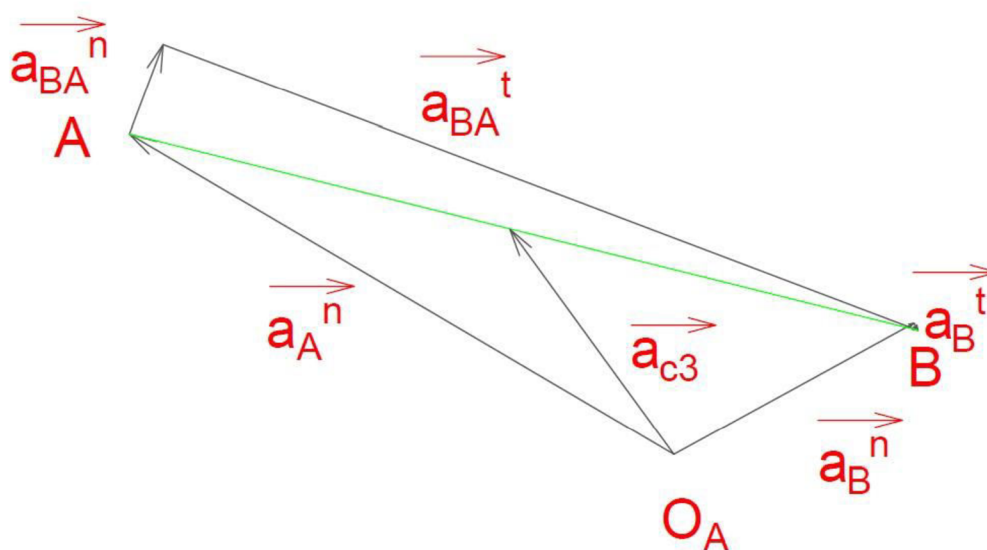
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (85)$$

$$a_{BA}^n = \frac{3,75^2}{1,15} = 12,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (86)$$



Obr. 21 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 60°

$$a_{BA}^t = 102 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 10,2 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 3,9 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (87)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{4,325^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{3,15^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{1,256^2}{28,798^2} + 4,1 = 30,142 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 4,325 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 3,75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 3,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

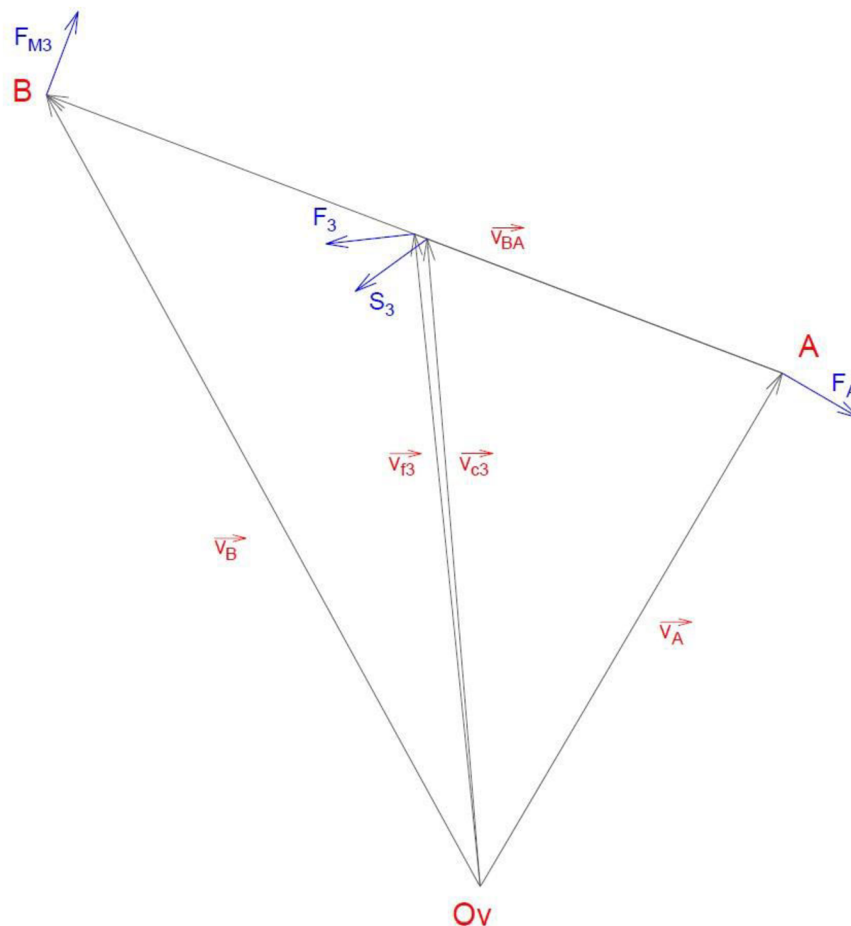
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 60^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (88)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 60^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 60^\circ}} = 1,256 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 22 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 60° s vynesemím sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (89)$$

Kde: $h_3 = 11,0 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F_3} = 12,7 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C_3} \text{ [N]} \quad (90)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 39 = 80412,93 \text{ N}$$

Síla F_{M_3} :

$$F_{M_3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (91)$$

$$F_{M_3} = 158,57 \cdot \frac{102}{1,15^2} = 12229,97 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} \text{ [N]} \quad (92)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 80412,93 \cdot 11 + 12229,97 \cdot 15}{12,7} = -31580,46 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 \text{ [Nm]} \quad (93)$$

$$M_3 = M_{rov} = -31580,46 \cdot 0,1 = -3158,05 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 75°

Měřitko rychlostí:

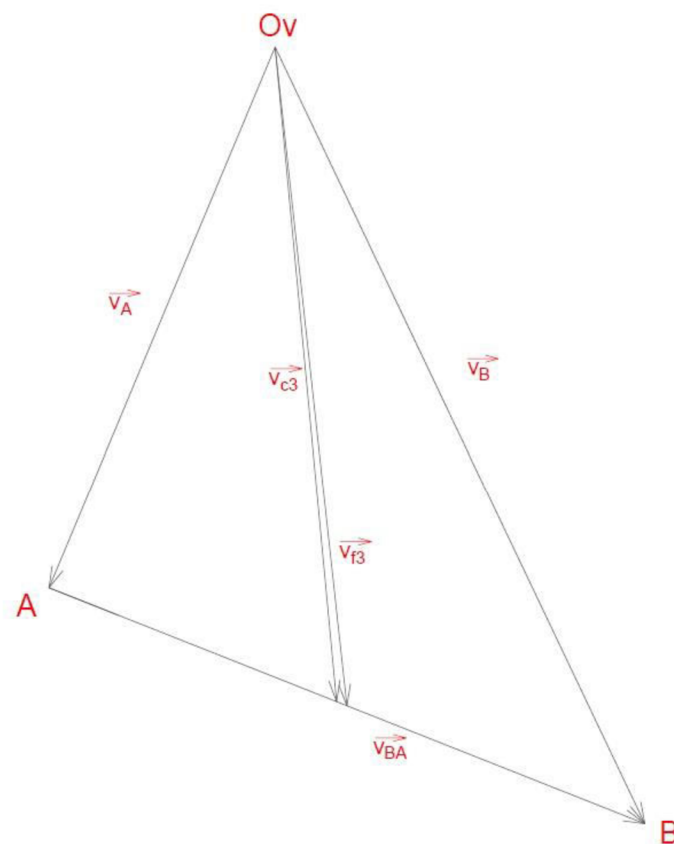
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{BA} \quad (94)$$



Obr. 23 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 75°

$$v_{BA} = 2,6875 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,75 \text{ cm}$$

$$v_B = 4,175 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 16,7 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 13,2 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (95)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (96)$$

$$a_B^n = \frac{4,175^2}{0,53} = 32,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

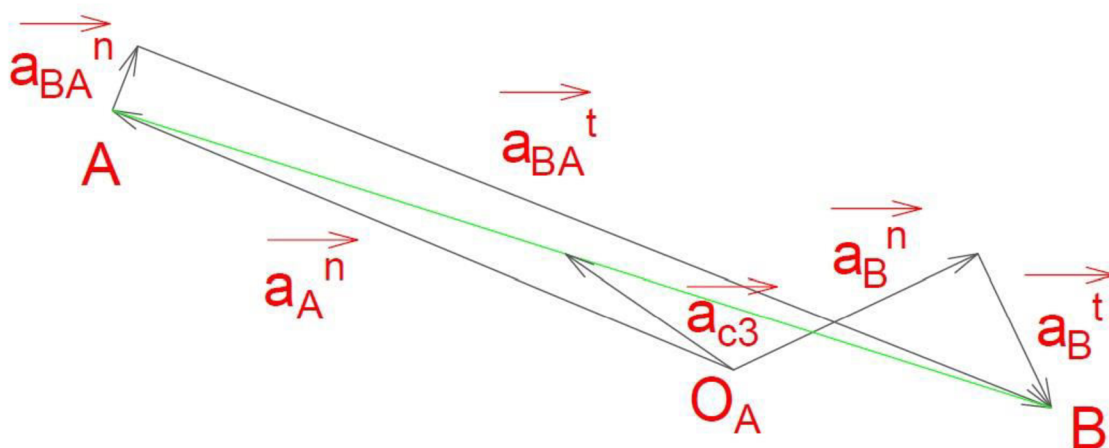
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \quad [m \cdot s^{-2}] \quad (97)$$

$$a_{BA}^n = \frac{2,6875^2}{1,15} = 6,28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (98)$$



Obr. 24 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 75°

$$a_{BA}^t = 135 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 13,5 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 2,0 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \quad [kg \cdot m^2] \quad (99)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{4,175^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{3,3^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{0,65^2}{28,798^2} + 4,1 = 32,254 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 4,175 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \quad v_3 = v_{BA} = 2,6875 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 3,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$$

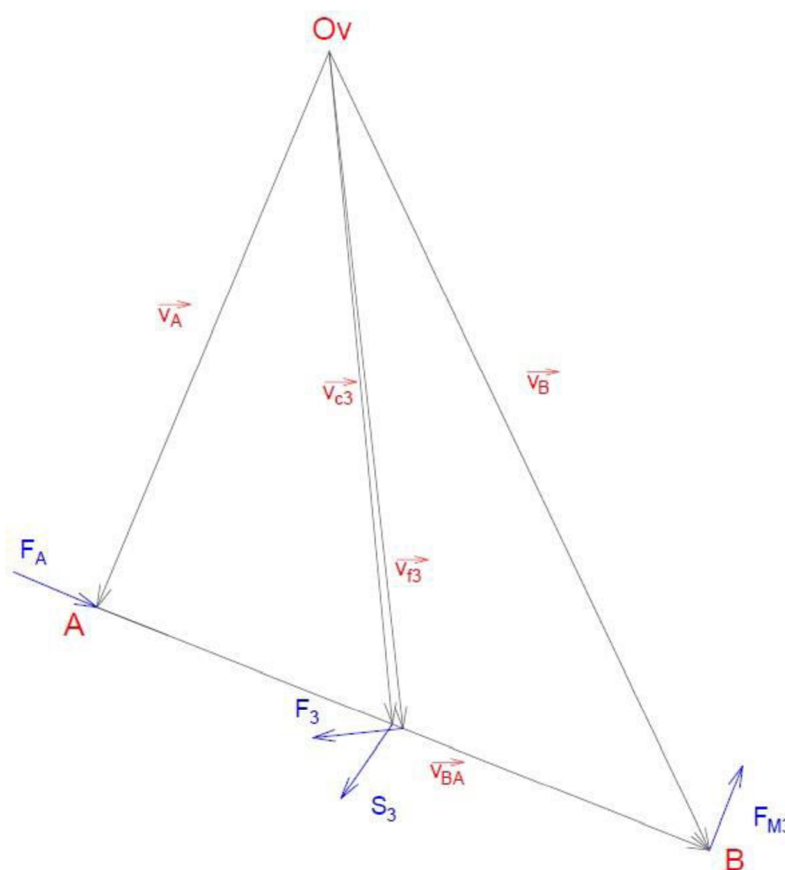
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 75^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (100)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 75^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 75^\circ}} = 0,65 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg}\cdot\text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 25 Schéma rychlostí pro natočení hřídele \$75^\circ\$ s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí \$O_V\$:

$$\sum M_{O_V} = 0: -F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} + F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (101)$$

Kde: \$h_3 = 0,9 \text{ cm}\$

$$\widetilde{v}_{F_3} = 13,3 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C_3} [N] \quad (102)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 20 = 41237,4 \text{ N}$$

Síla F_{M_3} :

$$F_{M_3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (103)$$

$$F_{M_3} = 158,57 \cdot \frac{135}{1,15^2} = 16186,73 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (104)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 41237,4 \cdot 0,9 + 16186,73 \cdot 10,75}{13,3} = 32850,72 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (105)$$

$$M_3 = M_{rov} = 32850,72 \cdot 0,1 = 3285,07 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 90°

Měřitko rychlostí:

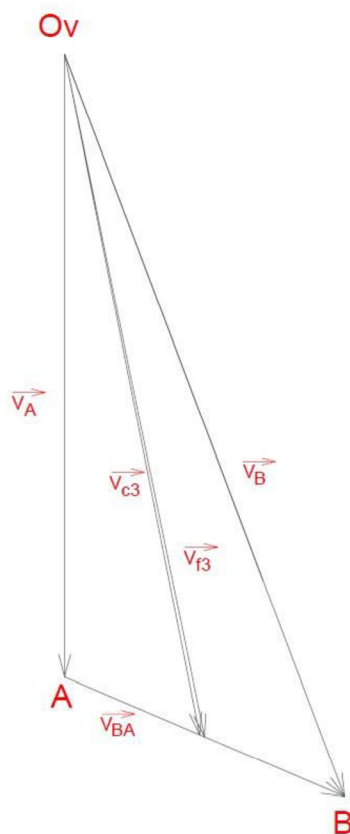
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overrightarrow{v}_B = \overrightarrow{v}_A + \overrightarrow{v}_{BA} \quad (106)$$

Obr. 26 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 90°

$$v_{BA} = 1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 5,2 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 14,4 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 3,1875 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,75 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (107)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (108)$$

$$a_B^n = \frac{3,6^2}{0,53} = 24,50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

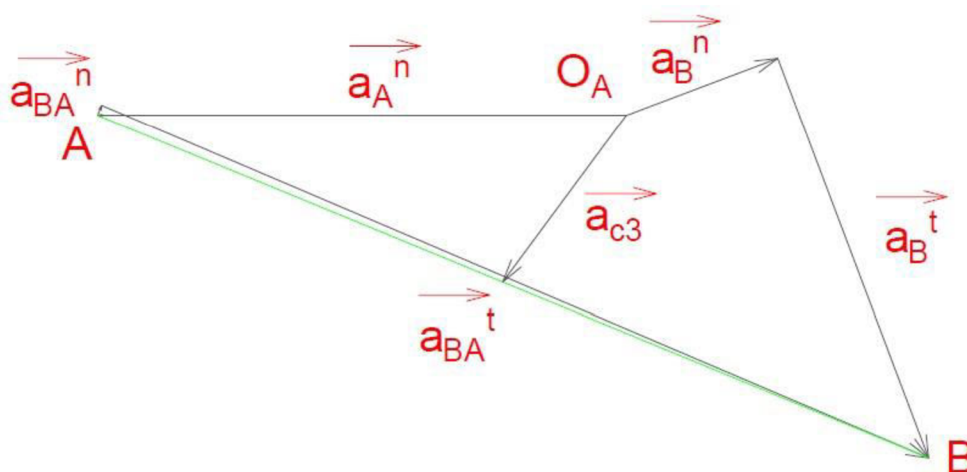
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (109)$$

$$a_{BA}^n = \frac{1,3^2}{1,15} = 1,47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (110)$$



Obr. 27 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 90°

$$a_{BA}^t = 141 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 14,1 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 3,4 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (111)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,6^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{3,1875^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{0^2}{28,798^2} + 4,1 = 30,103 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 3,1875 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

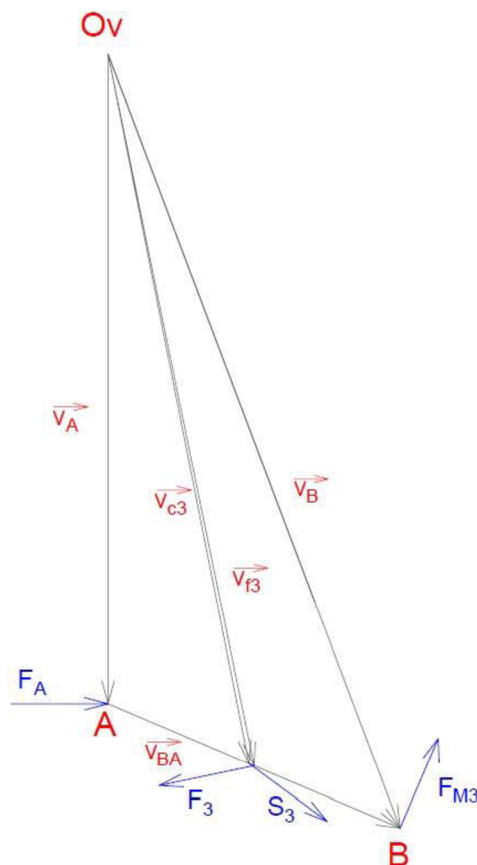
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 90^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (112)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 90^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 90^\circ}} = 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 28 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 90° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: -F_A \cdot \tilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \tilde{v}_{BA} + F_3 \cdot \tilde{v}_{F3} = 0 \quad (113)$$

$$\text{Kde: } h_3 = 8,3 \text{ cm}$$

$$\tilde{v}_{F3} = 12,8 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \quad [N] \quad (114)$$

$$S_3 = 2061,87.34 = 70103,58 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (115)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{141}{1,15^2} = 16906,14 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} \text{ [N]} \quad (116)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,1.28,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \overline{v_A} + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \overline{v_{BA}}}{\overline{v_{F3}}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 70103,58 \cdot 8,3 + 16906,14 \cdot 5,2}{12,8} = 75765,04 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 \text{ [Nm]} \quad (117)$$

$$M_3 = M_{rov} = 75765,04 \cdot 0,1 = 7576,5 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 105°

Měřitko rychlostí:

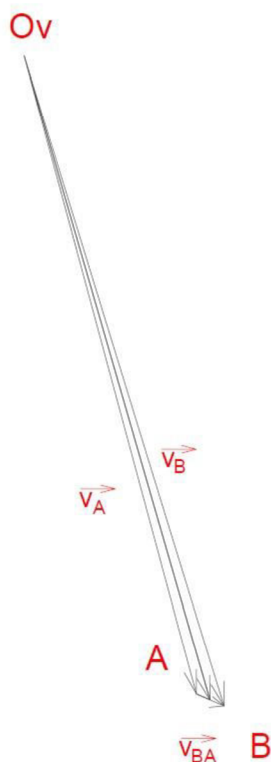
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v_A} = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overrightarrow{v_B} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{v_{BA}} \quad (118)$$

Obr. 29 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 105°

$$v_{BA} = 0,175 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 0,7 \text{ cm}$$

$$v_B = 2,9875 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,95 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 2,9375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,75 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (119)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (120)$$

$$a_B^n = \frac{2,9875^2}{0,53} = 16,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

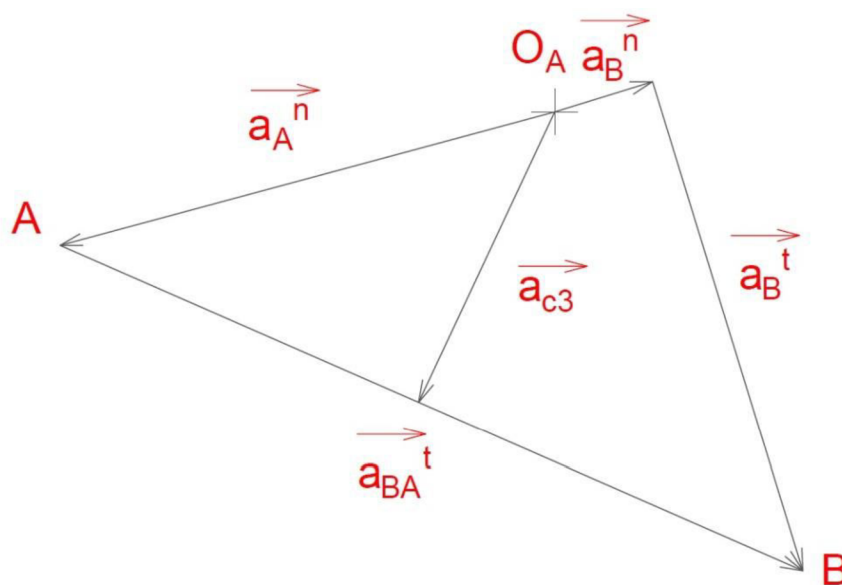
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (121)$$

$$a_{BA}^n = \frac{0,175^2}{1,15} = 0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (122)$$



Obr. 30 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 105°

$$a_{BA}^t = 131 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 13,1 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 51 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 5,1 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (123)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{2,9875^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,9375^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-0,65^2}{28,798^2} + 4,1 = 26,145 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 2,9875 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 0,175 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 2,9375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

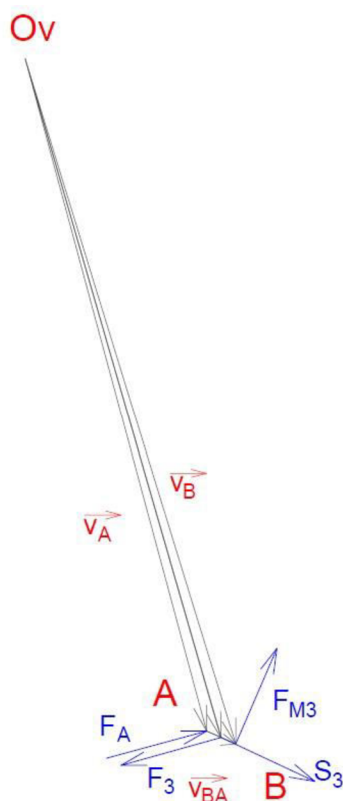
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 105^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (124)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 105^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 105^\circ}} = -0,65 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 31 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 105° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: -F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} + F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (125)$$

$$\text{Kde: } h_3 = 8,9 \text{ cm}$$

$$\widetilde{v}_{F3} = 11,75 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \quad [N] \quad (126)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 51 = 105155,37 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (127)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{131}{1,15^2} = 15707,12 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (128)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128 \cdot 798} = 26043,48 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 105155,37 \cdot 8,9 + 15707,12 \cdot 0,7}{11,75} = 106119,03 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (129)$$

$$M_3 = M_{rov} = 106119,03 \cdot 0,1 = 10611,9 Nm$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 120°

Měřitko rychlostí:

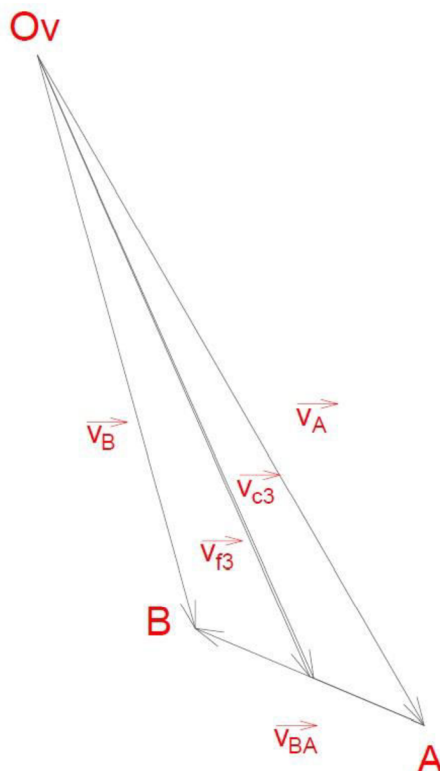
$$m_v = \frac{0,25 m \cdot s^{-1}}{cm}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 m \cdot s^{-1} \approx 11,52 cm$$

$$\overrightarrow{v}_B = \overrightarrow{v}_A + \overrightarrow{v}_{BA} \quad (130)$$

Obr. 32 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 120°

$$v_{BA} = 0,925 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3,7 \text{ cm}$$

$$v_B = 2,225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 8,9 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 2,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,2 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (131)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (132)$$

$$a_B^n = \frac{2,225^2}{0,53} = 9,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

