



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## NÁVRH KONSTRUKCE JEDNOÚČELOVÉHO MANIPULÁTORU PRO AUTOMATICKOU VÝMĚNU NÁSTROJŮ S TŘÍVAČKOVÝM GENERÁTOREM PRACOVNÍHO CYKLU

DESIGN OF DEDICATED MANIPULATOR FOR AUTOMATIC TOOL CHANGE  
WITH THE THREE CAM GENERATOR DUTY CYCLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Bláha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.

BRNO 2021



## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. Pavel Bláha**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Návrh konstrukce jednoúčelového manipulátoru pro automatickou výměnu nástrojů s třívačkovým generátorem pracovního cyklu**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Jedná se o konstrukční práci s využitím kombinačních vlastností konstruktéra a jeho představivosti. Cílem práce bude návrh a konstrukční řešení mechanického jednoúčelového manipulátoru pro automatickou výměnu nástrojů s třívačkovým generátorem jeho základních pohybů. Nedílnou součástí výsledků práce bude názorná 3D animace pohybů manipulátoru a vačkového generátoru.

#### **Cíle diplomové práce:**

Kritické zhodnocení současného stav vědy a techniky sledovaného oboru.

Systémový rozbor řešené problematiky.

Návrh variant řešení a jejich multikriteriální hodnocení.

Potřebné návrhové a kontrolní výpočty.

Potřebnou výkresovou dokumentaci s komentářem.

Závěr, diskuze k výsledkům, doporučení pro další rozvoj.

#### **Seznam doporučené literatury:**

KOLÍBAL, Zdeněk a kol. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně – nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

PETRŮ, Karel. Zdvihové závislosti vačkových mechanismů. SNTL Praha, 1980.

KOLOČ, Zdeněk a Miroslav VÁCLAVÍK. Vačkové mechanismy. SNTL/ALFA Praha, 1988.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá návrhem konstrukce jednoúčelového manipulátoru pro automatickou výměnu nástrojů s třívačkovým generátorem pracovního cyklu. Na začátku práce jsou stručně sepsány obecné základní informace o zásobnících nástrojů a o manipulátorech pro výměnu nástrojů. Součástí této práce je návrh kinematického schématu manipulátoru. Práce dále obsahuje výpočet tvarů drážek ve vačkách. Výsledkem této práce je konstrukční řešení manipulátoru, včetně animace vyměňování nástrojů.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the design of a single-purpose manipulator for automatic tool changing with a three-cams generator of the working cycle. At the beginning of the paper, general background information about tool trays and manipulators for the change of tools is briefly described. The scheme of the kinematic manipulator is proposed in this work as well. The thesis also includes the calculation of the shapes of the grooves in the cams. The result of this work is the design of the manipulator, including an animation of tool changing.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Konstrukce jednoúčelového manipulátoru, automatická výměna nástrojů, výpočet tvarů vaček

## **KEYWORDS**

Design of a single-purpose manipulator, automatic tool changing, calculation of the shapes of the cams



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BLÁHA, Pavel. *Návrh konstrukce jednoúčelového manipulátoru pro automatickou výměnu nástrojů s třívačkovým generátorem pracovního cyklu*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129444>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Zdeněk Kolíbal.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce prof. Ing. Zdeňku Kolíbalovi, CSc. za pomoc při tvorbě této práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

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

V Brně dne 19.5.2021

.....

Bláha Pavel



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>17</b>
2.1	Zásobníky nástrojů.....	17
2.2	Výměníky nástrojů.....	17
<b>3</b>	<b>SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>KONCEPCE VÝMĚNÍKU.....</b>	<b>21</b>
4.1	Kinematické schéma výměníku .....	21
4.2	Umístění výměníku a zásobníku nástrojů vůči obráběcímu stroji .....	22
4.3	Alternativní varianta mechanismu .....	23
<b>5</b>	<b>POHYBY VÝMĚNÍKU .....</b>	<b>29</b>
5.1	Průběhy zrychlení, rychlostí a posunutí/natočení ramene výměníku .....	29
5.2	Posunutí a natočení ramene výměníku v průběhu jedné otáčky vaček.....	33
5.3	Klikové mechanismy .....	35
5.4	Natočení pák zapadajících do drážek vaček v průběhu výměny .....	39
5.5	Výpočet tvaru vaček .....	40
<b>6</b>	<b>NÁVRH KONSTRUKCE.....</b>	<b>43</b>
6.1	Rotace otočného rámu .....	43
6.2	Rotace ramene výměníku.....	45
6.3	Posouvání ramene výměníku .....	48
6.4	Detaily a řezy .....	51
6.5	Celý výměník.....	55
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>63</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>67</b>