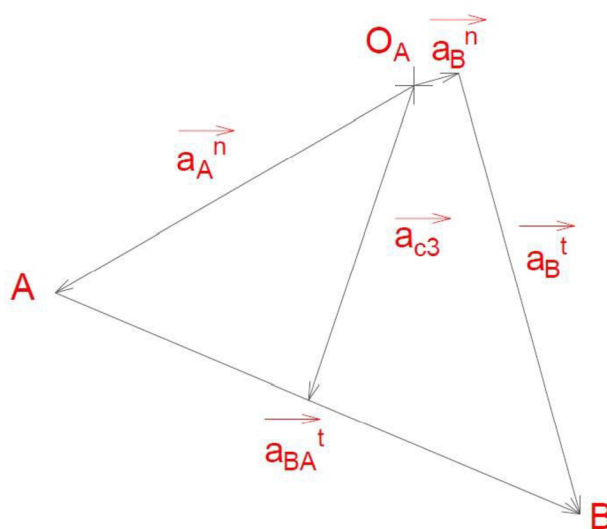
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [m \cdot s^{-2}] \quad (133)$$

$$a_{BA}^n = \frac{0,925^2}{1,15} = 0,74 m \cdot s^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (134)$$



Obr. 33 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 120°

$$a_{BA}^t = 102 m \cdot s^{-2} \approx 10,2 cm$$

$$a_{c3} = 66 m \cdot s^{-2} \approx 6,6 cm$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 [kg \cdot m^2] \quad (135)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{2,225^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,55^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-1,256^2}{28,798^2} + 4,1 = 20,852 kg \cdot m^2$$

$$v_4 = v_B = 2,225 m \cdot s^{-1}; v_3 = v_{BA} = 0,925 m \cdot s^{-1}$$

$$v_{c3} = 2,55 m \cdot s^{-1}; \omega_2 = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

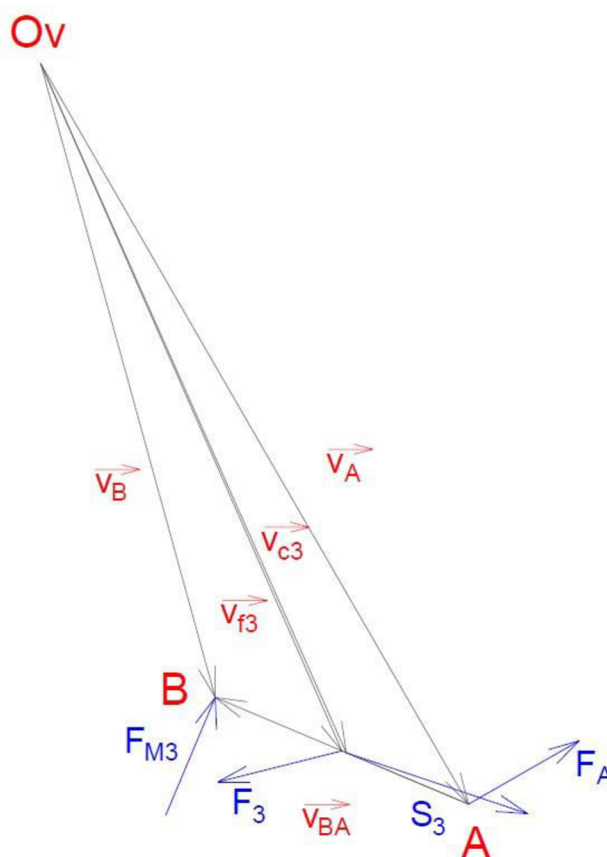
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 120^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (136)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 120^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 120^\circ}} = -1,256 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 34 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 120° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: -F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} + F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (137)$$

Kde: $h_3 = 7,1 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 10,1 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \quad [N] \quad (138)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 66 = 136083,42 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (139)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{102}{1,15^2} = 12229,97 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (140)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \overline{v_A} + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \overline{v_{BA}}}{\overline{v_{F_3}}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 136083,42 \cdot 7,1 + 12229,97 \cdot 3,7}{10,1} = 129847,92 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (141)$$

$$M_3 = M_{rov} = 129847,92 \cdot 0,1 = 12984,79 Nm$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 135°

Měřitko rychlostí:

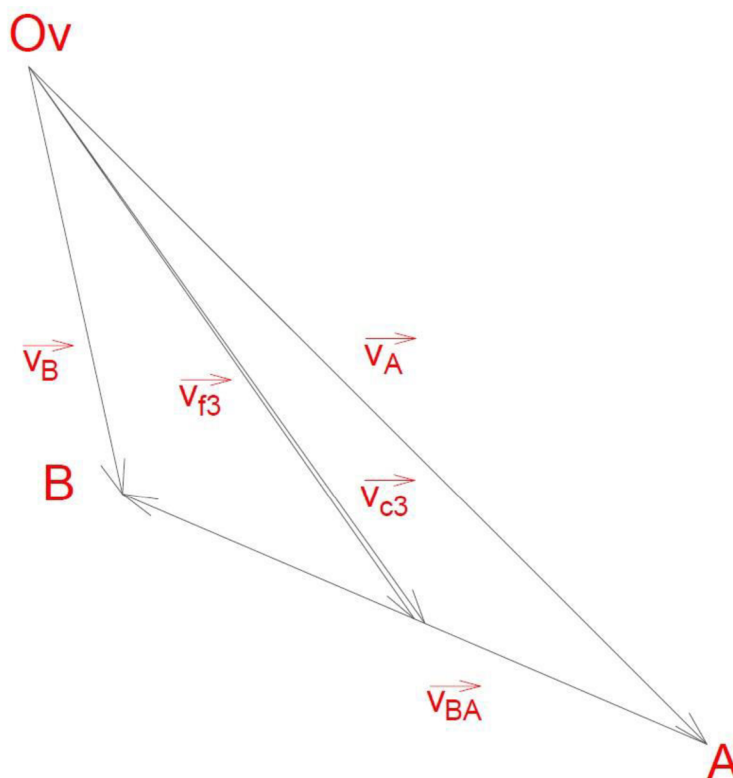
$$m_v = \frac{0,25 m \cdot s^{-1}}{cm}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

$$\overline{v_A} = 2,88 m \cdot s^{-1} \approx 11,52 cm$$

$$\overrightarrow{v_B} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{v_{BA}} \quad (142)$$



Obr. 35 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 135°

$$v_{BA} = 1,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 7,6 \text{ cm}$$

$$v_B = 1,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 5,4 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 2,075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 8,3 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (143)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (144)$$

$$a_B^n = \frac{1,35^2}{0,53} = 3,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

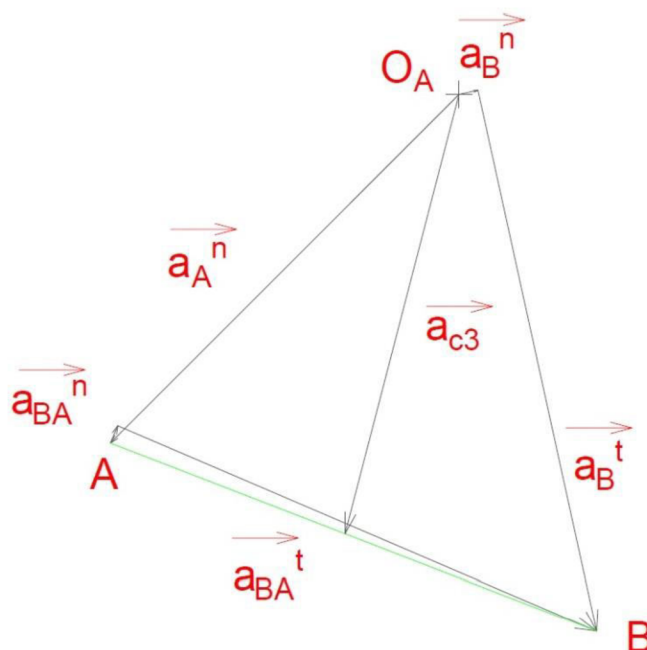
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [m \cdot s^{-2}] \quad (145)$$

$$a_{BA}^n = \frac{1,9^2}{1,15} = 3,14 m \cdot s^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (146)$$



Obr. 36 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 135°

$$a_{BA}^t = 89 m \cdot s^{-2} \approx 8,9 cm$$

$$a_{C3} = 75 m \cdot s^{-2} \approx 7,5 cm$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 [kg \cdot m^2] \quad (147)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{1,35^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,075^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-1,775^2}{28,798^2} + 4,1 = 15,511 kg \cdot m^2$$

$$v_4 = v_B = 1,35 m \cdot s^{-1}; v_3 = v_{BA} = 1,9 m \cdot s^{-1}$$

$$v_{C3} = 2,075 m \cdot s^{-1}; \omega_2 = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

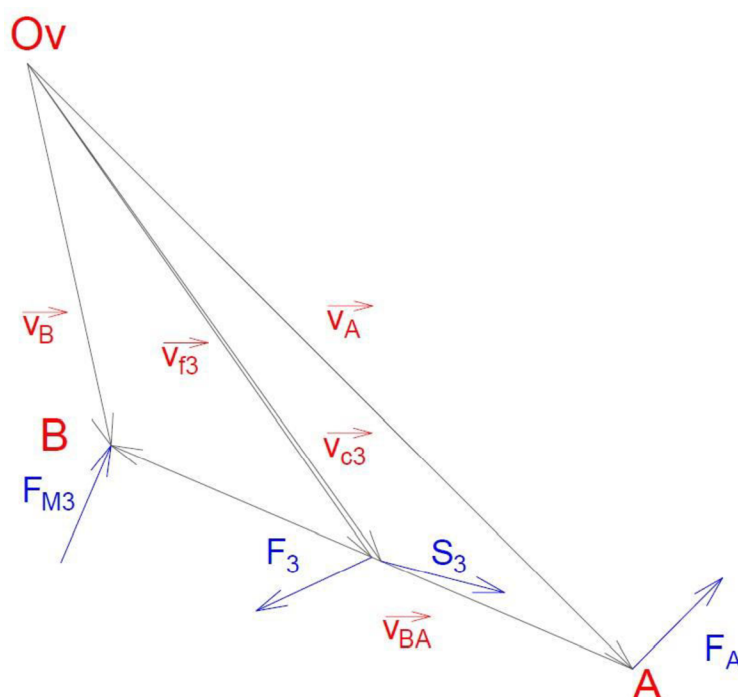
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 135^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (148)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 135^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 135^\circ}} = -1,775 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 37 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 135° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: -F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} + F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (149)$$

$$\text{Kde: } h_3 = 5,3 \text{ cm}$$

$$\widetilde{v}_{F3} = 8,2 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \text{ [N]} \quad (150)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 7,5 = 154640,25 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (151)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{89}{1,15^2} = 10671,25 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (152)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \overline{v_A} + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \overline{v_{BA}}}{\overline{v_{F_3}}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 154640,25 \cdot 5,3 + 10671,25 \cdot 7,6}{8,2} = 146428,74 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (153)$$

$$M_3 = M_{rov} = 146428,74 \cdot 0,1 = 14642,87 Nm$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 150°

Měřitko rychlostí:

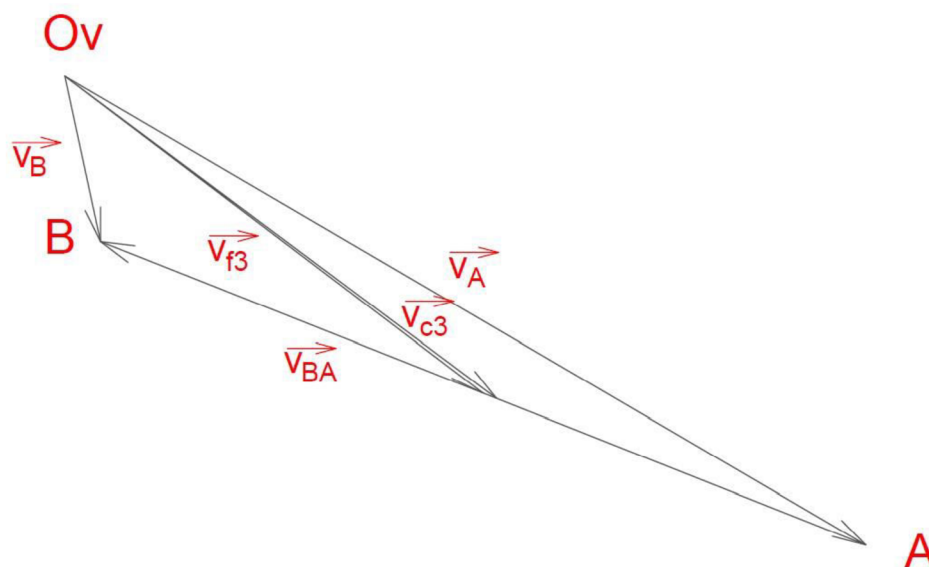
$$m_v = \frac{0,25 m \cdot s^{-1}}{cm}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

$$\overline{v_A} = 2,88 m \cdot s^{-1} \approx 11,52 cm$$

$$\overline{v_B} = \overline{v_A} + \overline{v_{BA}} \quad (154)$$



Obr. 38 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 150°

$$v_{BA} = 2,575 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,3 \text{ cm}$$

$$v_B = 0,525 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2,1 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 1,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 6,2 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (155)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (156)$$

$$a_B^n = \frac{0,525^2}{0,53} = 0,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

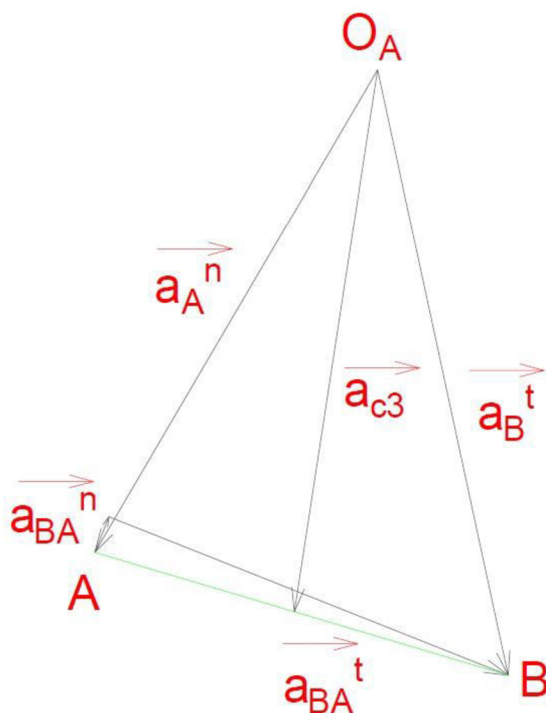
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (157)$$

$$a_{BA}^n = \frac{2,575^2}{1,15} = 5,77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (158)$$



Obr. 39 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 150°

$$a_{BA}^t = 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 6,0 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 7,9 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (159)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{0,525^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{1,55^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-2,172^2}{28,798^2} + 4,1 = 10,991 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 0,525 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \quad v_3 = v_{BA} = 2,575 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 1,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \quad \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

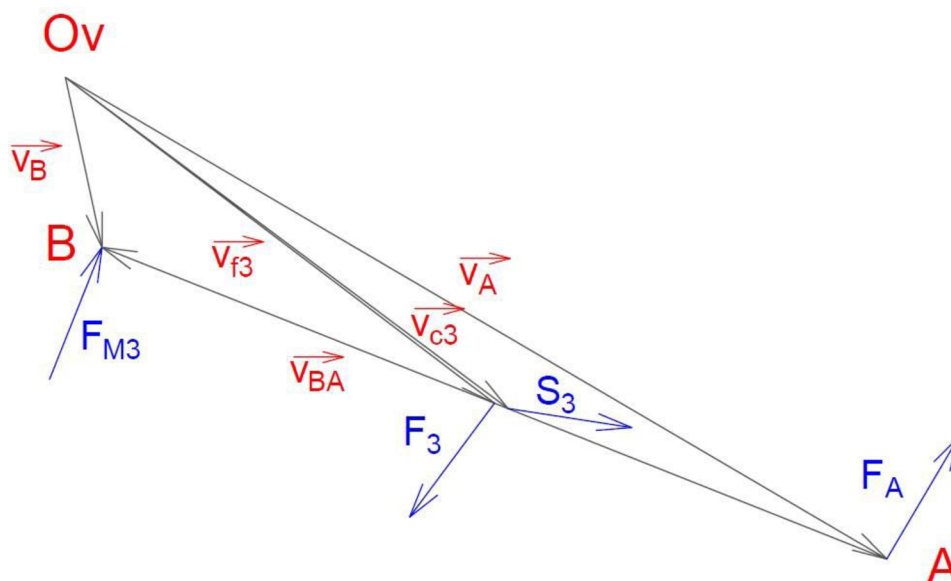
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \quad \varphi = 150^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (160)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 150^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 150^\circ}} = -2,172 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 40 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 150° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: -F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} + F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (161)$$

$$\text{Kde: } h_3 = 3,1 \text{ cm}$$

$$\widetilde{v}_{F3} = 6,5 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} \quad [\text{N}] \quad (162)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 7,9 = 162887,73 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \quad [\text{N}] \quad (163)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{60}{1,15^2} = 7194,102 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [\text{N}] \quad (164)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 162887,73 \cdot 3,1 + 7194,102 \cdot 10,3}{6,5} = 135241,85 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [\text{Nm}] \quad (165)$$

$$M_3 = M_{rov} = 135241,85 \cdot 0,1 = 13524,19 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 165°

Měřitko rychlostí:

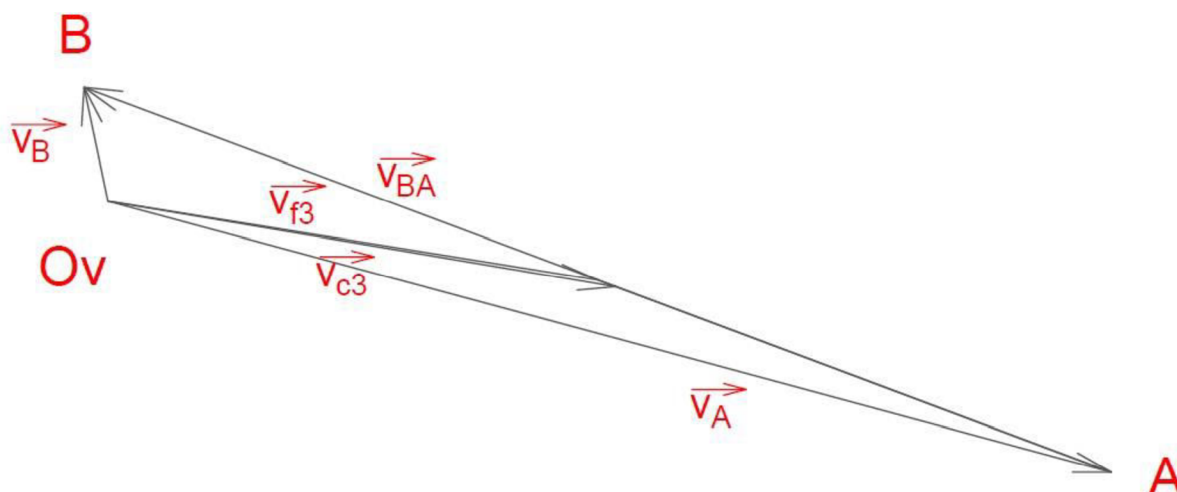
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA} \quad (166)$$

Obr. 41 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 165°

$$v_{BA} = 3,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,2 \text{ cm}$$

$$v_B = 0,275 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 1,1 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 1,425 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 5,7 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (167)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (168)$$

$$a_B^n = \frac{0,275^2}{0,53} = 0,14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

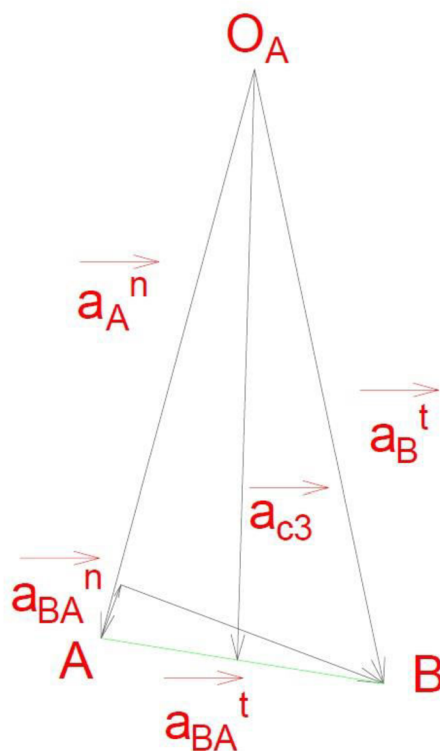
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (169)$$

$$a_{BA}^n = \frac{3,05^2}{1,15} = 8,09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (170)$$



Obr. 42 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 165°

$$a_{BA}^t = 41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 4,1 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 8,0 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (171)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{0,275^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{1,425^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-2,42^2}{28,798^2} + 4,1 = 10,273 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 0,275 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 3,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 1,425 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

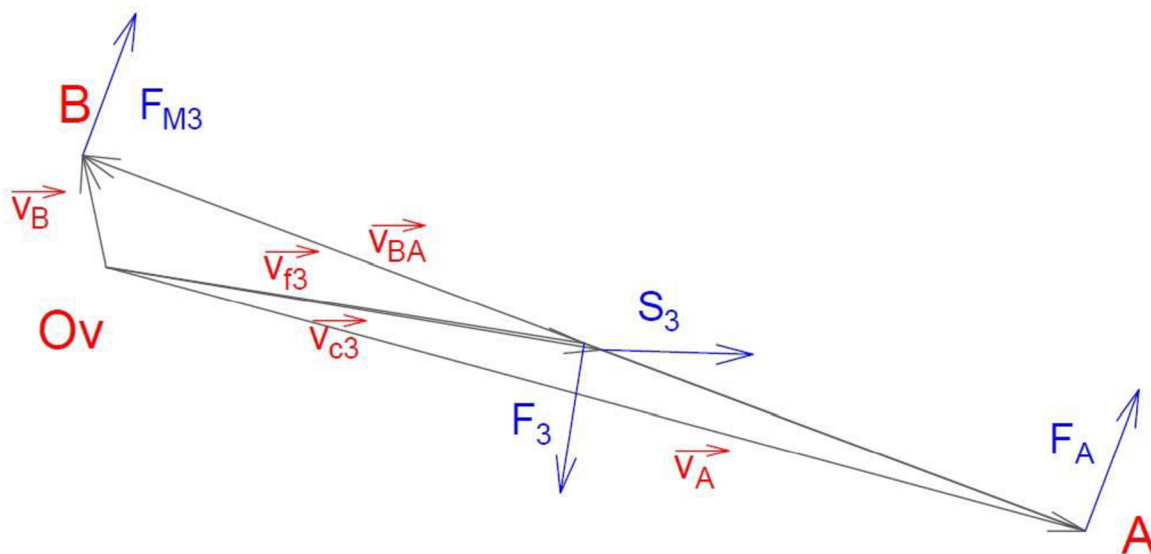
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 165^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (172)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 165^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 165^\circ}} = -2,42 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 43 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 165° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: -F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} + F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (173)$$

$$\text{Kde: } h_3 = 0,9 \text{ cm}$$

$$\widetilde{v}_{F3} = 5,5 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \quad [\text{N}] \quad (174)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 80 = 164949,6 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \quad [\text{N}] \quad (175)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{41}{1,15^2} = 4915,97 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (176)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 - F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 164949,6 \cdot 0,9 - 4915,97 \cdot 12,2}{5,5} = 70636,48 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (177)$$

$$M_3 = M_{rov} = 70636,48 \cdot 0,1 = 7063,65 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 180°

Měřitko rychlostí:

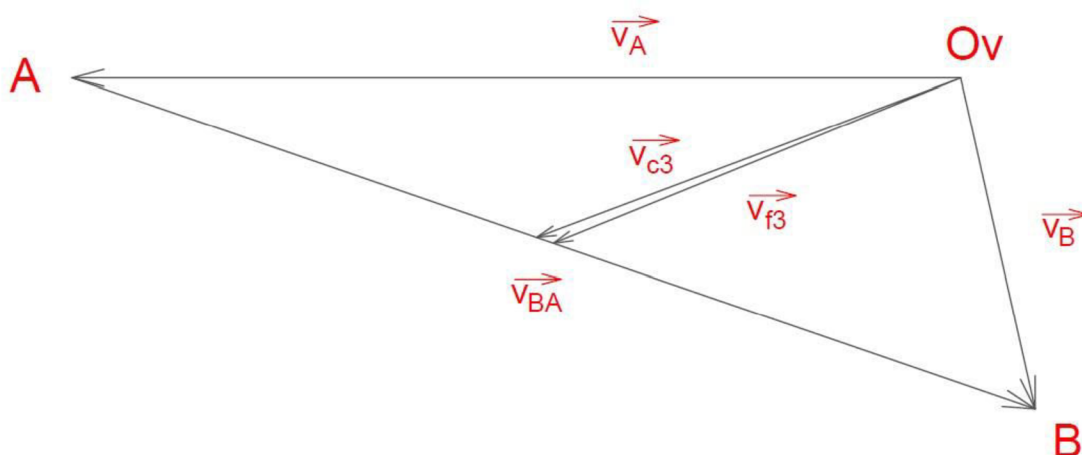
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA} \quad (178)$$



Obr. 44 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 180°

$$v_{BA} = 3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 13,2 \text{ cm}$$

$$v_B = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 4,4 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 1,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 5,8 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (179)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (180)$$

$$a_B^n = \frac{1,1^2}{0,53} = 2,29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

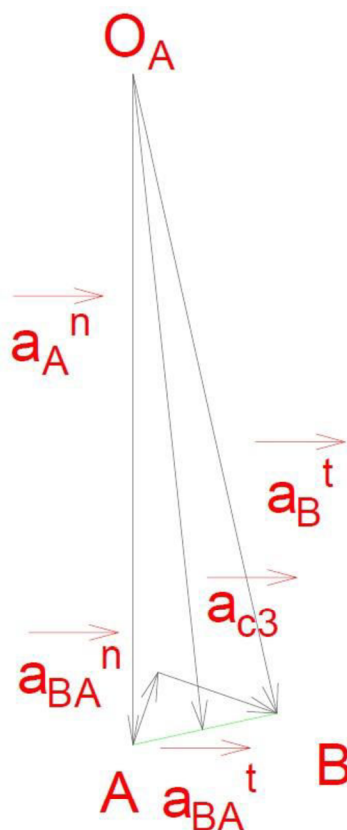
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (181)$$

$$a_{BA}^n = \frac{3,3^2}{1,15} = 9,47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (182)$$



Obr. 45 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 180°

$$a_{BA}^t = 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 1,8 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 8,3 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (183)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{1,1^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{1,45^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-2,5^2}{28,798^2} + 4,1 = 10,592 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 1,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

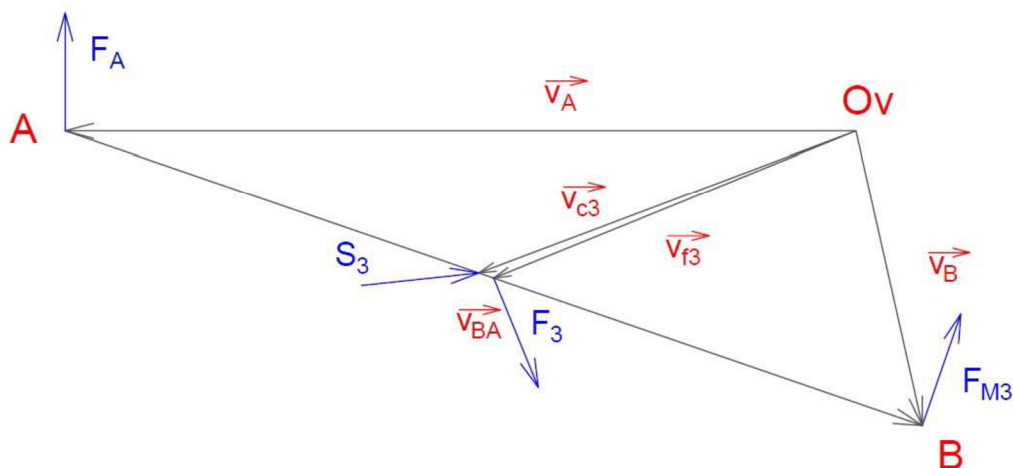
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 180^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (184)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 180^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 180^\circ}} = -2,5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 46 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 180° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (185)$$

Kde: $h_3 = 0,9 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 5,1 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \text{ [N]} \quad (186)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 83 = 171135,21 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (187)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{18}{1,15^2} = 2158,23 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} \text{ [N]} \quad (188)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 171135,21 \cdot 0,9 - 2158,23 \cdot 13,2}{5,1} = 23041,27 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [\text{Nm}] \quad (189)$$

$$M_3 = M_{rov} = 23041,27 \cdot 0,1 = 2304,13 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 195°

Měřitko rychlostí:

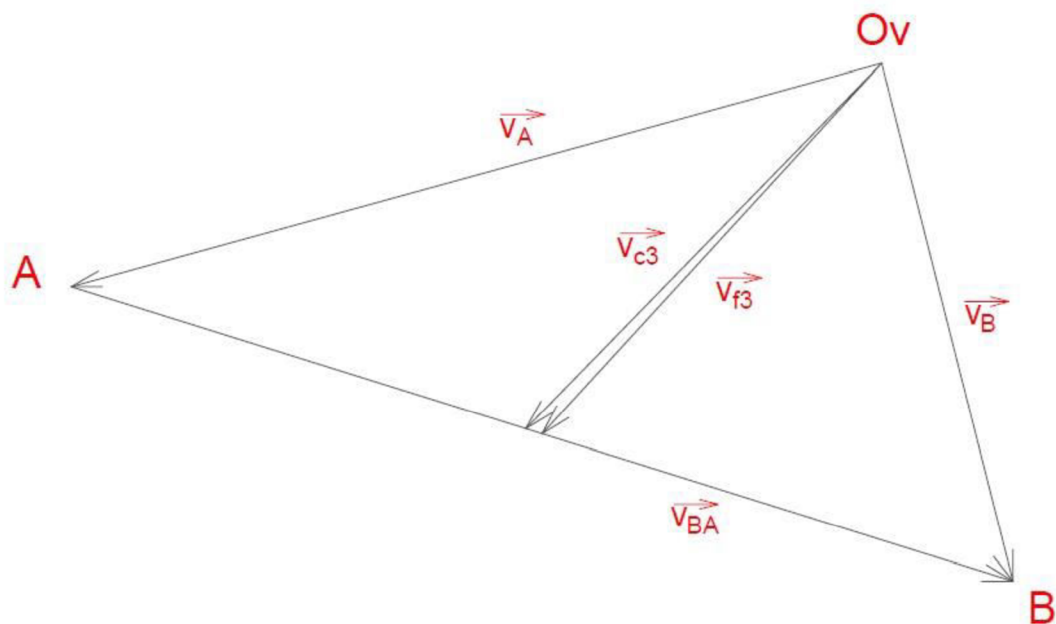
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA} \quad (190)$$



Obr. 47 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 195°

$$v_{BA} = 3,375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 13,5 \text{ cm}$$

$$v_B = 1,975 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 7,9 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 1,775 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 7,1 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (191)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (192)$$

$$a_B^n = \frac{1,975^2}{0,53} = 9,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

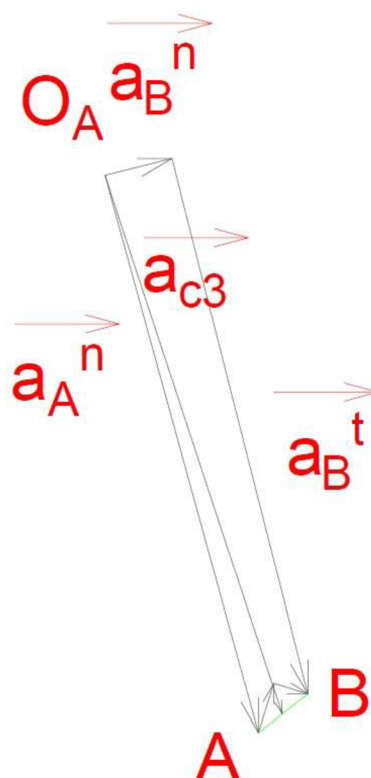
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (193)$$

$$a_{BA}^n = \frac{3,375^2}{1,15} = 7,37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (194)$$



Obr. 48 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 195°

$$a_{BA}^t = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 0,2 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 8,1 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (195)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{1,975^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{1,775^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-2,42^2}{28,798^2} + 4,1 = 13,276 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 1,975 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 3,375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 1,775 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

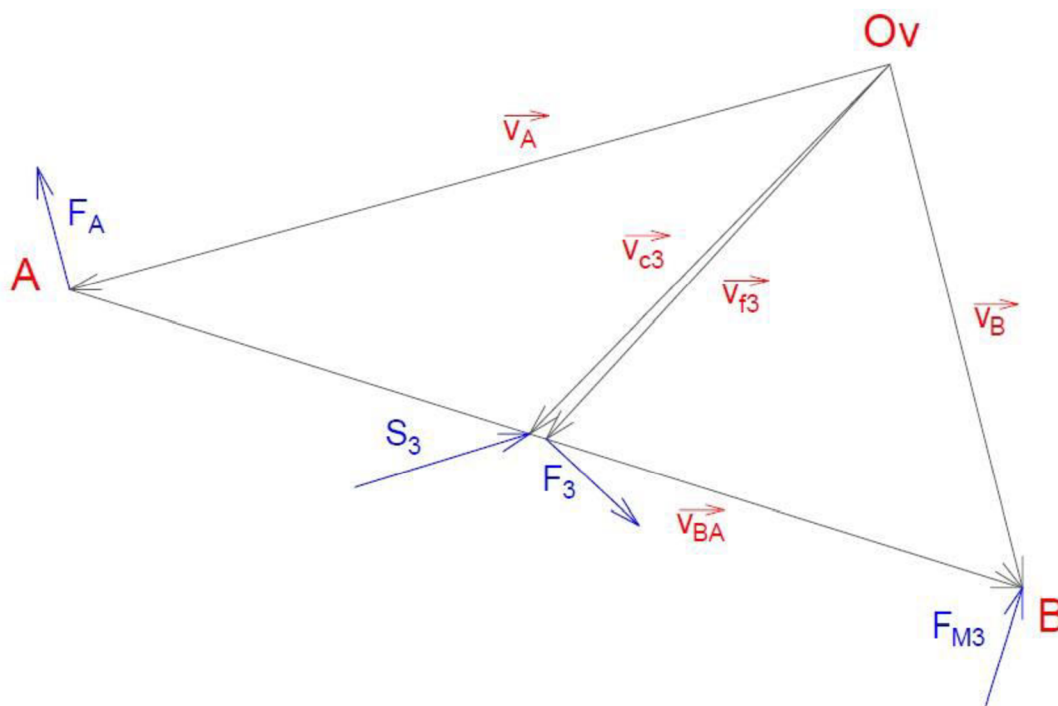
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 195^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (196)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 195^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 195^\circ}} = -2,42 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 49 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 195° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \tilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \tilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \tilde{v}_{F3} = 0 \quad (197)$$

Kde: $h_3 = 3,0 \text{ cm}$

$$\tilde{v}_{F3} = 6,9 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} \text{ [N]} \quad (198)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 81 = 167011,47 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (199)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{2}{1,15^2} = 239,8 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (200)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 - F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 167011,47 \cdot 3,0 - 239,8 \cdot 13,5}{6,9} = -29601,58 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (201)$$

$$M_3 = M_{rov} = -29601,58 \cdot 0,1 = -2960,16 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 210°

Měřitko rychlostí:

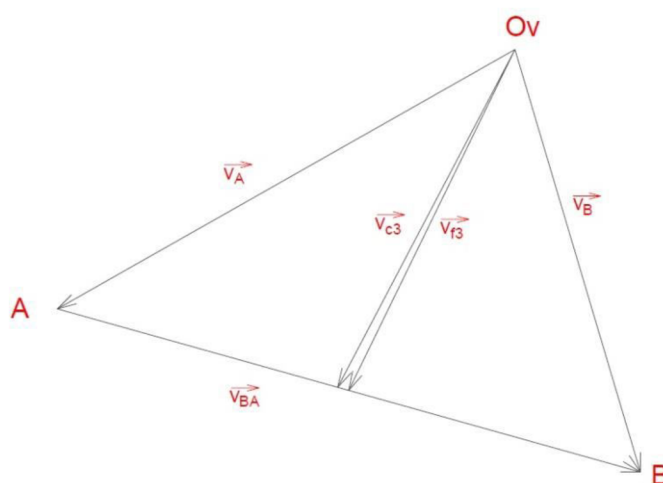
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA} \quad (202)$$



Obr. 50 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 210°

$$v_{BA} = 3,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 13,0 \text{ cm}$$

$$v_B = 2,375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 9,5 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 8,4 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (203)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (204)$$

$$a_B^n = \frac{2,375^2}{0,53} = 10,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

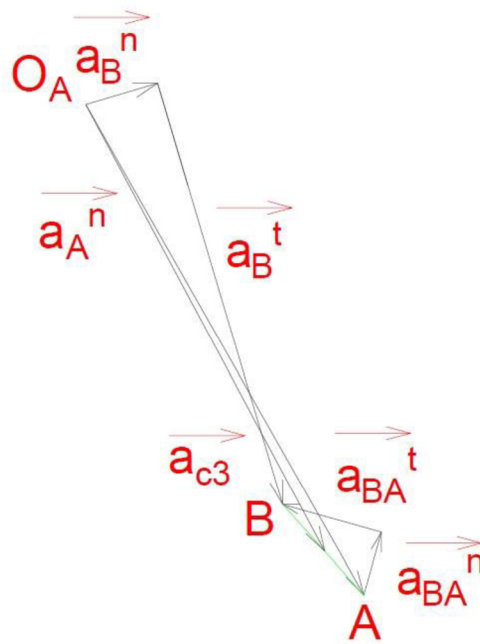
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (205)$$

$$a_{BA}^n = \frac{3,25^2}{1,15} = 9,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (206)$$

Obr. 51 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 210°

$$a_{BA}^t = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 1,4 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 7,4 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (207)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{2,375^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,1^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-2,172^2}{28,798^2} + 4,1 = 16,289 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 2,375 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 3,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

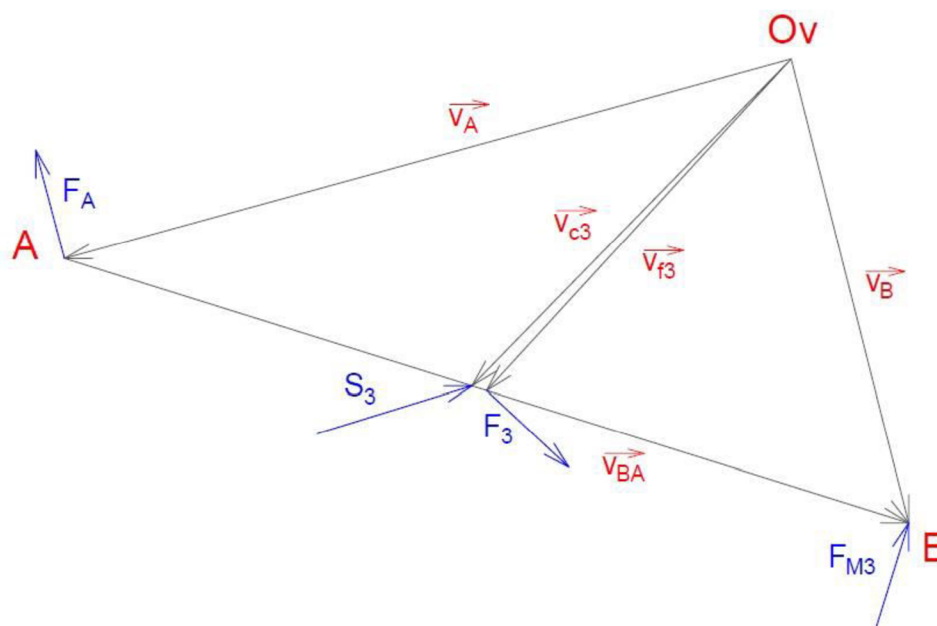
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 210^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (208)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 210^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 210^\circ}} = -2,172 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 52 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 210° s vnesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (209)$$

Kde: $h_3 = 5,1 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 8,3 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} \text{ [N]} \quad (210)$$

$$S_3 = 2061,87.74 = 152578,38 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (211)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{14}{1,15^2} = 1678,62 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} \text{ [N]} \quad (212)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 152578,38 \cdot 5,1 + 1678,62 \cdot 10,8}{8,3} = -41071,41 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [\text{Nm}] \quad (213)$$

$$M_3 = M_{rov} = -41071,41 \cdot 0,1 = -4107,14 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 225°

Měřitko rychlostí:

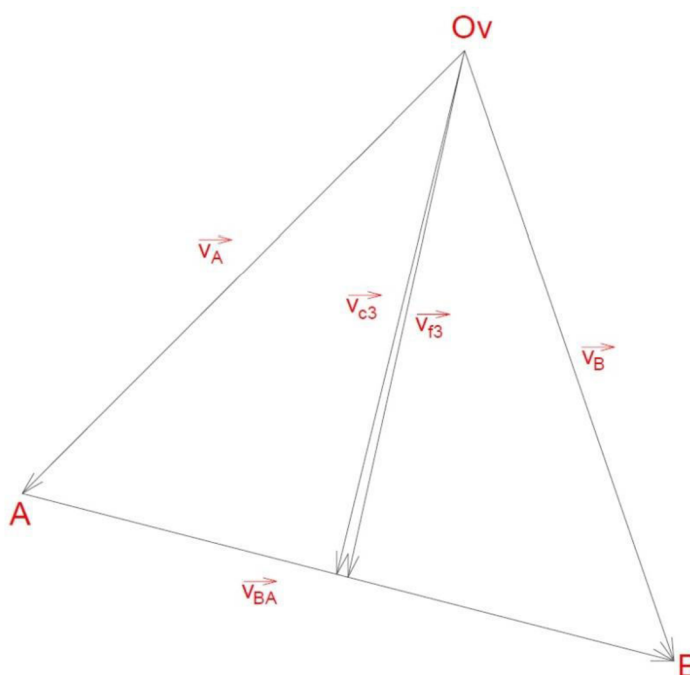
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA} \quad (214)$$



Obr. 53 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 225°

$$v_{BA} = 3,075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,3 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 9,0 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,0 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (215)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (216)$$

$$a_B^n = \frac{3,0^2}{0,53} = 16,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

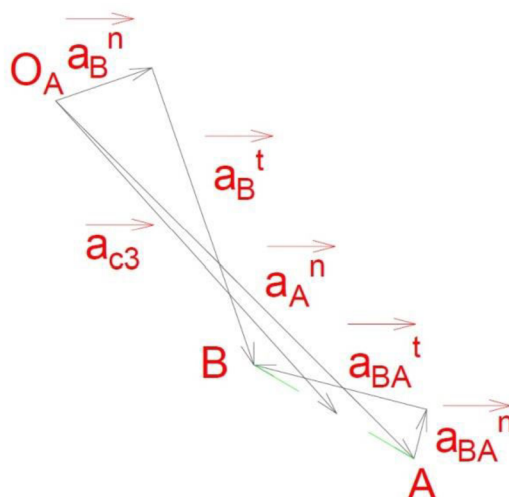
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (217)$$

$$a_{BA}^n = \frac{3,075^2}{1,15} = 8,22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (218)$$



Obr. 54 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 225°

$$a_{BA}^t = 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 2,8 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 6,9 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (219)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,0^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,5^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-1,775^2}{28,798^2} + 4,1 = 20,757 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 3,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 3,075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

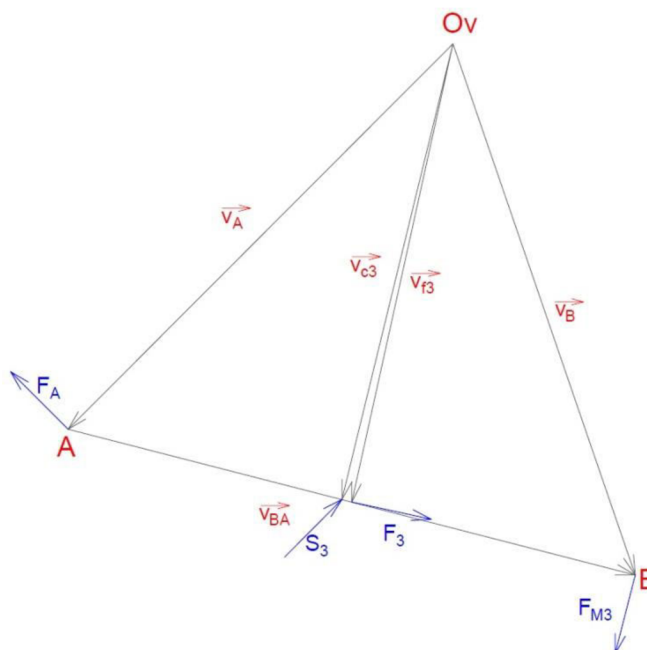
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 225^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (220)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 225^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 225^\circ}} = -1,775 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 55 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 225° s vynesáním sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí \$O_V\$:

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (221)$$

Kde: $h_3 = 5,7 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 10,1 \text{ cm}$$

Setrvačná síla \$S_3\$:

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} \text{ [N]} \quad (222)$$

$$S_3 = 2061,87.69 = 142269,03 \text{ N}$$

Síla \$F_{M3}\$:

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (223)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{28}{1,15^2} = 3357,25 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (224)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 142269,03 \cdot 5,7 + 3357,25 \cdot 12,3}{10,1} = -46496,88 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (225)$$

$$M_3 = M_{rov} = -46496,88 \cdot 0,1 = -4649,69 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 240°

Měřitko rychlostí:

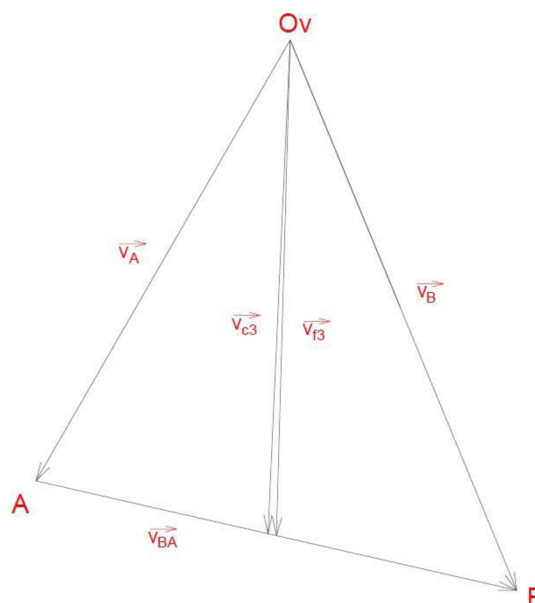
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overline{v}_B = \overline{v}_A + \overline{v}_{BA} \quad (226)$$

Obr. 56 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 240°

$$v_{BA} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,8 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 13,2 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 2,775 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,1 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (227)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (228)$$

$$a_B^n = \frac{3,3^2}{0,53} = 20,59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

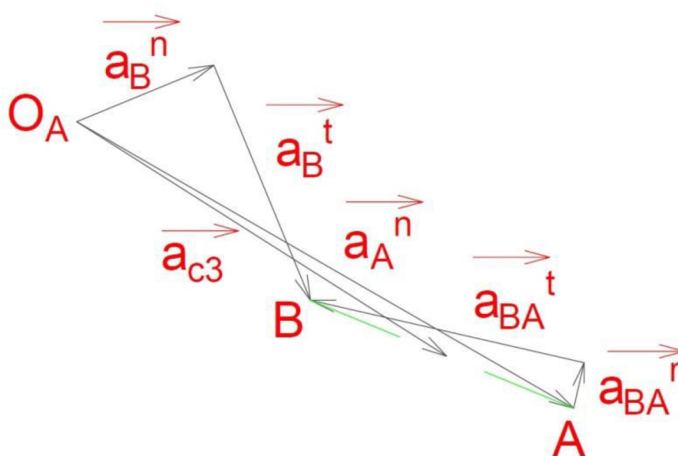
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (229)$$

$$a_{BA}^n = \frac{2,7^2}{1,15} = 6,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (230)$$



Obr. 57 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 240°

$$a_{BA}^t = 41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 4,1 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 6,2 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (231)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,3^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,775^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-1,256^2}{28,798^2} + 4,1 = 24,171 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 3,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 2,775 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

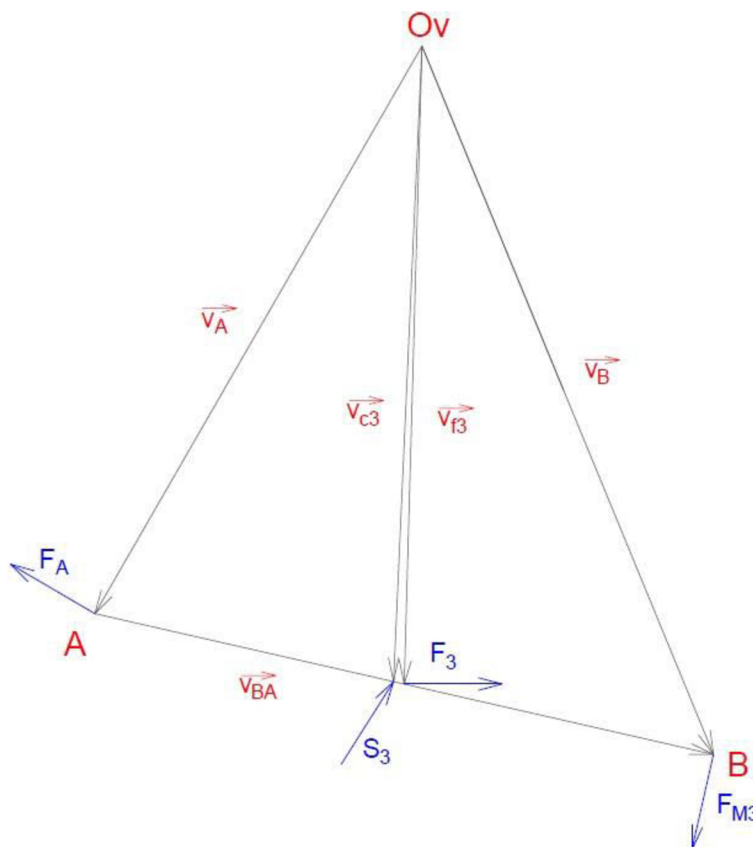
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 240^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (232)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 240^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 240^\circ}} = -1,256 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 58 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 240° s vynesemím sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (233)$$

Kde: $h_3 = 5,1 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 11,2 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} [N] \quad (234)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 62 = 127835,94 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (235)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{41}{1,15^2} = 4915,97 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (236)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128 \cdot 798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \overline{v_A} - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \overline{v_{BA}}}{\overline{v_{F_3}}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 127835,94 \cdot 5,1 + 4915,97 \cdot 10,8}{11,2} = -26683,03 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (237)$$

$$M_3 = M_{rov} = -26683,03 \cdot 0,1 = -2668,3 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 255°

Měřitko rychlostí:

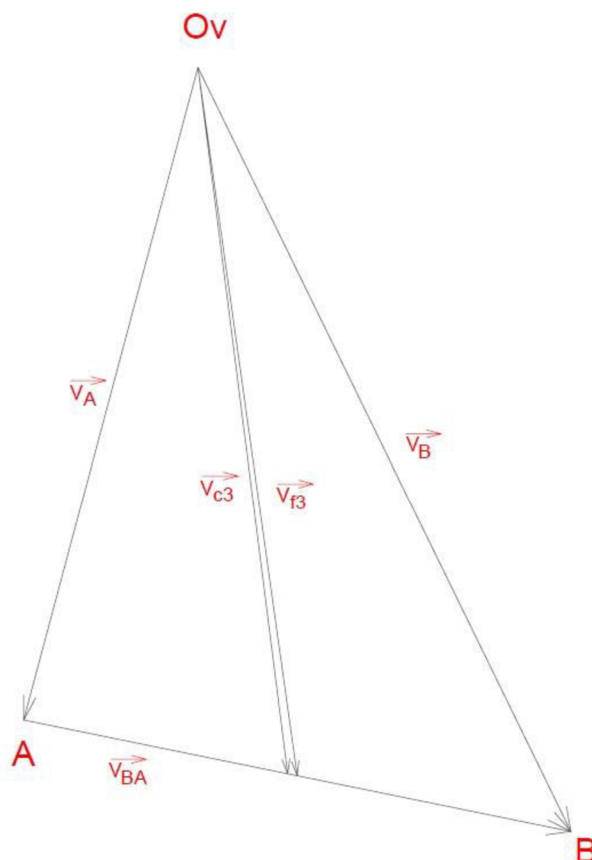
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v_A} = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overrightarrow{v_B} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{v_{BA}} \quad (238)$$

Obr. 59 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 255°

$$v_{BA} = 2,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 9,4 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 14,4 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 3,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,2 \text{ cm}$$

Měřítka zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (239)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (240)$$

$$a_B^n = \frac{3,6^2}{0,53} = 24,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

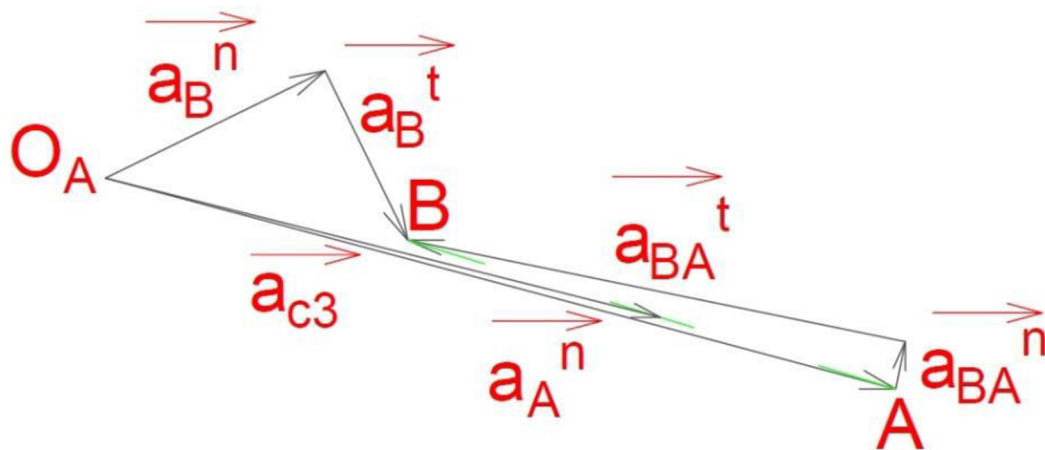
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (241)$$

$$a_{BA}^n = \frac{2,35^2}{1,15} = 4,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (242)$$



Obr. 60 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 255°

$$a_{BA}^t = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 5,0 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 5,2 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (243)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,6^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{3,05^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{-0,65^2}{28,798^2} + 4,1 = 28,051 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 2,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 3,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

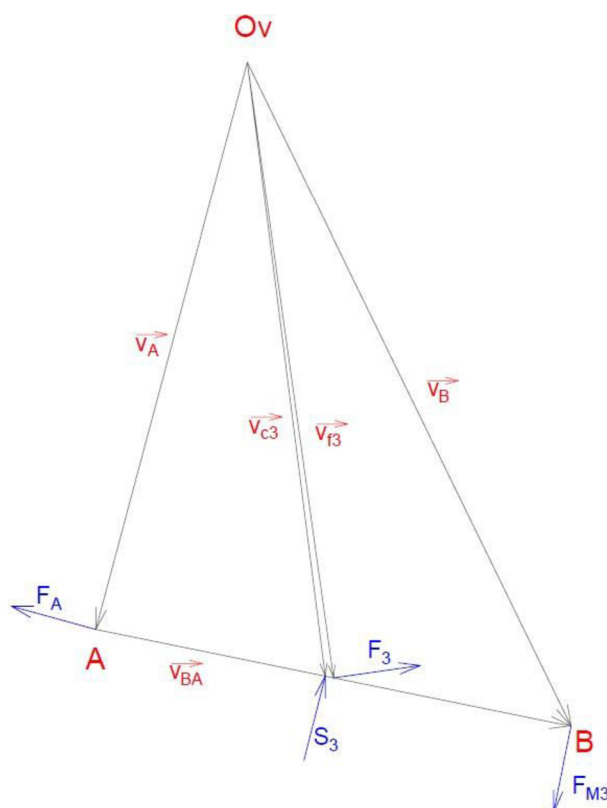
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 255^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (244)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 255^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 255^\circ}} = -0,65 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 61 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 255° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (245)$$

Kde: $h_3 = 4,2 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 12,3 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \quad [\text{N}] \quad (246)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 52 = 107217,24 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (247)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{50}{1,15^2} = 5995,09 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (248)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \overline{v_A} - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \overline{v_{BA}}}{\overline{v_{F_3}}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 107217,24 \cdot 4,2 + 5995,09 \cdot 9,4}{12,3} = -7637,22 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (249)$$

$$M_3 = M_{rov} = -7637,22 \cdot 0,1 = -763,72 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 270°

Měřitko rychlostí:

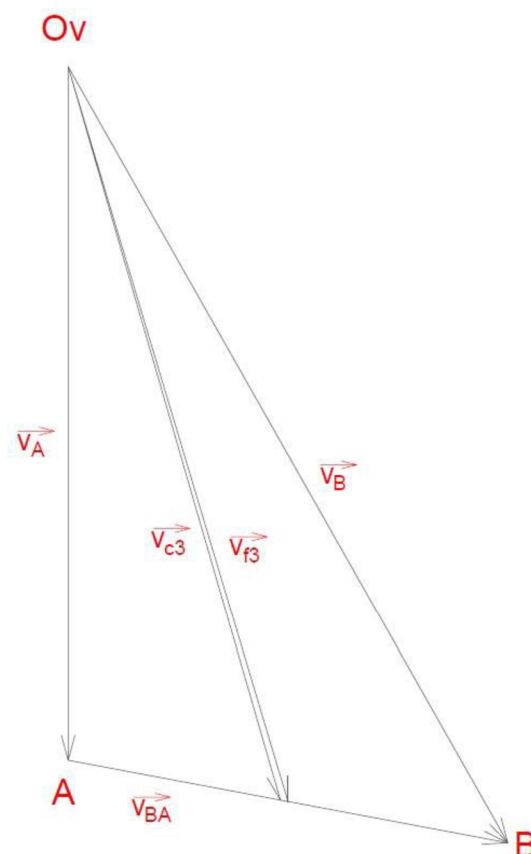
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v_A} = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overrightarrow{v_B} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{v_{BA}} \quad (250)$$



Obr. 62 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 270°

$$v_{BA} = 1,775 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 7,1 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,625 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 14,5 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 3,125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,5 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (251)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (252)$$

$$a_B^n = \frac{3,625^2}{0,53} = 24,93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

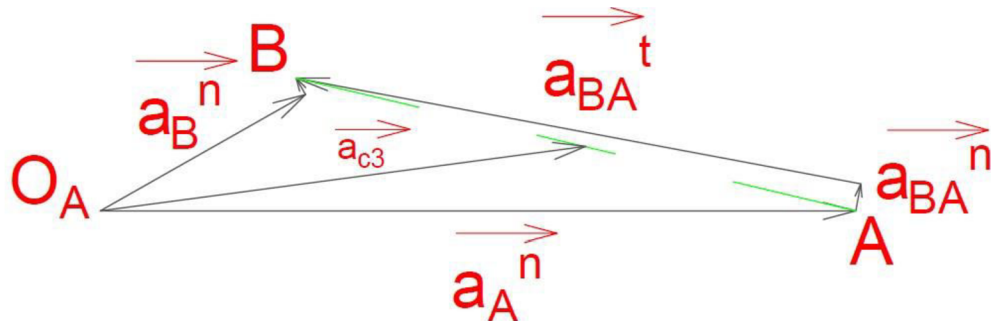
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (253)$$

$$a_{BA}^n = \frac{1,775^2}{1,15} = 2,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (254)$$



Obr. 63 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 270°

$$a_{BA}^t = 63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 6,3 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 5,4 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (255)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,625^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{3,125^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{0^2}{28,798^2} + 4,1 = 29,132 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 3,625 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 1,775 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 3,125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

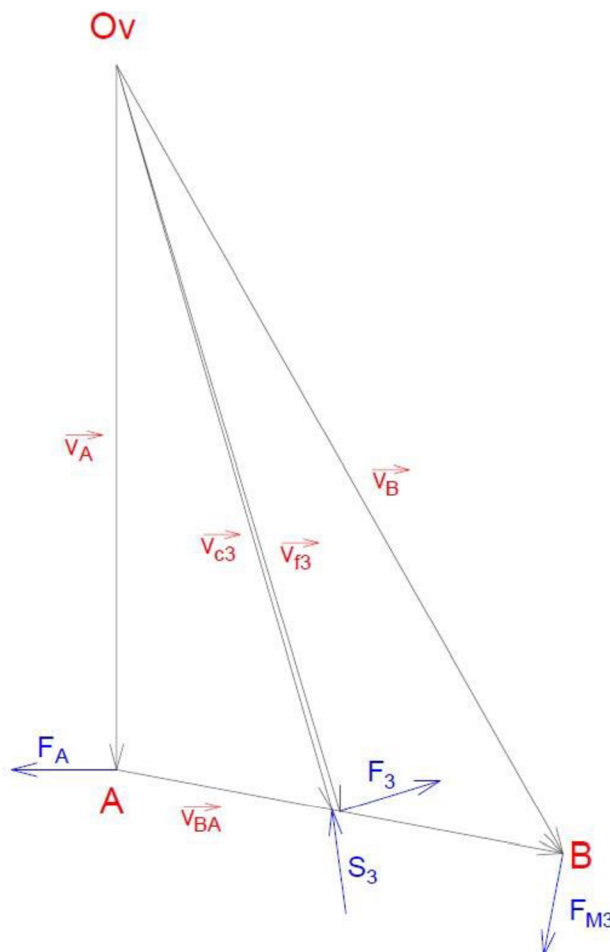
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 270^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (256)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 270^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 270^\circ}} = 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 64 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 270° s vynesím sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (257)$$

Kde: $h_3 = 1,7 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 12,6 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} [N] \quad (258)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 54 = 111340,98 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (259)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{63}{1,15^2} = 7553,81 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (260)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128 \cdot 798} = 26043,48 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 - 111340,98 \cdot 1,7 + 7553,81 \cdot 7,1}{12,6} = 13045,49 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (261)$$

$$M_3 = M_{rov} = 13045,49 \cdot 0,1 = 1304,55 Nm$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 285°

Měřitko rychlostí:

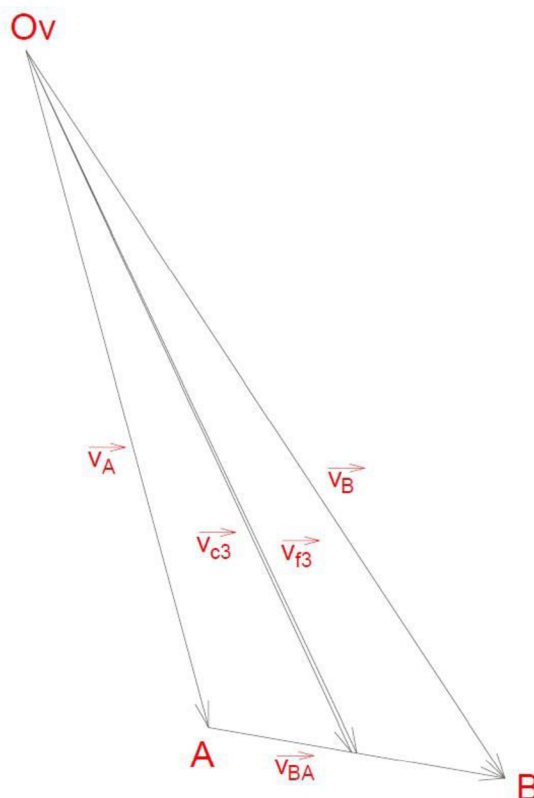
$$m_v = \frac{0,25 m \cdot s^{-1}}{cm}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 m \cdot s^{-1} \approx 11,52 cm$$

$$\overrightarrow{v}_B = \overrightarrow{v}_A + \overrightarrow{v}_{BA} \quad (262)$$

Obr. 65 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 285°

$$v_{BA} = 1,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 4,6 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,525 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 14,1 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 3,125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,5 \text{ cm}$$

Měřítka zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (263)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (264)$$

$$a_B^n = \frac{3,525^2}{0,53} = 23,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

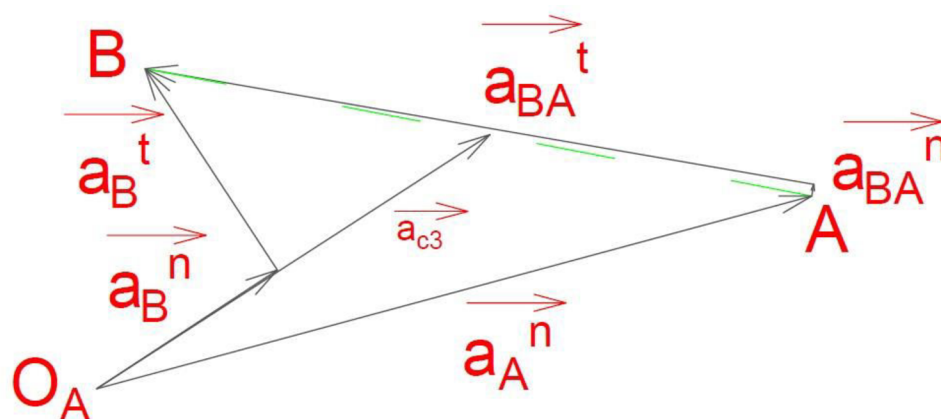
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (265)$$

$$a_{BA}^n = \frac{1,15^2}{1,15} = 1,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (266)$$



Obr. 66 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 285°

$$a_{BA}^t = 76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 7,6 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 5,3 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (267)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,525^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{3,125^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{0,65^2}{28,798^2} + 4,1 = 29,172 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 3,525 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 1,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 3,125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

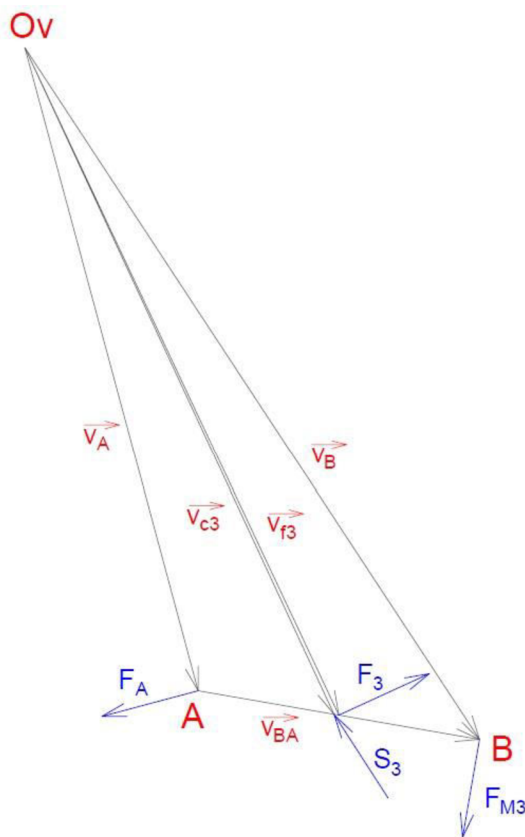
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 285^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (268)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 285^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 285^\circ}} = 0,65 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 67 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 285° s vynesáním sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \tilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \tilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \tilde{v}_{F3} = 0 \quad (269)$$

Kde: $h_3 = 2,1 \text{ cm}$

$$\tilde{v}_{F3} = 12,7 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \quad [N] \quad (270)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 53 = 109279,11 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (271)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{76}{1,15^2} = 9112,53 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (272)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128 \cdot 798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 109279,11 \cdot 2,1 + 9112,53 \cdot 4,6}{12,7} = 44994,06 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (273)$$

$$M_3 = M_{rov} = 44994,06 \cdot 0,1 = 4499,41 \text{ Nm}$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 300°

Měřitko rychlostí:

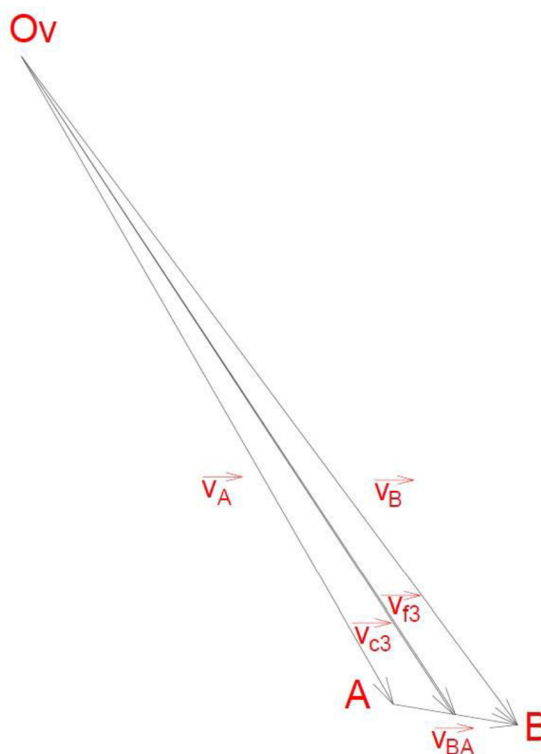
$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 11,52 \text{ cm}$$

$$\overrightarrow{v}_B = \overrightarrow{v}_A + \overrightarrow{v}_{BA} \quad (274)$$

Obr. 68 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 300°

$$v_{BA} = 0,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2,2 \text{ cm}$$

$$v_B = 3,225 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,9 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 3,025 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 12,1 \text{ cm}$$

Měřítka zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (275)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (276)$$

$$a_B^n = \frac{3,225^2}{0,53} = 19,66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

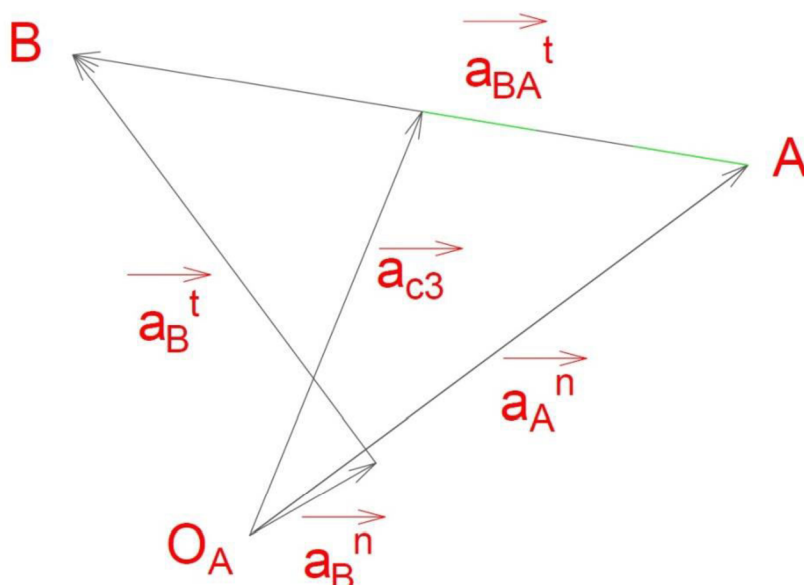
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [m \cdot s^{-2}] \quad (277)$$

$$a_{BA}^n = \frac{0,55^2}{1,15} = 0,26 m \cdot s^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (278)$$



Obr. 69 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 300°

$$a_{BA}^t = 88 m \cdot s^{-2} \approx 8,8 cm$$

$$a_{C3} = 55 m \cdot s^{-2} \approx 5,5 cm$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 [kg \cdot m^2] \quad (279)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{3,225^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{3,025^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{1,256^2}{28,798^2} + 4,1 = 27,748 kg \cdot m^2$$

$$v_4 = v_B = 3,225 m \cdot s^{-1}; v_3 = v_{BA} = 0,55 m \cdot s^{-1}$$

$$v_{C3} = 3,025 m \cdot s^{-1}; \omega_2 = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