# 1 ÚVOD

K nahrazování lidské práce dochází z více důvodů (zde uvedu jen některé z těch hlavních). Ve srovnatelném čase vyrábějí stroje většinou přesněji než lidé. Stroje mohou vykonávat pro člověka zdraví škodlivou nebo těžkou práci. Při práci stroje nemá na chyby tak velký vliv lidský faktor. Stroje, na rozdíl od lidí, nepotřebují dovolenou, přestávky na oběd a podobně. Člověk chce za svoji práci dostávat plat, a přesto v mnoha případech nedokáže vyrábět tak produktivně jako stroje.

Na druhou stranu je ale mnoho činností, které se stále nedaří rozumně zautomatizovat. Mezi tyto činnosti určitě nepatří vyměňování nástrojů v obráběcím stroji.

Vyměňování nástrojů je činnost, kterou člověk snadno zvládne (pokud se nejedná o těžké nástroje). Přesto jsou ale důvody, proč by bylo lepší, kdyby to člověk nedělal. Manipulátor dokáže zpravidla vyměňovat rychleji (například se nemusí čekat na odemčení a otevření dveří). Kontakt s chladicí kapalinou a s jejími výpary může být pro člověka z dlouhodobého hlediska škodlivý. Během obrábění jednoho obrobku může docházet hned k několika výměnám nástrojů, a pokud se tím nebude muset obsluha stroje zabývat, tak se bude moci věnovat jiným činnostem.

To vše ale platí spíše, pokud se nejedná pouze o kusovou výrobu. Je vhodné zmínit i to, že automatická výměna nástrojů znamená také větší pořizovací náklady.





## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ [1]

### 2.1 Zásobníky nástrojů

Zásobníky nástrojů se dělí na nosné a skladovací. V nosném zásobníku je nástroj uložen i ve chvíli kdy je zrovna využíván. Musí proto být dostatečně tuhý a pevný, aby mohl přenášet veškeré síly. Při použití nosného zásobníku není pro výměnu nástroje potřebný manipulátor, nástroj se vymění pouze pootočením zásobníku. Dobrým příkladem nepoháněného nosného zásobníku je revolverová hlava soustružnického obráběcího centra. Dále existují i poháněné nosné zásobníky nástrojů, a ty se používají například v některých jednoúčelových strojích. Zadání této práce se ale týká manipulátoru pro výměnu nástrojů, takže zde není potřeba se více zabývat nosnými zásobníky.

Dalším zmíněným typem jsou skladovací zásobníky, které slouží pouze k odložení nástrojů na dobu, kdy zrovna nejsou používány. Při použití skladovacích zásobníků už je nutné použít k výměně nástrojů nějaký manipulátor, s výjimkou PICK UP systému. U tohoto systému je totiž stroj schopen si nástroj ze zásobníku uchopit sám.

Skladovací zásobníky se dají dělit na pohyblivé a stacionární. Při použití stacionárního zásobníku je nutné, aby měl manipulátor pro výměnu nástrojů více stupňů volnosti (musí být schopen uchopovat nástroje z více pozic).

Pohyblivé zásobníky je ještě možné rozdělit na rotační a konající obecný pohyb. Rotační zásobníky není nutné příliš popisovat. Zásobníky s obecným pohybem jsou řetězové. Nejjednodušší řetězový zásobník obsahuje pouze dvě řetězová kola. Takový zásobník má při stejném maximálním počtu uložených nástrojů výhodnější zástavbový prostor než rotační zásobník. Řetěz může být natažen i přes více kol. Nejsložitější řetězové zásobníky se nazývají meandrové a mohou nést velké množství nástrojů.