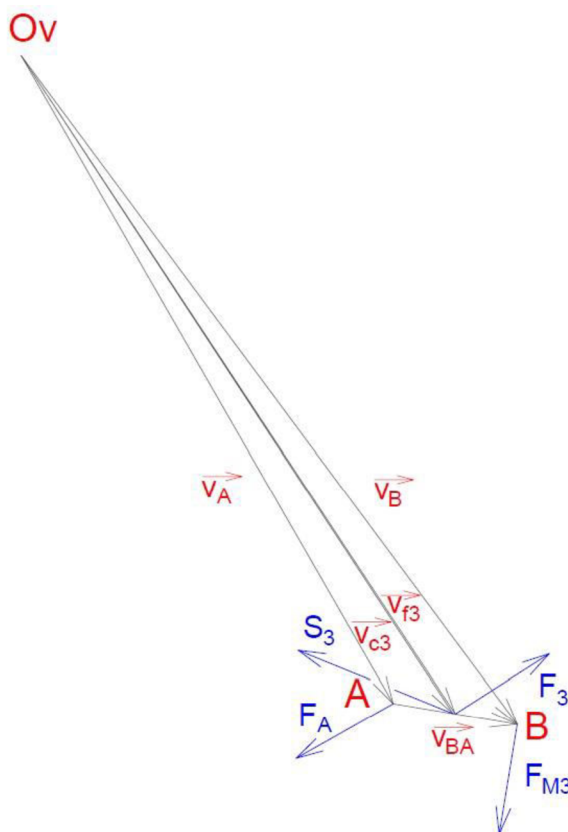
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 300^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (280)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 300^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 300^\circ}} = 1,256 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 70 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 300° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (281)$$

Kde: $h_3 = 5,4 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 12,2 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} \quad [\text{N}] \quad (282)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 55 = 113402,85 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (283)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{88}{1,15^2} = 10551,35 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (284)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128 \cdot 798} = 26043,48 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 113402,85 \cdot 5,4 + 10551,35 \cdot 2,2}{12,2} = 76689,28 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (285)$$

$$M_3 = M_{rov} = 76689,28 \cdot 0,1 = 7668,93 Nm$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 315°

Měřitko rychlostí:

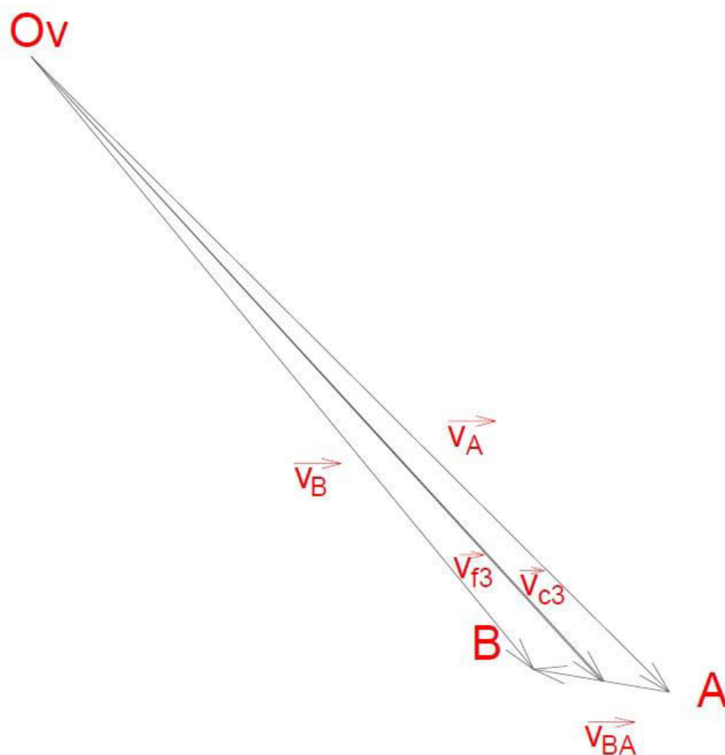
$$m_v = \frac{0,25 m \cdot s^{-1}}{cm}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 m \cdot s^{-1} \approx 11,52 cm$$

$$\overrightarrow{v}_B = \overrightarrow{v}_A + \overrightarrow{v}_{BA} \quad (286)$$



Obr. 71 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 315°

$$v_{BA} = 0,475 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 1,9 \text{ cm}$$

$$v_B = 2,675 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,7 \text{ cm}$$

$$v_{C3} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,8 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (287)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (288)$$

$$a_B^n = \frac{2,675^2}{0,53} = 13,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

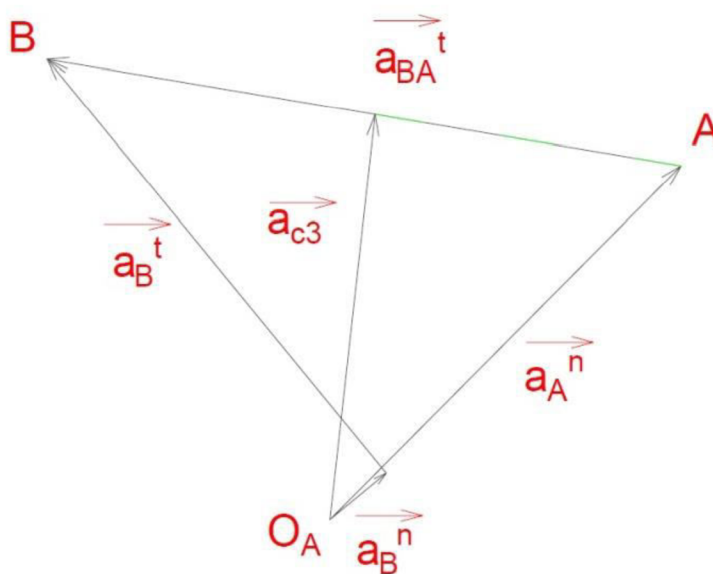
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (289)$$

$$a_{BA}^n = \frac{0,475^2}{1,15} = 0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (290)$$



Obr. 72 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 315°

$$a_{BA}^t = 101 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 10,1 \text{ cm}$$

$$a_{c3} = 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 7,0 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{c3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (291)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{2,675^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,7^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{1,775^2}{28,798^2} + 4,1 = 23,237 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 2,675 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 0,475 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{c3} = 2,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

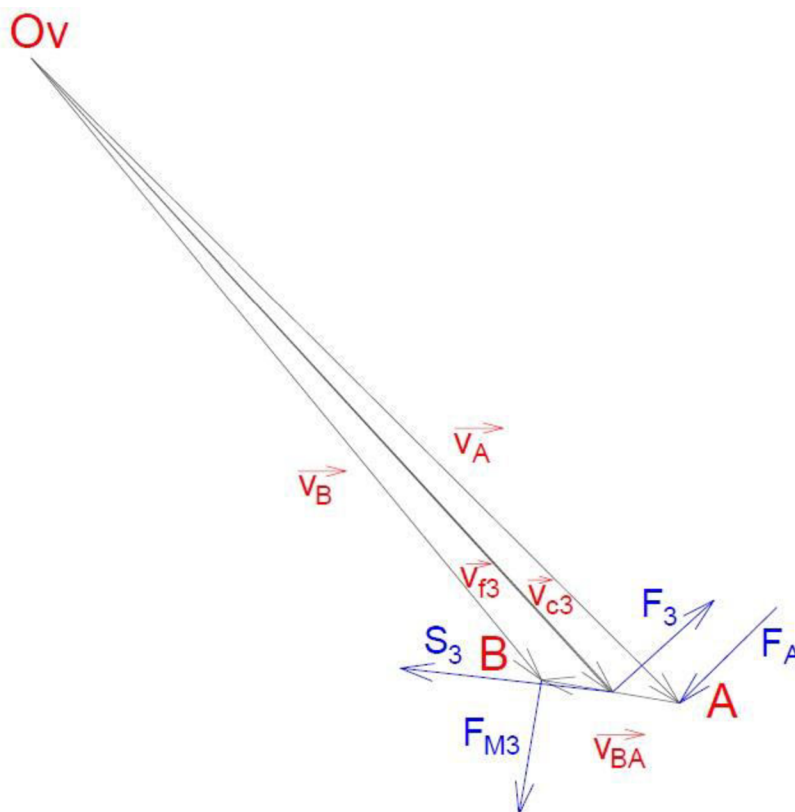
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 315^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (292)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 315^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 315^\circ}} = 1,775 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 73 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 315° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (293)$$

Kde: $h_3 = 6,8 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 10,6 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \quad [\text{N}] \quad (294)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 70 = 144330,90 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (295)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{101}{1,15^2} = 12110,07 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (296)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 144330,90 \cdot 6,8 + 12110,07 \cdot 1,9}{10,6} = 123064,16 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (297)$$

$$M_3 = M_{rov} = 123064,16 \cdot 0,1 = 12306,42 Nm$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 330°

Měřitko rychlostí:

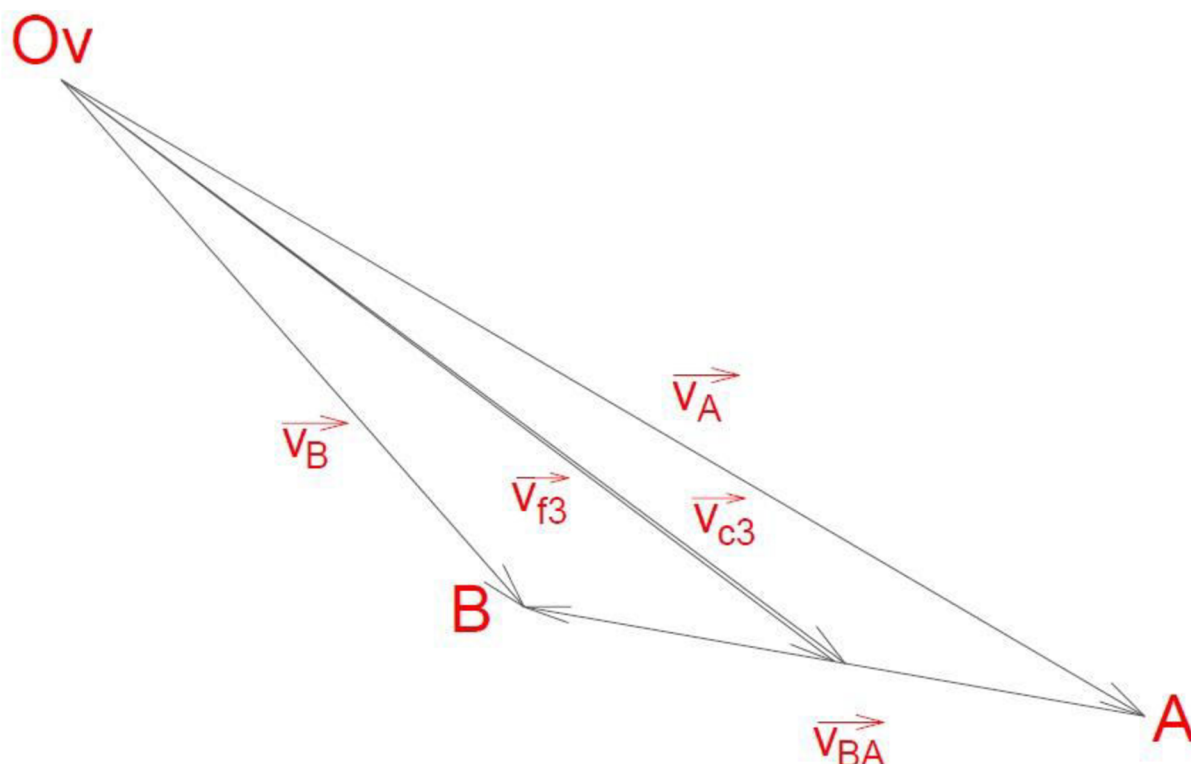
$$m_v = \frac{0,25 m \cdot s^{-1}}{cm}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

$$\overline{v}_A = 2,88 m \cdot s^{-1} \approx 11,52 cm$$

$$\overrightarrow{v}_B = \overrightarrow{v}_A + \overrightarrow{v}_{BA} \quad (298)$$



Obr. 74 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 330°

$$v_{BA} = 1,445 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 5,78 \text{ cm}$$

$$v_B = 1,6075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 6,43 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 2,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 8,96 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (299)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (300)$$

$$a_B^n = \frac{1,6075^2}{0,53} = 4,88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

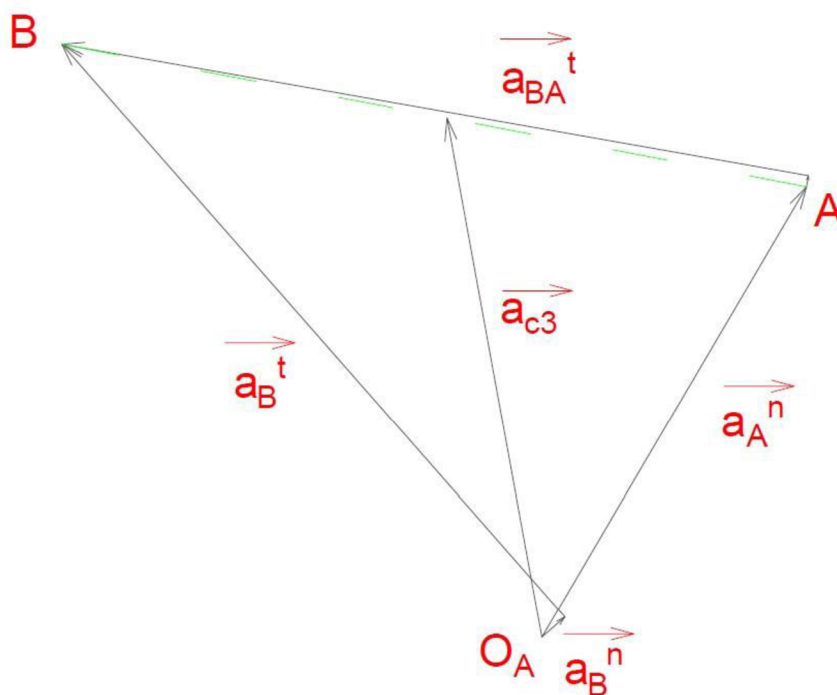
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{]} \quad (301)$$

$$a_{BA}^n = \frac{1,445^2}{1,15} = 1,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (302)$$



Obr. 75 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 330°

$$a_{BA}^t = 121 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 12,1 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 8,4 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad (303)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{1,6075^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,24^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{2,172^2}{28,798^2} + 4,1 = 17,625 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 1,6075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 1,445 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 2,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

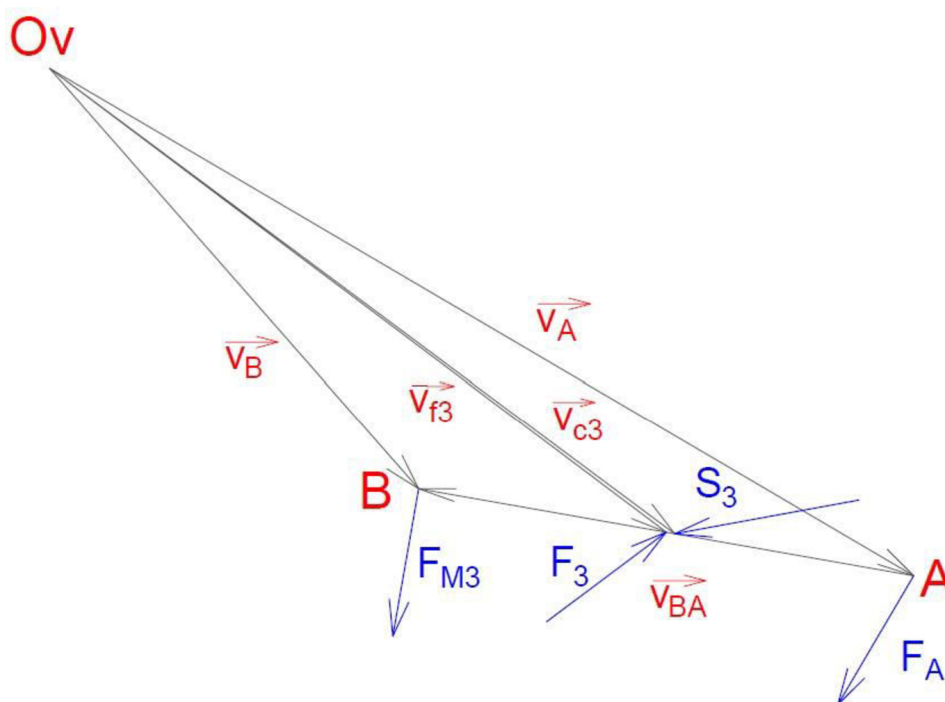
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 330^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (304)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 330^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 330^\circ}} = 2,172 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 76 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 330° s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0; F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (305)$$

$$\text{Kde: } h_3 = 6,6 \text{ cm}$$

$$\widetilde{v}_{F3} = 8,9 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} \text{ [N]} \quad (306)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 84 = 173197,08 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (307)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{121}{1,15^2} = 14508,11 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (308)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128 \cdot 798} = 26043,48 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \overline{v_A} + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \overline{v_{BA}}}{\overline{v_{F_3}}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 173197,08 \cdot 6,6 + 14508,11 \cdot 5,78}{8,9} = 171570,62 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (309)$$

$$M_3 = M_{rov} = 171570,62 \cdot 0,1 = 17157,06 Nm$$

Určení velikosti rovnovážného momentu pro natočení hřídele 345°

Měřitko rychlostí:

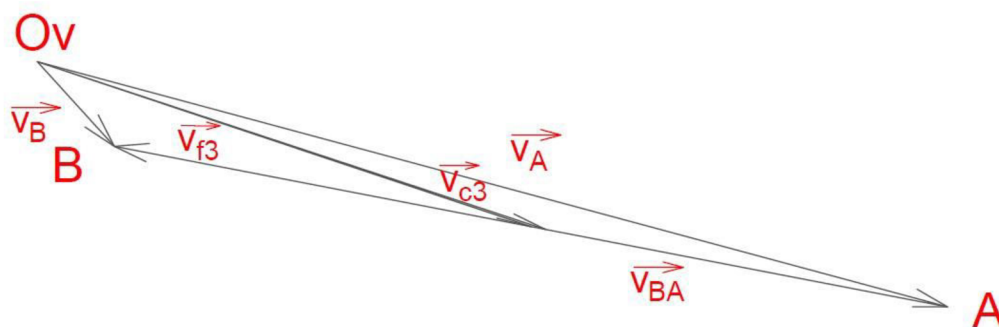
$$m_v = \frac{0,25 m \cdot s^{-1}}{cm}$$

Úhlová rychlost, rychlost bodu A, rovnice rychlostí:

$$\omega_{21} = 28,798 rad \cdot s^{-1}$$

$$\overline{v_A} = 2,88 m \cdot s^{-1} \approx 11,52 cm$$

$$\overrightarrow{v_B} = \overrightarrow{v_A} + \overrightarrow{v_{BA}} \quad (310)$$



Obr. 77 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 345°

$$v_{BA} = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 10,0 \text{ cm}$$

$$v_B = 0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 1,8 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 1,675 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 6,7 \text{ cm}$$

Měřítka zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (311)$$

$$a_A^n = \frac{2,88^2}{0,1} = 82,94 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (312)$$

$$a_B^n = \frac{0,45^2}{0,53} = 0,38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

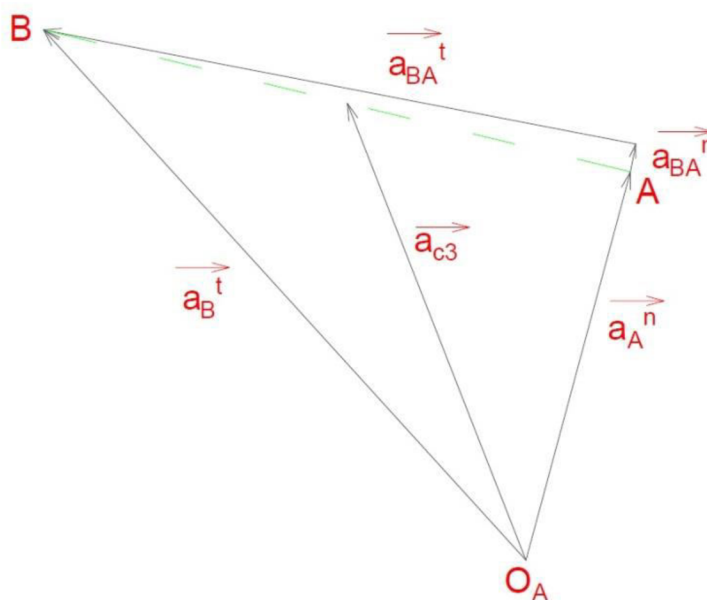
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (313)$$

$$a_{BA}^n = \frac{2,5^2}{1,15} = 5,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (314)$$



Obr. 78 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 345°

$$a_{BA}^t = 116 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 11,6 \text{ cm}$$

$$a_{C_3} = 95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 9,5 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C_3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (315)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{0,45^2}{28,798^2} + 2061,87 \cdot \frac{1,675^2}{28,798^2} + 158,57 \cdot \frac{2,42^2}{28,798^2} + 4,1 = 12,207 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C_3} = 1,675 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 28,798 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

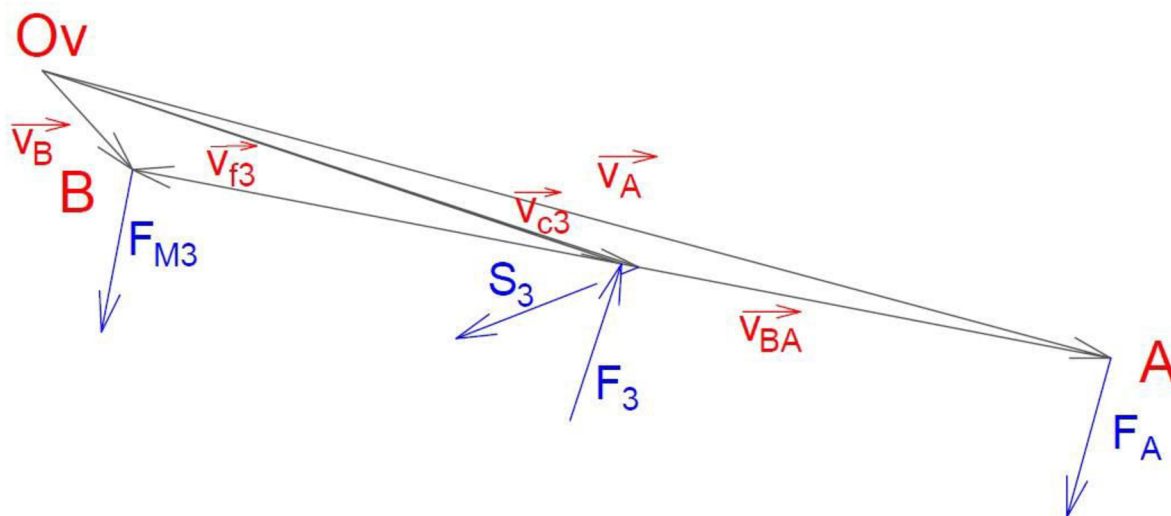
$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 345^\circ$$

$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (316)$$

$$\omega_3 = 28,798 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 345^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 345^\circ}} = 2,42 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 79 Schéma rychlostí pro natočení hřídele $345^\circ/\text{s}$ vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \widetilde{v}_{F3} = 0 \quad (317)$$

Kde: $h_3 = 4,3 \text{ cm}$

$$\widetilde{v}_{F3} = 6,5 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{C3} \text{ [N]} \quad (318)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 9,5 = 195877,65 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} \text{ [N]} \quad (319)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{116}{1,15^2} = 13908,6 \text{ N}$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} \text{ [N]} \quad (320)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,128,798} = 26043,48 \text{ N}$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A + S_3 \cdot h_3 + F_{M_3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{26043,48 \cdot 11,52 + 195877,65 \cdot 4,3 + 13908,6 \cdot 10,0}{6,5} = 197135,49 \text{ N}$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