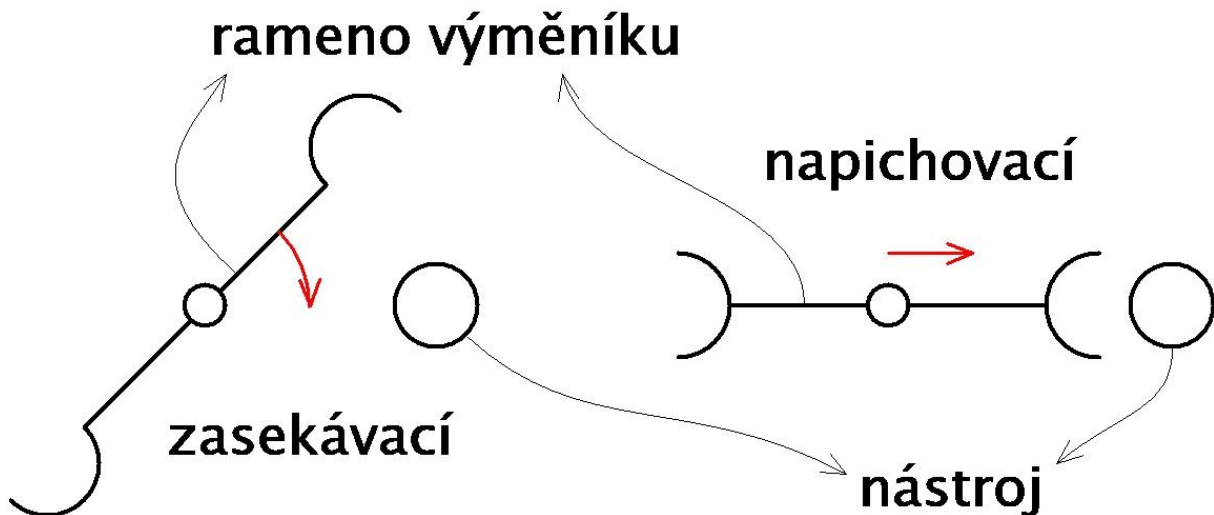
### 2.2 Výměňníky nástrojů

Manipulátorů pro výměnu nástrojů je velké množství druhů. Liší se druhem pohonu, počtem stupňů volnosti, kinematickým uspořádáním, konstrukcí, řízením a tak dále. Při volbě manipulátoru záleží především na požadovaném čase pro jednu výměnu. Při vyměňování těžkých nástrojů kvůli dynamickým jevům není možné dosáhnout tak rychlé výměny jako při vyměňování lehkých nástrojů.

Dále by bylo dobré uvědomit si, že manipulátor pro výměnu nástrojů je jen jednou z více součástí stroje, který by měl být uvažován jako celek. Proto při volbě manipulátoru záleží i na zástavbovém prostoru, na řízení, na možnostech využití médií (tím myslím například stlačený vzduch a hydraulickou kapalinu) a tak dále.

Pro výměnu těžkých nástrojů se volí například hydraulické nebo elektro-hydraulické manipulátory, které vesměs vyměňují takzvaně napichovacím způsobem. Pro výměnu lehkých nástrojů (kde je vyžadovaný krátký čas výměny) se volí například vačkové manipulátory, které vesměs vyměňují takzvaně zasekávacím způsobem. Vačka/vačky jsou zde poháněny elektromotorem.

Zmíněné napichovací a zasekávací typy manipulátorů se od sebe liší způsobem uchopování nástrojů. Nejjednodušeji se to dá vysvětlit takto:



Obr. 1) Zasekávací a napichovací způsob vyměňování

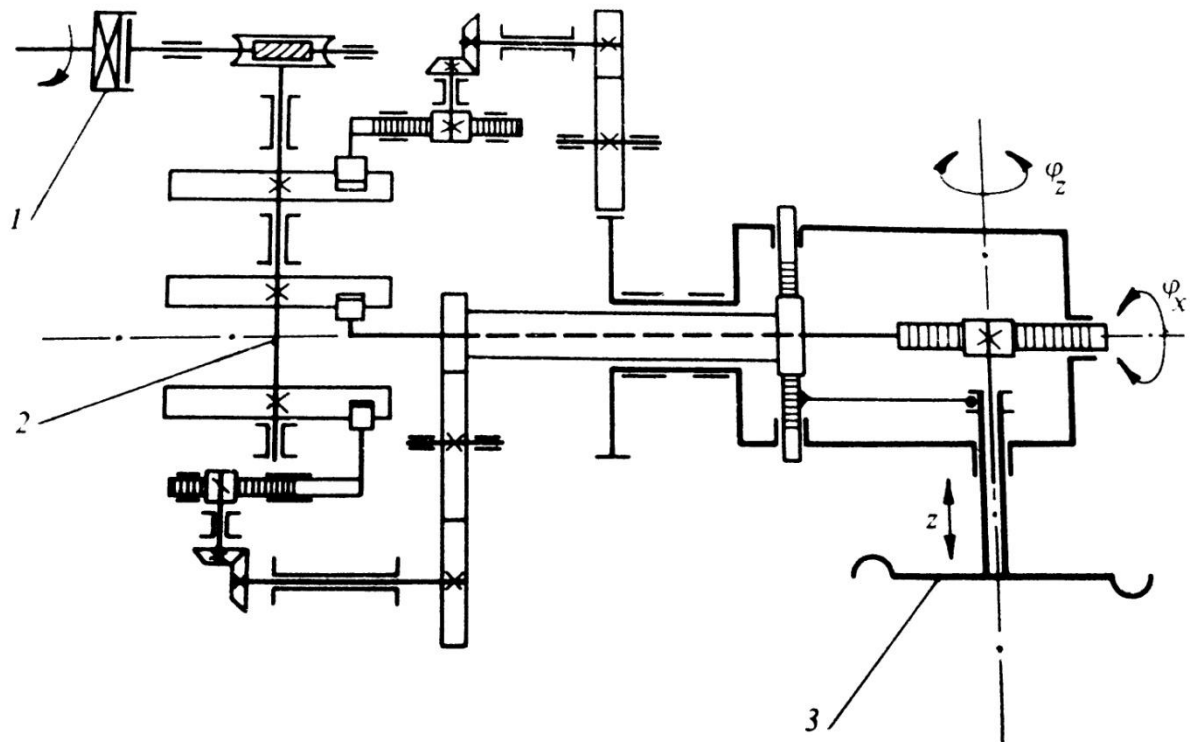
Na obrázku (Obr. 1) je červenými šipkami vyznačen směr pohybu ramene výměníku při uchopování nástroje. Rameno napichovacího typu výměníku musí mít o jeden stupeň volnosti víc (translaci ve směru napichování).

S rozvojem elektroniky a řízení pomalu vzniká trend nahrazování vaček a dalších strojírenských mechanismů elektrickými servopohony. Použití mechanismu osazeného servopohony pro aplikaci vyměňování nástrojů (při použití pohyblivého zásobníku) stále ještě není příliš výhodné, protože má být generován pořád dokola pouze jeden konkrétní pohyb, který nebude nutné časem měnit. Je ale možné, že v budoucnu bude měkké programování i pro podobné aplikace jednoznačně první volbou.

Při použití stacionárního zásobníku nástrojů už se v současné době používají i průmyslové roboty.

### 3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE

Podstatou práce je navrhnout konstrukci výměníku nástrojů ovládaného pomocí tří radiálních vaček. Zadání práce bylo inspirováno tímto kinematickým schématem:



Obr. 2) Kinematické schéma výměníku [2]

Na obrázku (Obr. 2) jsou vidět vačky na společné hřídeli (2), které pomocí různých mechanismů pohybují ramenem výměníku (3). Vačky jsou poháněny jedním motorem přes šnekový převod. Během jedné otáčky vaček má dojít k jedné výměně nástrojů.