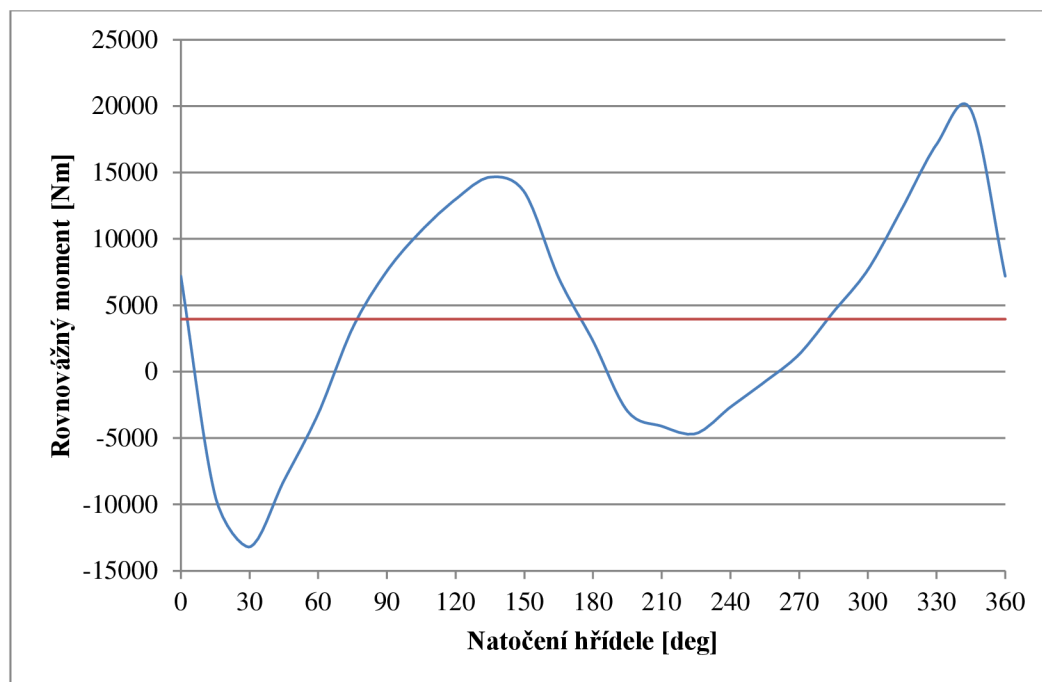
$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [\text{Nm}] \quad (321)$$

$$M_3 = M_{rov} = 197135,49 \cdot 0,1 = 19713,55 \text{ Nm}$$

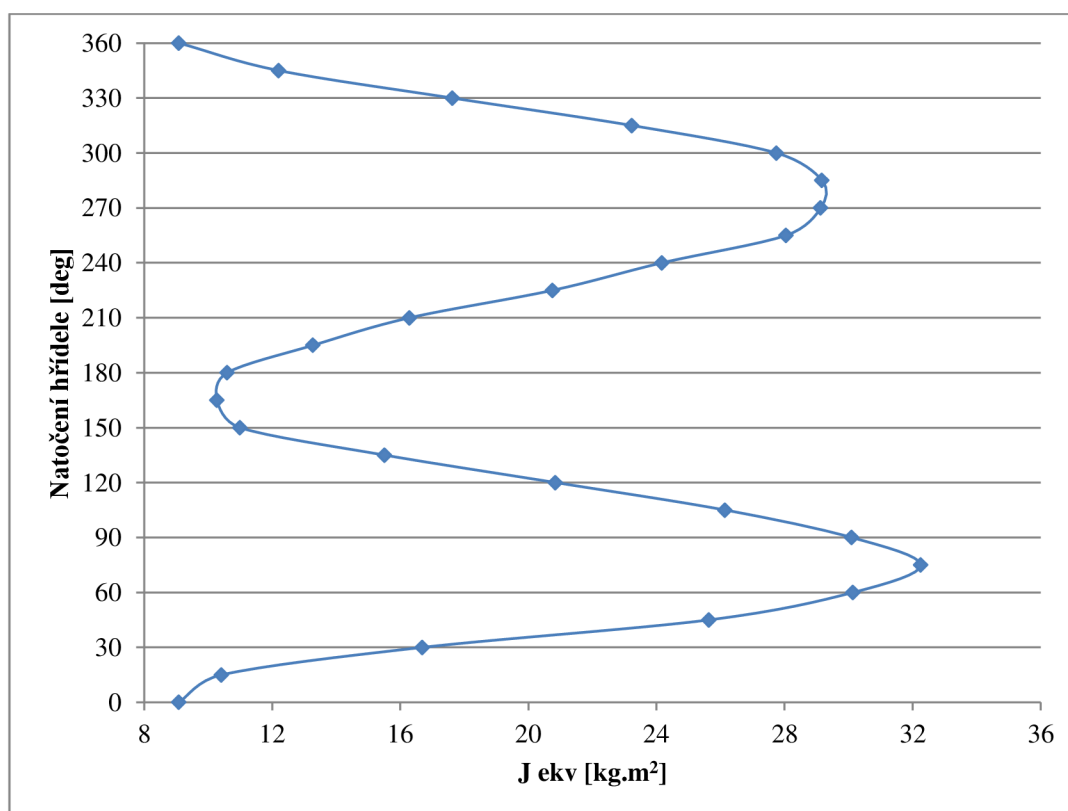
Shrnutí výsledků a vynesení závislostí ekvivalentních momentů setrvačnosti a rovnovážných momentů na úhlu natočení hnací hřídele

Tab. 2 Hodnoty ekvivalentního momentu setrvačnosti, rovnovážné síly a rovnovážného momentu pro jednotlivá natočení hnací hřídele

Úhel φ [deg]	J_{ekv} [kg.m ²]	F_3 [N]	M_{rov} [Nm]	Úhel φ [deg]	J_{ekv} [kg.m ²]	F_3 [N]	M_{rov} [Nm]
0	9,089	71917,23	7191,72	195	13,276	-29601,58	-2960,16
15	10,416	-93612,55	-9361,26	210	16,289	-41071,41	-4107,14
30	16,688	-131895,2	-13189,52	225	20,757	-46496,88	-4649,69
45	25,641	-82126,81	-8212,68	240	24,171	-26683,03	-2668,3
60	30,142	-31580,46	-3158,05	255	28,051	-7637,22	-763,72
75	32,254	32850,72	3285,07	270	29,132	13045,49	1304,55
90	30,103	75765,04	7576,5	285	29,172	44994,06	4499,41
105	26,145	106119,03	10611,9	300	17,748	76689,28	7668,93
120	20,852	129847,92	12984,79	315	13,237	123064,16	12306,42
135	15,511	146428,74	14642,87	330	17,625	171570,62	17157,06
150	10,991	135241,85	13524,19	345	12,207	197135,49	19713,55
165	10,273	70636,48	7063,65	360	9,089	71917,23	7191,72
180	10,592	23041,27	2304,13	-	-	-	-



Obr. 80 Graf závislosti velikosti rovnovážného momentu vůči úhlu natočení hřídele



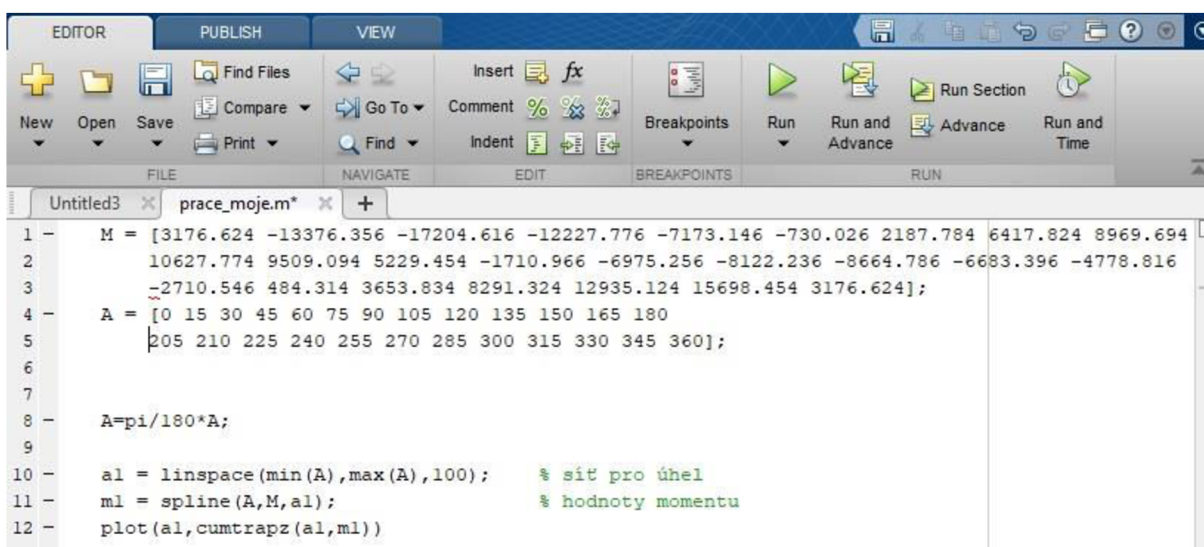
Obr. 81 Graf závislosti velikosti natočení hřídele na ekvivalentním momentu setrvačnosti

Výsledkem obou grafických závislostí by měly být hladké křivky. Toho je dosaženo u křivky ekvivalentního momentu setrvačnosti. U křivky rovnovážného momentu není úplné hladkosti dosaženo. Důvodem je zaokrouhlování hodnot a větší rozdíly absolutních hodnot jednotlivých

rovnovážných momentů v daných natočeních. Úplné hladkosti této křivky by mohlo být pravděpodobně dosaženo zvýšením počtu kroků výpočtu, např. výpočet hodnot rovnovážných momentů po 1 úhlovém stupni natočení hřídele.

2.2 URČENÍ KŘIVKY PRŮBĚHU PRÁCE GRAFICKOU INTEGRACÍ

K určení křivky průběhu práce se provede grafická integrace křivky závislosti rovnovážného momentu na úhlu natočení hřídele. Grafická integrace je provedena prostřednictvím programu MATLAB. Do skriptu programu jsou zadány hodnoty rovnovážného momentu zmenšené o hodnotu středního (průměrného) rovnovážného momentu a jim odpovídající hodnoty úhlu natočení hnací hřídele. Hodnoty úhlu jsou převedeny z úhlových stupňů na radiány. Následně je použita funkce `linspace` pro vytvoření sítování hodnot úhlu. Funkcí `spline` je poté zaručeno vykreslení hladké křivky hodnot. V posledním kroku je křivka vykreslena pomocí funkce `plot`, přičemž funkce `cumtrapz` slouží k provedení integrace trapézovou metodou. [5]



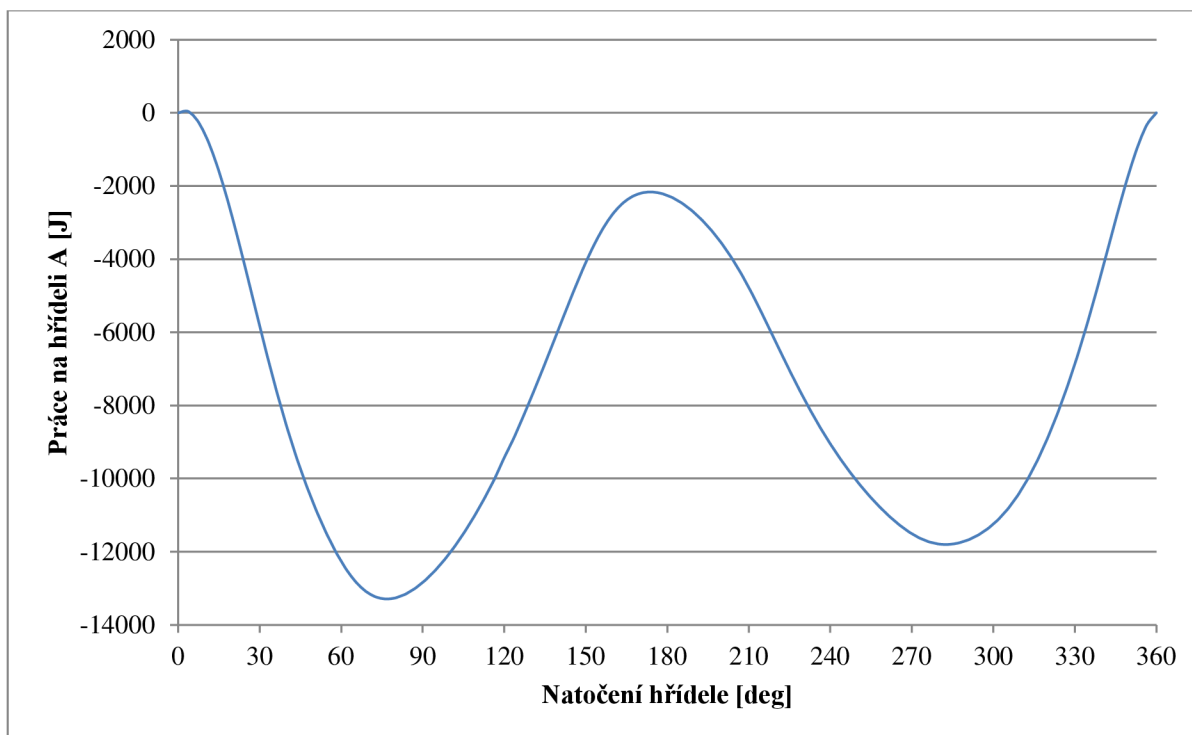
```

1 - M = [3176.624 -13376.356 -17204.616 -12227.776 -7173.146 -730.026 2187.784 6417.824 8969.694
2 - 10627.774 9509.094 5229.454 -1710.966 -6975.256 -8122.236 -8664.786 -6683.396 -4778.816
3 - -2710.546 484.314 3653.834 8291.324 12935.124 15698.454 3176.624];
4 - A = [0 15 30 45 60 75 90 105 120 135 150 165 180
5 - 205 210 225 240 255 270 285 300 315 330 345 360];
6
7
8 - A=pi/180*A;
9
10 - a1 = linspace(min(A),max(A),100); % sít pro úhel
11 - m1 = spline(A,M,a1); % hodnoty momentu
12 - plot(a1,cumtrapz(a1,m1))

```

Obr. 82 MATLAB skript pro provedení grafické integrace křivky[5]

Výstupem skriptu je hladká křivka závislosti velikosti práce na změně úhlového natočení hnací hřídele.



Obr. 83 Graf závislosti velikosti práce na hřídeli k úhlu natočení hřídele

Tab. 3 Velikost práce A na hřídeli pro jednotlivé úhly natočení hřídele

Úhel [deg]	Práce A [J]	Úhel [deg]	Práce A [J]	Úhel [deg]	Práce A [J]
0	0	135	-6854,79	270	-11503,86
15	-1605,21	150	-4101,23	285	-11784,71
30	-5822,99	165	-2401,10	300	-11238,86
45	-9727,07	180	-2263,72	315	-9677,82
60	-12251,84	195	-3112,59	330	-6864,20
75	-13270,13	210	-4778,50	345	-2936,78
90	-12835,66	225	-7038,91	360	0
105	-11502,94	240	-9049,97	-	-
120	-9430,26	255	-10523,23	-	-

2.3 VYNESENÍ VÝSLEDNÉHO GRAFU A URČENÍ VELIKOSTI MOMENTU SETRVAČNOSTI

Výsledný graf vzniká vynesáním křivky závislosti práce na hřídeli A vůči ekvivalentnímu momentu setrvačnosti J_{ekv} při stejných úhlech natočení hnací hřídele. K této křivce jsou vedeny tečny pod úhly φ_{min} a φ_{max} , které odpovídají požadované nerovnoměrnosti chodu stroje, v tomto případě $\delta = 0,09$. K určení úhlů φ_{min} a φ_{max} je zapotřebí znát měřítko ekvivalentního momentu setrvačnosti m_J a měřítko práce m_{AJ} . Na základě znalosti těchto úhlů je určena vzdálenost bodů A a B, která odpovídá kolmé vzdálenosti mezi tečnami při hodnotě vybraného ekvivalentního momentu setrvačnosti. V posledním kroku se určí moment setrvačnosti soustavy hřídel, řemenice a setrvačnick. [6]

$$tg \varphi_{min} = \frac{m_J}{2 \cdot m_{AJ}} \cdot \omega_{21}^2 \cdot (1 - \delta) \quad [-] \quad (322)$$

$$tg \varphi_{min} = \frac{2,632}{2.1834,86} \cdot 28,798^2 \cdot (1 - 0,09) = 0,541$$

Kde: m_J měřítko ekvivalentního momentu setrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$]

m_{AJ} měřítko práce [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$]

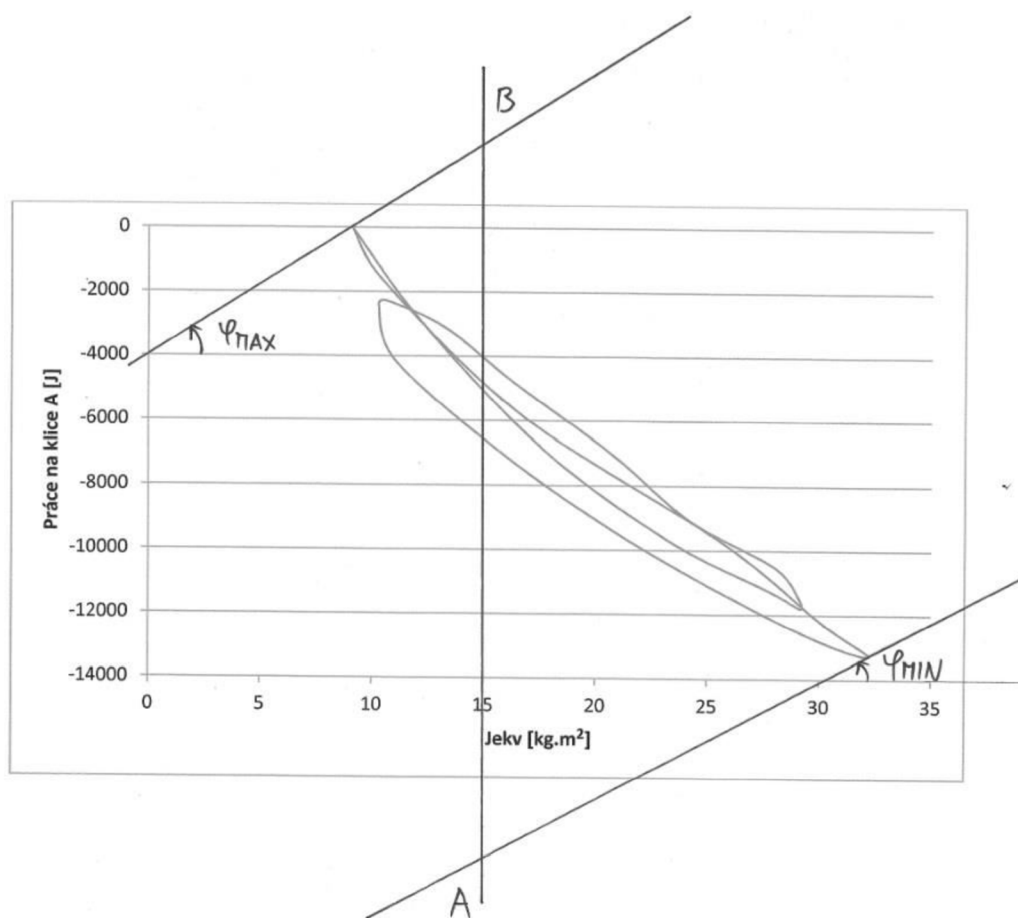
δ součinitel nerovnoměrnosti chodu [-]

$$tg \varphi_{max} = \frac{m_J}{2 \cdot m_{AJ}} \cdot \omega_{21}^2 \cdot (1 + \delta) \quad [-] \quad (323)$$

$$tg \varphi_{max} = \frac{2,632}{2.1834,86} \cdot 28,798^2 \cdot (1 + 0,09) = 0,648$$

$$\varphi_{min} \approx 28,4^\circ$$

$$\varphi_{max} \approx 32,95^\circ$$



Obr. 84 Výsledný graf pro $n = 275 \text{ min}^{-1}$ a $\delta = 0,09$

$$J_0 = \frac{m_{AJ} \cdot \overline{AB}}{\omega_{21}^2 \cdot \delta} - J_r \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad (324)$$

$$J_0 = \frac{1834,36 \cdot 12,05}{28,798^2 \cdot 0,09} - 15 = 281,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Kde: J_0 moment setrvačnosti sestavy hřídel, setrvačnick, řemenice [kg.m²]

\overline{AB} kolmá vzdálenost mezi tečnami [cm]

J_r vybraná hodnota ekvivalentního momentu setrvačnosti pro vynesení vertikální vzdálenosti mezi tečnami [kg.m²]

3 KONSTRUKČNÍ NÁVRH TVARU SETRVAČNÍKU

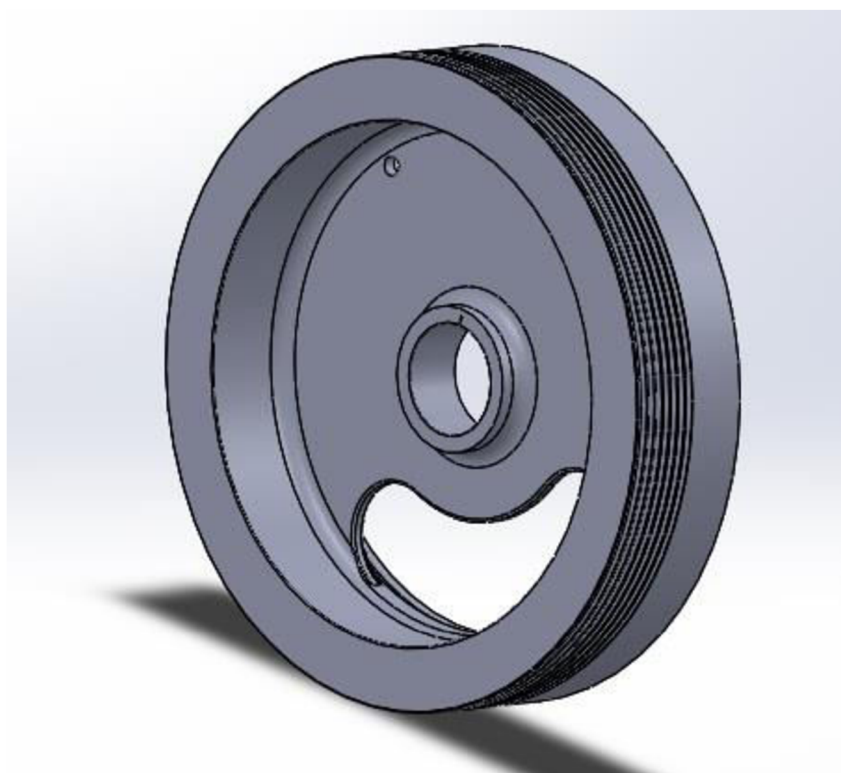
Při konstrukčním návrhu je navržen nejen setrvačnick, ale také řemenice. Materiál řemenice i setrvačnicku je 42 2643. Konstrukční návrh je proveden na základě tvaru současně využívané řemenice a setrvačnicku na drtiči DCJ 900x600. Nejsou změněny základní parametry rozměru setrvačnicku – např. průměr, tloušťka věnce. Změny momentu setrvačnosti je dosaženo zmenšením šířky věnce setrvačnicku a řemenice na hodnotu navrženou v předchozí kapitole. Zmenšením šířky věnce součástí je na nich dosaženo úspory materiálu a taktěž snížení hmotnosti součástí.

Tab. 4 Současné a navržené momenty setrvačnosti členů soustavy

	Současný	Navrhnutý
Moment setrvačnosti hřídele [kg.m ²]	4,1	4,1
Moment setrvačnosti setrvačnicku [kg.m ²]	147,51	112,75
Moment setrvačnosti řemenice [kg.m ²]	215,07	164,38

3.1 NÁVRH ŘEMENICE

Při návrhu řemenice je třeba ponechat průměr a taktěž dostatečnou šířku věnce pro řemenový převod. Navržená řemenice má přibližně o čtvrtinu menší moment setrvačnosti, než řemenice současná. Je u ní dosaženo zmenšení šířky věnce o 59 mm a úspory hmotnosti 194 kg.



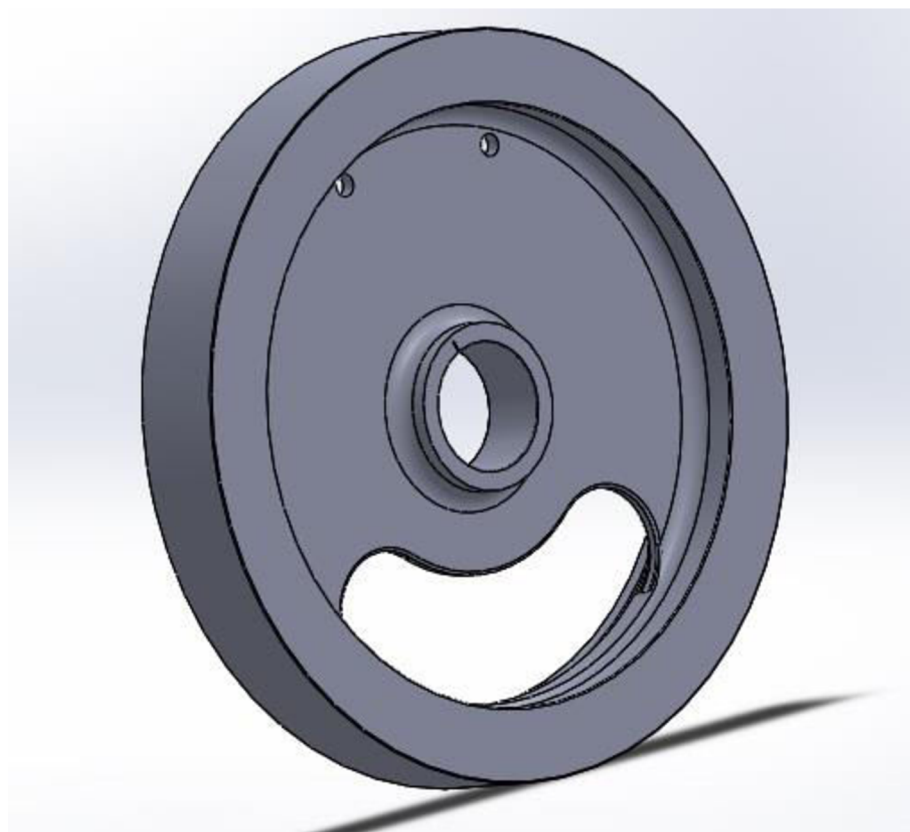
Obr. 85 Navržená řemenice pro DCJ 900x600

Tab. 5 Současné parametry a navržené parametry řemenice

	Současnost	Návrh
Moment setrvačnosti [kg.m ²]	215,07	165,11
Průměr [mm]	1160	1160
Tloušťka věnce [mm]	115	115
Šířka věnce [mm]	260	201
Hmotnost [kg]	860	686

3.2 NÁVRH SETRVAČNÍKU

Při návrhu setrvačnicku je ponechán průměr a taktéž tloušťka věnce setrvačnicku. Navržený setrvačnick má přibližně o čtvrtinu menší moment setrvačnosti, než setrvačnick současný. Je u něj dosaženo zmenšení šířky věnce o 42 mm a úspory hmotnosti 124 kg.



Obr. 86 Navržený setrvačnick pro DCJ 900x600

Tab. 6 Současné parametry a navržené parametry setrvačnicku

	Současnost	Návrh
Moment setrvačnosti [kg.m ²]	147,51	113,22
Průměr [mm]	1160	1160
Tloušťka věnce [mm]	115	115
Šířka věnce [mm]	165	123
Hmotnost [kg]	615	491

4 ANALÝZA ZMĚNY VELIKOSTI SETRVAČNÍKU PRO ZVÝŠENÉ PRACOVNÍ OTÁČKY

Analýza změny velikosti setrvačnicku je provedena pro součinitele nerovnoměrnosti chodu $\delta = 0,08$ a $\delta = 0,09$ a zvýšené pracovní otáčky $n = 320 \text{ min}^{-1}$. Ze základních vztahů pro převodový poměr je patrné, že se průměr, a tedy i moment setrvačnosti zmenšují při navýšení hodnoty pracovních otáček. Analýza je provedena Wittenbauerovou metodou, jejíž praktický postup je detailně popsán v kapitole 2. Zvýšením pracovních otáček dochází ke zvýšení rychlostí a zrychlení, a tím pádem také k navyšování rovnovážných sil a momentů. Schémata rychlostí a zrychlení a směry rovnovážných a setrvačných sil se ve většině případu natočení hnací hřídele nemění. Dochází pouze k navyšování absolutních hodnot.

Pro zvýšené pracovní otáčky $n = 320 \text{ min}^{-1}$ dochází ke změně směru zrychlení, setrvačných a rovnovážných sil pouze v úhlu natočení hnací hřídele 195° vzhledem ke schématům pro otáčky $n = 275 \text{ min}^{-1}$. V tomto natočení hřídele při otáčkách $n = 320 \text{ min}^{-1}$ působí síla F_{M3} opačným směrem, než při otáčkách $n = 275 \text{ min}^{-1}$.

Určení velikosti rovnovážného momentu při natočení hřídele 195° a otáčkách $n = 320 \text{ min}^{-1}$

Měřitko rychlostí:

$$m_v = \frac{0,25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{cm}}$$

Úhlová rychlost hřídele:

$$\omega_{21} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (325)$$

$$\omega_{21} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{320}{60} = 33,51 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost bodu A:

$$\overline{v}_A = \omega_{21} \cdot r_2 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (326)$$

$$\overline{v}_A = 33,51 \cdot 0,1 = 3,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 13,4 \text{ cm}$$

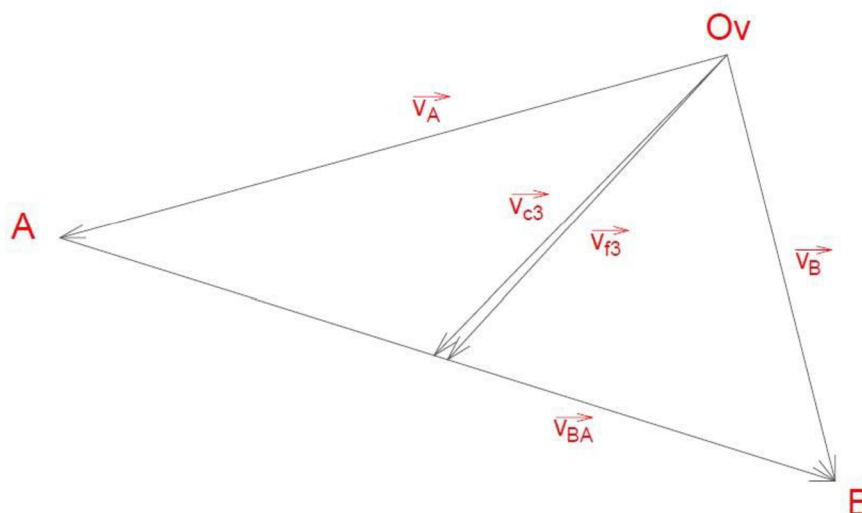
Rovnice rychlostí:

$$\overrightarrow{v}_B = \overrightarrow{v}_A + \overrightarrow{v}_{BA} \quad (327)$$

Úhlová rychlost hřídele, rychlost bodu A a rovnice rychlostí je pro všechna natočení hřídele konstantní při nezměněných otáčkách hřídele, tj. $n = 320 \text{ min}^{-1}$.

Kde: v_B rychlost bodu B [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_{BA} rychlost bodu B okolo A [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]



Obr. 87 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 195° a $n = 320 \text{ min}^{-1}$

$$v_{BA} = 3,9325 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 15,73 \text{ cm}$$

$$v_B = 2,1275 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 8,51 \text{ cm}$$

$$v_{c3} = 2,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 8,12 \text{ cm}$$

Měřitko zrychlení:

$$m_a = \frac{10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{cm}}$$

Normálové zrychlení bodu A:

$$a_A^n = \frac{v_A^2}{r_2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (328)$$

$$a_A^n = \frac{3,35^2}{0,1} = 112,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Normálové zrychlení bodu B:

$$a_B^n = \frac{v_B^2}{l_4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (329)$$

$$a_B^n = \frac{2,1275^2}{0,53} = 8,56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

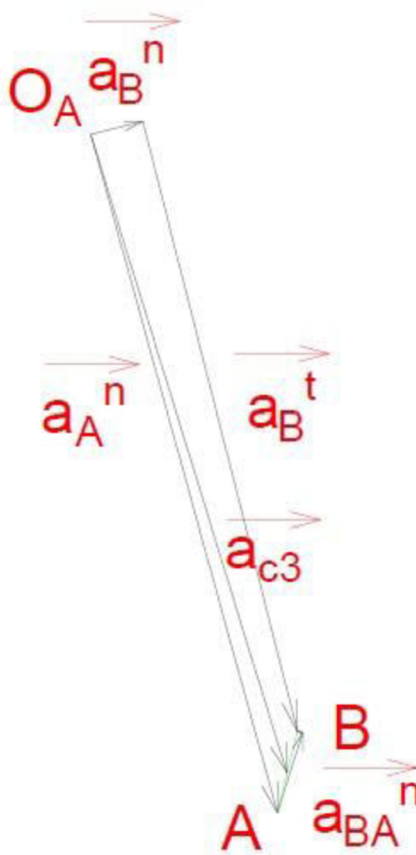
Normálové zrychlení B okolo A:

$$a_{BA}^n = \frac{v_{BA}^2}{l_3} [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (6)$$

$$a_{BA}^n = \frac{3,9325^2}{1,15} = 13,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Rovnice zrychlení:

$$\vec{a}_B^n + \vec{a}_B^t = \vec{a}_A^n + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^t \quad (330)$$



Obr. 88 Schéma zrychlení pro natočení hřídele 195° a $n = 320 \text{ min}^{-1}$

$$a_{BA}^t = 0,89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 0,09 \text{ cm}$$

$$a_{C3} = 106,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \approx 10,7 \text{ cm}$$

Výpočet ekvivalentního momentu setrvačnosti:

$$J_{ekv} = m_4 \cdot \frac{v_4^2}{\omega_2^2} + m_3 \cdot \frac{v_{C3}^2}{\omega_2^2} + J_3 \cdot \frac{\omega_3^2}{\omega_2^2} + J_2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (331)$$

$$J_{ekv} = 47,5 \cdot \frac{2,1275^2}{33,51^2} + 2061,87 \cdot \frac{2,03^2}{33,51^2} + 158,57 \cdot \frac{-2,8167^2}{33,51^2} + 4,1 = 12,995 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$v_4 = v_B = 2,1275 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; v_3 = v_{BA} = 3,9325 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{C3} = 2,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; \omega_2 = 33,51 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\lambda = \frac{r_2}{l_3} = \frac{100}{1150} = 0,087; \varphi = 195^\circ$$

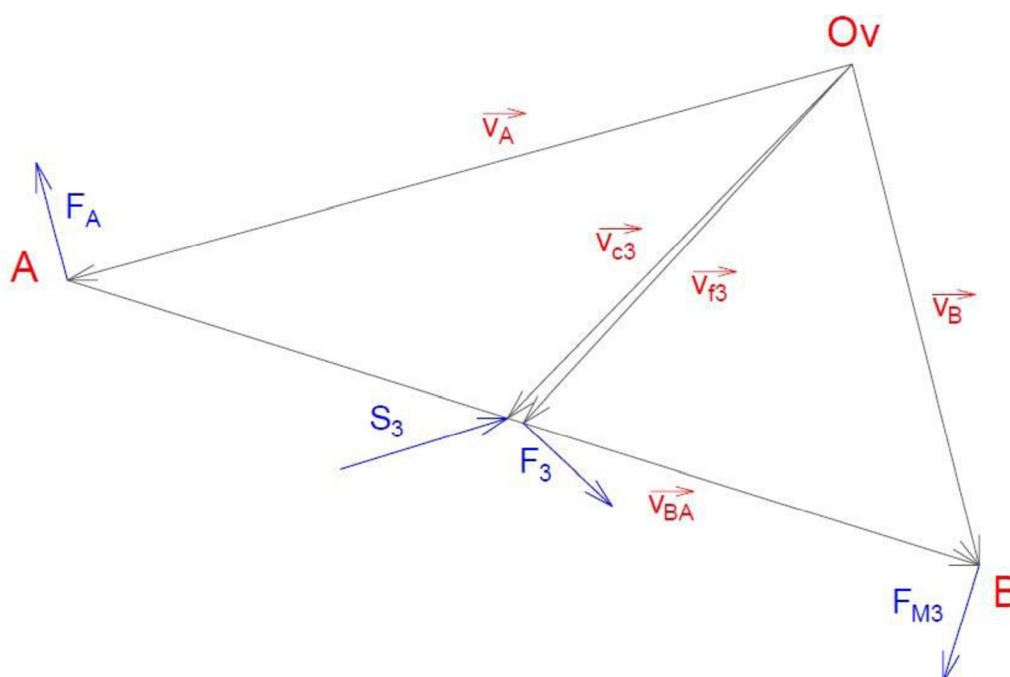
$$\omega_3 = \omega_2 \cdot \frac{\lambda \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (332)$$

$$\omega_3 = 33,51 \cdot \frac{0,087 \cdot \cos 195^\circ}{\sqrt{1 - 0,087^2 \cdot \sin^2 195^\circ}} = -2,8167 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$J_2 = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; J_3 = 158,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m_3 = 2061,87 \text{ kg}; m_4 = 47,5 \text{ kg}$$

Vynesení sil – Žukovského páka:



Obr. 89 Schéma rychlostí pro natočení hřídele 195° a $n = 320 \text{ min}^{-1}$ s vynesením sil

Momentová rovnováha k počátku rychlostí O_V :

$$\sum M_{O_V} = 0: F_A \cdot \tilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \tilde{v}_{BA} - F_3 \cdot \tilde{v}_{F3} = 0 \quad (333)$$

Kde: $h_3 = 3,9 \text{ cm}$

$$\tilde{v}_{F3} = 8,01 \text{ cm}$$

Setrvačná síla S_3 :

$$S_3 = m_3 \cdot a_{c3} \text{ [N]} \quad (334)$$

$$S_3 = 2061,87 \cdot 106,66 = 219919,05 \text{ N}$$

Síla F_{M3} :

$$F_{M3} = J_3 \cdot \frac{a_{BA}^t}{l_3^2} [N] \quad (335)$$

$$F_{M3} = 158,57 \cdot \frac{0,89}{1,15^2} = 106,71 N$$

Síla F_A :

$$F_A = \frac{P}{r_2 \cdot \omega_{21}} [N] \quad (336)$$

$$F_A = \frac{75000}{0,133,51} = 22381,38 N$$

Rovnovážná síla F_3 :

$$F_3 = \frac{F_A \cdot \widetilde{v}_A - S_3 \cdot h_3 + F_{M3} \cdot \widetilde{v}_{BA}}{\widetilde{v}_{F_3}} = \frac{22381,38 \cdot 13,4 - 219919,05 \cdot 3,9 + 106,71 \cdot 15,73}{8,01} = -69425,13 N$$

Rovnovážný moment vztažený na hřídel:

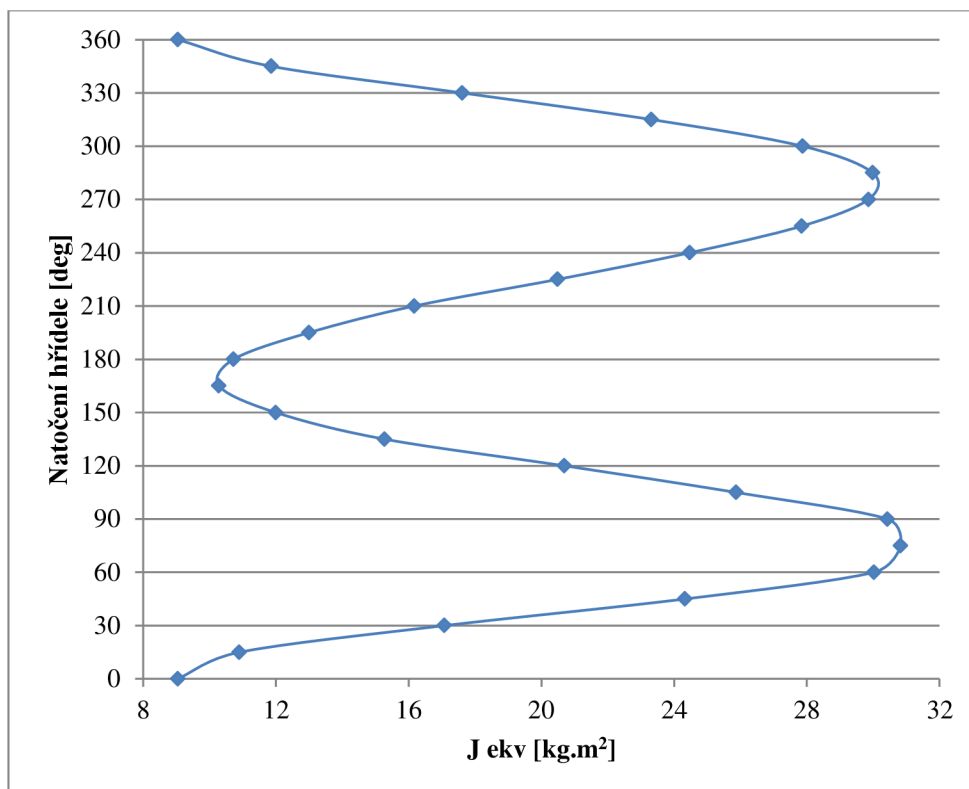
$$M_3 = M_{rov} = F_3 \cdot r_2 [Nm] \quad (337)$$

$$M_3 = M_{rov} = -69425,13 \cdot 0,1 = -6942,51 Nm$$

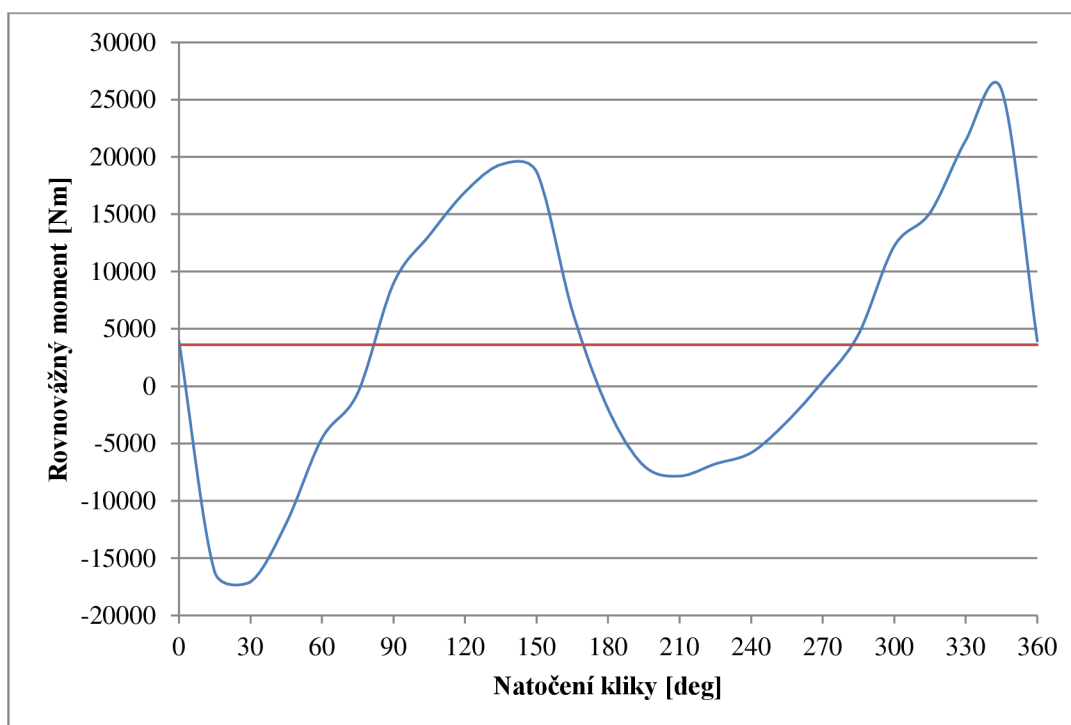
Přehled velikostí a grafických závislostí ekvivalentních momentů setrvačnosti, rovnovážných momentů a práce na hřídeli:

Tab. 7 Přehled rychlostí a ekvivalentních momentů pro pracovní otáčky $n = 320 \text{ min}^{-1}$

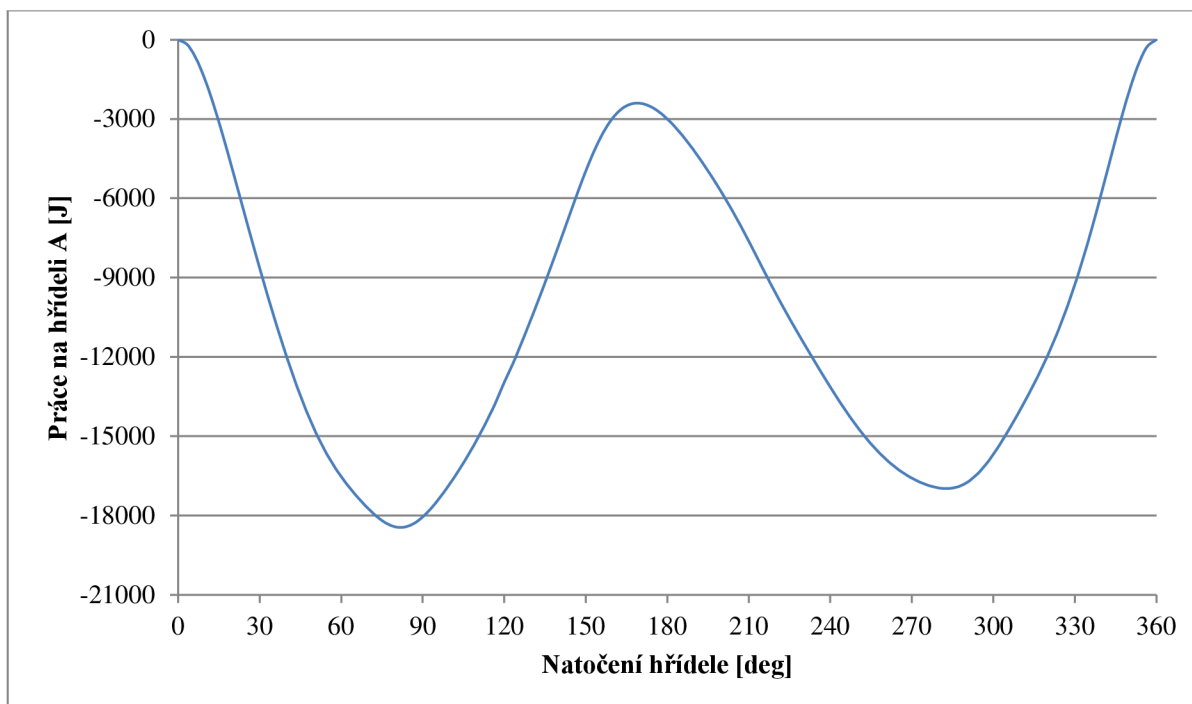
Úhel [deg]	J_{ekv} [kg.m ²]	M_{rov} [Nm]	A [J]	Úhel [deg]	J_{ekv} [kg.m ²]	M_{rov} [Nm]	A [J]
0	9,043	3946,8	0	195	12,995	-6942,51	-4967,69
15	10,899	-16208,69	-2799,84	210	16,175	-7840,02	-7623,54
30	17,081	-17064,46	-8639,49	225	20,490	-6778,38	-10546,85
45	24,332	-11957,59	-13458,64	240	24,475	-5805,77	-13139,09
60	30,021	-4544,36	-16401,98	255	27,845	-3100,29	-15288,28
75	30,827	-589,81	-18175,49	270	29,855	392,63	-16580,34
90	30,434	8969,61	-18041,27	285	29,984	4521,57	-16948,27
105	25,866	13152,81	-16006,56	300	27,871	12219,05	-15676,82
120	20,689	16935,79	-12965,85	315	23,318	15118,65	-13010,01
135	15,272	19324,90	-8184,43	330	17,615	21451,34	-9259,48
150	11,999	18695,53	-4984,86	345	11,865	25855,23	-3773,93
165	10,283	6571,02	-2522,85	360	9,043	3946,8	0
180	10,725	-1999,54	-3005,77	-	-	-	-



Obr. 90 Graf závislosti velikosti natočení hřídele na ekvivalentním momentu setrvačnosti



Obr. 91 Graf závislosti velikosti práce na hřídeli vůči úhlu natočení hřídele



Obr. 92 Graf závislosti velikosti práce na hřídeli k úhlu natočení hřídele

Výsledný výpočet a graf pro $\delta = 0,08$ a $n = 320 \text{ min}^{-1}$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\min} = \frac{m_J}{2 \cdot m_{AJ}} \cdot \omega_{21}^2 \cdot (1 - \delta) \quad (338)$$

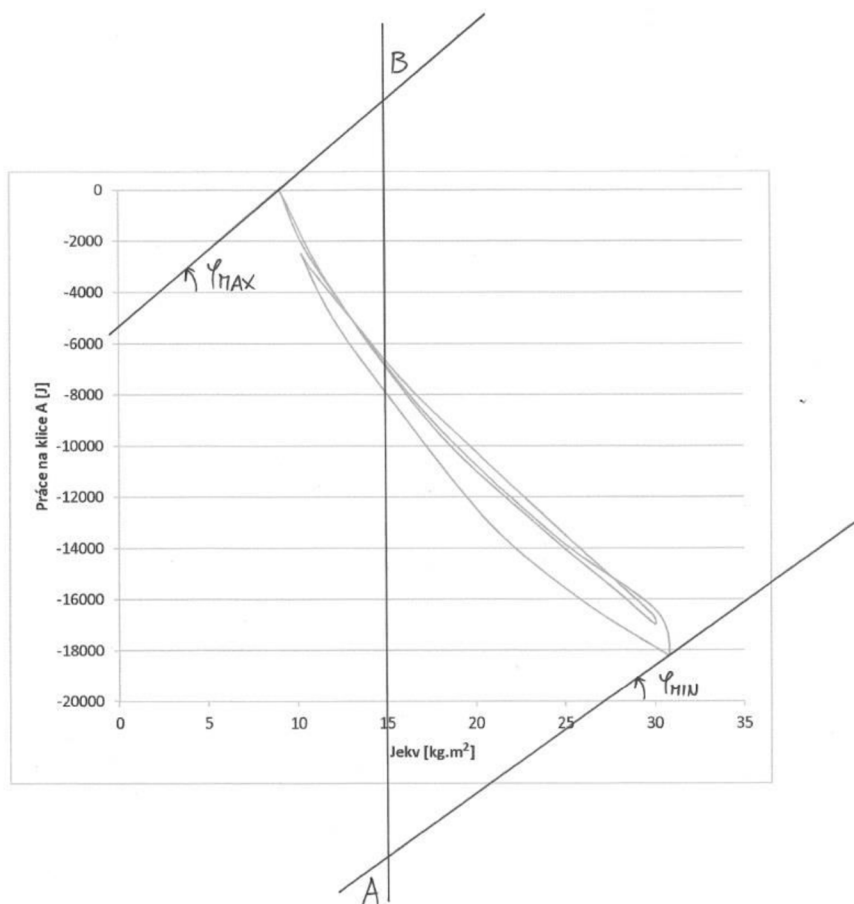
$$\operatorname{tg} \varphi_{\min} = \frac{2,632}{2.1834,86} \cdot 33,51^2 \cdot (1 - 0,08) = 0,741$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{m_J}{2 \cdot m_{AJ}} \cdot \omega_{21}^2 \cdot (1 + \delta) \quad (339)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{2,632}{2.1834,86} \cdot 33,51^2 \cdot (1 + 0,08) = 0,870$$

$$\varphi_{\min} \approx 36,5^\circ$$

$$\varphi_{\max} \approx 41,0^\circ$$

Obr. 93 Výsledný graf pro otáčky $n = 320 \text{ min}^{-1}$ a $\delta = 0,08$

$$J_0 = \frac{m_{AJ} \cdot \overline{AB}}{\omega_{21}^2 \cdot \delta} - J_r \text{ [kg.m}^2\text{]} \quad (340)$$

$$J_0 = \frac{1834,36 \cdot 16,0}{33,51^2 \cdot 0,08} - 15 = 313,8 \text{ kg.m}^2$$

$$J_{HŘÍDEL} = 4,1 \text{ kg.m}^2$$

$$J_{SETRVAČNÍK} = 125,99 \text{ kg.m}^2$$

$$J_{ŘEMENICE} = 183,71 \text{ kg.m}^2$$

Výsledný výpočet a graf pro $\delta = 0,09$ a $n = 320 \text{ min}^{-1}$

$$\text{tg } \varphi_{\min} = \frac{m_j}{2 \cdot m_A} \cdot \omega_{21}^2 \cdot (1 - \delta) \text{ [-]} \quad (341)$$

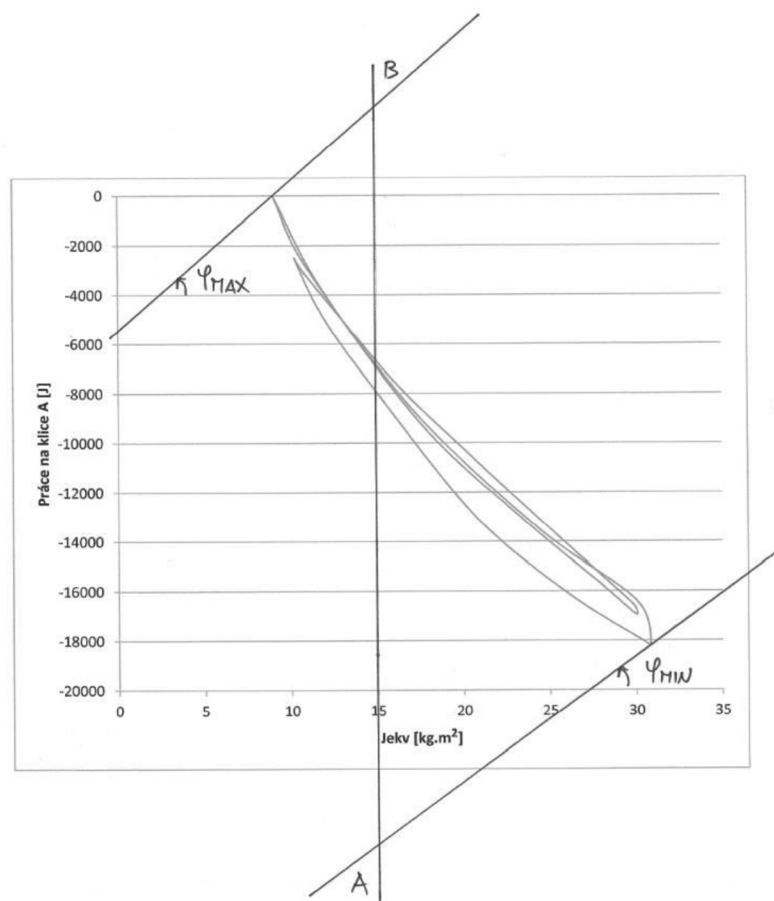
$$\text{tg } \varphi_{\min} = \frac{2,632}{2 \cdot 1834,86} \cdot 33,51^2 \cdot (1 - 0,09) = 0,733$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{m_J}{2 \cdot m_A} \cdot \omega_{21}^2 \cdot (1 + \delta) [-] \quad (342)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{2,632}{2 \cdot 1834,86} \cdot 33,51^2 \cdot (1 + 0,09) = 0,878$$

$$\varphi_{\min} \approx 36,2^\circ$$

$$\varphi_{\max} \approx 41,3^\circ$$



Obr. 94 Výsledný graf pro otáčky $n = 320 \text{ min}^{-1}$ a $\delta = 0,09$

$$J_0 = \frac{m_A \cdot \overline{AB}}{\omega_{21}^2 \cdot \delta} - J_r [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (343)$$

$$J_0 = \frac{1834,36 \cdot 16,1}{33,51^2 \cdot 0,09} - 15 = 277,23 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{\text{HŘÍDEL}} = 4,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{\text{SETRVAČNÍK}} = 111,12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{\text{ŘEMENICE}} = 162,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Interpretace výsledků

Při zvýšení provozních otáček z $n = 275 \text{ min}^{-1}$ na $n = 320 \text{ min}^{-1}$ při nezměněném součiniteli nerovnoměrnosti chodu drtiče dojde ke snížení momentu setrvačnosti soustavy hřídel, setrvačnick, řemenice. Tento pokles je v řádu jednotek kg.m^2 , což by v praxi znamenalo zmenšení šířky věnce setrvačnicku a řemenice v jednotkách milimetrů.

5 ANALÝZA ZMĚNY VELKOSTI SETRVAČNÍKU PŘI ZMĚNĚ NEROVNOMĚRNOSTI CHODU

Analýza změny velikosti setrvačnicku při změně součinitele nerovnoměrnosti chodu je provedena pro hodnoty $\delta = 0,05$ až $0,15$ po kroku $0,01$. Tato analýza je utvořena pro hodnoty otáček $n = 275 \text{ min}^{-1}$ a $n = 320 \text{ min}^{-1}$.

Analýza je provedena z důvodu problematičnosti volby součinitele δ . Dostupná literatura uvádí, že součinitel δ se pohybuje u drtičů v rozmezí $0,06$ až $0,2$. Dále je také uvedeno, že δ dosahuje hodnoty $0,05$ až $0,15$ pro pomaloběžné stroje a přibližně $0,01$ pro stroje rychloběžné. Z důvodu řazení čelistových drtičů mezi pomaloběžné stroje je použit rozsah zpracovaných δ $0,05$ až $0,15$. [1][6]

Nástrojem ke zpracování analýzy jsou výsledné grafy, které jsou získané Wittenbauerovou graficko - analytickou metodou v předchozích kapitolách, tedy výsledné grafy pro otáčky $n = 275 \text{ min}^{-1}$ a $n = 320 \text{ min}^{-1}$.

Pro současně využívaný setrvačnick a řemenici na drtiči DCJ 900x600 je využita hodnota δ přibližně $0,07$ získaná z reverzního výpočtu pro moment setrvačnosti soustavy hřídel, řemenice a setrvačnick:

$$J_{HŘÍDEL} = 4,1 \text{ kg.m}^2$$

$$J_{SETRVAČNÍK} = 147,51 \text{ kg.m}^2$$

$$J_{ŘEMENICE} = 215,07 \text{ kg.m}^2$$

$$J_0 = J_{HŘÍDEL} + J_{SETRVAČNÍK} + J_{ŘEMENICE} [\text{kg.m}^2] \quad (344)$$

$$J_0 = 4,1 + 147,51 + 215,07 = 366,68 \text{ kg.m}^2$$

$$J_0 = \frac{m_{AJ} \cdot \overline{AB}}{\omega_{21}^2 \cdot \delta} - J_r [\text{kg.m}^2] \quad (345)$$

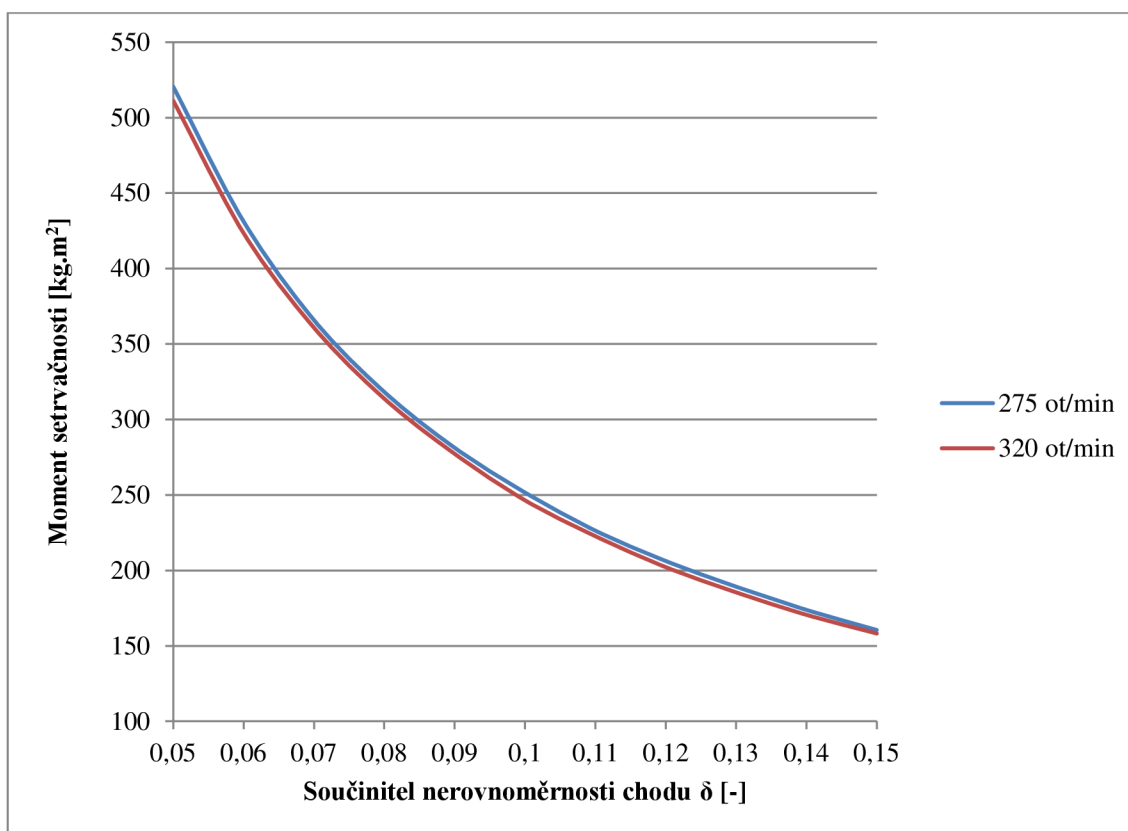
Úpravou:

$$\delta = \frac{m_{AJ} \cdot \overline{AB}}{\omega_{21}^2 \cdot (J_0 + J_r)}$$

$$\delta = \frac{1834,86 \cdot 12,1}{28,798^2 \cdot (366,68 + 15)} = 0,07$$

Tab. 8 Přehled výsledných momentů setrvačnosti soustavy hřídel, řemenice a setrvačnik v závislosti na změně součinitele nerovnoměrnosti chodu δ

δ	$n = 275 \text{ min}^{-1}$				$n = 320 \text{ min}^{-1}$			
	φ_{\min}	φ_{\max}	\overline{AB}	J_o	φ_{\min}	φ_{\max}	\overline{AB}	J_o
[-]	[deg]	[deg]	[cm]	[kg.m ²]	[deg]	[deg]	[cm]	[kg.m ²]
0,05	29,5	32,0	12,1	520,42	37,4	40,2	16,1	511,15
0,06	29,2	32,2	12,1	431,18	37,1	40,5	16,1	423,46
0,07	28,95	32,5	12,05	365,86	36,8	40,75	16,1	360,82
0,08	28,7	32,7	12,05	318,25	36,5	41	16,1	313,80
0,09	28,4	32,95	12,05	281,23	36,2	41,3	16,1	277,23
0,10	28,2	33,2	12,05	251,60	35,9	41,5	16,0	246,44
0,11	27,9	33,4	12,0	226,36	35,6	41,8	16,0	222,67
0,12	27,6	33,7	12,0	206,25	35,3	42,05	15,95	202,19
0,13	27,4	33,9	12,0	189,23	35,0	42,3	15,95	185,48
0,14	27,1	34,1	11,95	173,85	34,7	42,55	15,9	170,58
0,15	26,8	34,4	11,9	160,52	34,4	42,8	15,9	158,20



Obr. 95 Graf závislosti momentu setrvačnosti na součiniteli nerovnoměrnosti chodu

Interpretace výsledků analýzy

Změnou součinitele nerovnoměrnosti chodu δ dochází k daleko výraznější změně hodnoty momentu setrvačnosti soustavy než při změně pracovních otáček. Zvyšováním hodnoty součinitele δ se snižuje velikost momentu setrvačnosti soustavy. Při zvyšování δ o 0,01 v intervalu 0,05 až 0,15 dochází ke změně momentu setrvačnosti soustavy v desítkách $\text{kg}\cdot\text{m}^2$. Přičemž, čím vyšší je absolutní hodnota součinitelů, tím dochází k menší změně momentu setrvačnosti soustavy.

ZÁVĚR

V první kapitole mé diplomové práce je proveden přehled metod pro výpočet velikosti setrvačnicků pracovních strojů. Vysvětleny jsou dvě metody pro výpočet setrvačnicků – pomocí pohybové rovnice stroje a Wittenbauerova graficko-analytická metoda.

Ve druhé kapitole je vysvětlen a po jednotlivých krocích proveden výpočet velikosti setrvačnicku Wittenbauerovou graficko-analytickou metodou. V prvním kroku je proveden výpočet všech rychlostí a zrychlení kinematického schématu ve 25 polohách natočení hnací hřídele. V kroku druhém je spočítána velikost ekvivalentního momentu setrvačnosti ke vztažnému členu (hnací hřídeli) pro každou polohu natočení hnací hřídele. Pomocí metody Žukovského páky je určen moment vnějších sil vztažený na hnací hřídel. Pro provedení této metody je třeba znát kromě rychlostí a zrychlení také hodnoty jednotlivých sil působících na drtič, např. setrvačné síly. Prvotním výstupem řešení Wittenbauerovou metodou je grafické vynesení závislosti rovnovážného momentu na úhlu natočení hřídele a ekvivalentního momentu setrvačnosti na úhlu natočení hřídele. Následně je provedena grafická integrace křivky rovnovážného momentu, tzn. je určena jeho střední hodnota a vyneseny příslušné velikosti ploch, z čehož vzniká křivka práce drtiče. V dalším kroku je vykreslen výsledný graf závislosti práce na hnací hřídeli a ekvivalentního momentu setrvačnosti, ke kterému jsou vyneseny tečny, které jsou určeny výpočtem úhlu jejich sklonu φ_{\max} a φ_{\min} . Konečně je spočítán moment setrvačnosti sestavy hřídel, řemenice a setrvačnick a určen moment setrvačnosti vypočteného setrvačnicku.

Třetí kapitola práce je věnována konstrukčnímu návrhu setrvačnicku a řemenice. Návrh je proveden na základě současně používaných setrvačnicku a řemenice u drtiče DCJ 900x600. Řešení je dosaženo pomocí zmenšení momentu setrvačnosti současného setrvačnicku a řemenice na hodnoty získané výpočtem ve druhé kapitole. Výsledkem je zúžení věnce řemenice o 59 mm a věnce setrvačnicku o 42 mm, taktéž je dosaženo úspory hmotnosti 194 kg u řemenice, respektive 124 kg u setrvačnicku.

V poslední části diplomové práce jsou provedeny analýzy změny velikosti setrvačnicku při změně dvou parametrů – nejprve zvýšení pracovních otáček, následně změně součinitele nerovnoměrnosti chodu drtiče δ . Velikost navýšení pracovních otáček je z 275 min^{-1} na 320 min^{-1} . Při navýšení otáček dochází ke snížení momentu setrvačnosti sestavy hřídel, řemenice a setrvačnick, v případě DCJ 900x600 jde o jednotky kg.m^2 . Analýza změny velikosti setrvačnicku při změně součinitele nerovnoměrnosti chodu δ je provedena v intervalu δ 0,05 až 0,15. Z analýzy lze vyčíst, že při zvyšování součinitele nerovnoměrnosti chodu drtiče δ dochází ke snižování momentu setrvačnosti sestavy v desítkách kg.m^2 .

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠKOPÁN, Miroslav. *Aplikovaná mechanika stavebních a transportních strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009. [cit. 23. 1. 2019].
- [2] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] RESTA s.r.o. Přerov. *Webové stránky společnosti RESTA s.r.o. Přerov* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.resta.cz/o-nas.aspx>
- [4] RESTA s.r.o. Přerov. *Webové stránky společnosti RESTA s.r.o. Přerov* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.resta.cz/vyroba-drticich-a-tridicich-zarizeni/kusove-stroje/celistove.aspx>
- [5] Matlab Answers. *MathWorks* [online]. 2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/458222-how-can-i-make-a-graphical-integration>
- [6] PACAS, Blahoslav. *Aplikovaná mechanika*. Brno: VUT v Brně, 1984.
- [7] MALÁŠEK, Jiří. *Stroje pro výrobu stavebních materiálů a stavebních dílců*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

\widetilde{v}_A	[cm]	Rychlost bodu A v jednotkách délky
\widetilde{v}_{BA}	[cm]	Rychlost bodu B okolo A v jednotkách délky
\widetilde{v}_{F_3}	[cm]	Rychlost v působišti síly F_3 v jednotkách délky
\overline{AB}	[cm]	Kolmá vzdálenost mezi tečnami výsledného grafu
A	[J]	Práce
a_A^n	[m.s ⁻²]	Normálové zrychlení bodu A
a_{BA}^n	[m.s ⁻²]	Normálové zrychlení bodu B okolo A
a_{BA}^t	[m.s ⁻²]	Tečné zrychlení bodu B okolo A
a_B^n	[m.s ⁻²]	Normálové zrychlení bodu B
a_B^t	[m.s ⁻²]	Tečné zrychlení bodu B
a_{C_3}	[m.s ⁻²]	Zrychlení těžiště členu 3
C_3	[mm]	Vzdálenost od bodu A k těžišti členu 3
deg	[°]	Úhlové stupně
F_3	[N]	Rovnovážná síla působící v polovině členu 3
F_A	[N]	Síla v bodě A
F_{M_3}	[N]	Síla vzniklá rozložením setrvačného momentu
h_3	[cm]	Kolmá vzdálenost nositelky síly F_3 od středu rychlostí
J_2	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti členu 2
J_3	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti členu 3
J_{ekv}	[kg.m ²]	Ekvivalentní moment setrvačnosti
$J_{HŘÍDEL}$	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti hřídele
J_o	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti sestavy hřídel, řemenice a setrvačnick Vybraná hodnota ekvivalentního momentu setrvačnosti pro vynesení vertikální vzdálenosti mezi tečnami výsledného grafu
J_r	[kg.m ²]	
$J_{ŘEMENICE}$	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti řemenice
$J_{SETRVAČNÍK}$	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti setrvačnicku Vzdálenost mezi osou pohyblivé čelisti a osou otáčení mezi pohyblivou čelistí a vzpěrnou deskou
l_3	[mm]	
l_4	[mm]	Délka vzpěrné desky
m_3	[kg]	Hmotnost členu 3
m_4	[kg]	Hmotnost členu 4
m_A	[m.s ⁻² .cm ⁻¹]	Měřítka zrychlení
m_{AJ}	[J.cm ⁻¹]	Měřítka práce

m_J	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{cm}^{-1}]$	Měřítka ekvivalentního momentu setrvačnosti
M_{rov}	$[\text{Nm}]$	Rovnovážný moment vztažený na hnací hřídel
m_v	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}]$	Měřítka rychlostí
n	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky hřídele drtiče
P	$[\text{W}]$	Výkon hnacího elektromotoru
r_2	$[\text{mm}]$	Poloměr hřídele
S_3	$[\text{N}]$	Setrvačná síla v těžišti členu 3
v_A	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost bodu A
v_B	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost bodu B
v_{BA}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost bodu B okolo A
v_{C3}	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost těžiště C_3
δ	$[-]$	Součinitel nerovnoměrnosti chodu drtiče
λ	$[-]$	Štíhlost
φ	$[\text{°}]$	Úhel natočení hnací hřídele
φ_{max}	$[\text{°}]$	Úhel horní tečny výsledného grafu
φ_{min}	$[\text{°}]$	Úhel spodní tečny výsledného grafu
ω_{21}	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	Úhlová rychlost hřídele
ω_3	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	Úhlová rychlost členu 3

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Jekv_Mrov_vypocet.xlsx	Výpočtový soubor pro návrh setrvačnicku při $n = 275 \text{ min}^{-1}$
Příloha 2	Jekv_Mrov_analyza.xlsx	Výpočtový soubor pro analýzu změny velikosti setrvačnicku při zvýšení pracovních otáček na $n = 320 \text{ min}^{-1}$
Příloha 3	Jo_ruzna_delta.xlsx	Výpočtový soubor pro analýzu změny velikosti setrvačnicku při změně součinitele nerovnoměrnosti chodu δ
Příloha 4	Vypocet_prace.m	MATLAB skript pro grafickou integraci práce

VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

Výkres součásti	Setrvačnick
Výkres součásti	Řemenice