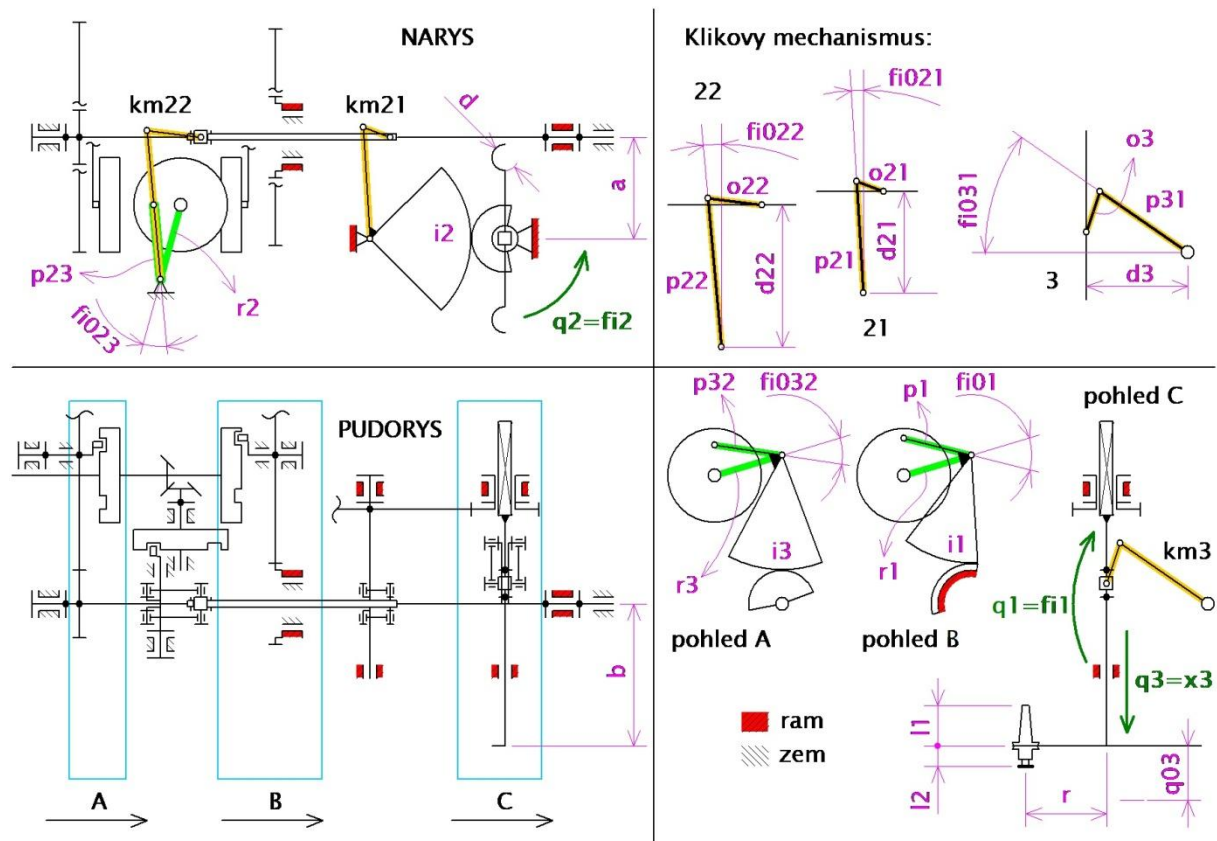
Kromě samotné konstrukce výměníku, která vychází z upraveného kinematického schématu, je součástí práce ještě zvolení umístění výměníku a zásobníku nástrojů vůči vřeteníku, návrh pohybů ramene v průběhu vyměňování, výpočet tvarů vaček a nakonec i vytvoření animace vyměňování.



## 4 KONCEPCE VÝMĚNÍKU

### 4.1 Kinematické schéma výměníku

V zadaném schématu výměníku jsem se rozhodl udělat několik změn, které dále vysvětlím. Základní princip zadané koncepce se ale zachová. Pro srozumitelnější popis vlastního konceptu jsem nakreslil kinematické schéma:



Obr. 3) Upravené kinematické schéma výměníku

Na obrázku (Obr. 3) je schéma výměníku, kde lze vidět změny proti zadanému schématu. Také jsou zde vyznačeny některé parametry, které dále budu používat ve výpočtech.

#### Ozubené hřebeny

Ozubené hřebeny jsou z konstrukčního hlediska poměrně komplikované, protože je nutné uložit je do vedení. Výhodnější by bylo, kdyby byl počet těles, která se mají pohybovat translačně, co nejmenší. Toho jsem dosáhl nahrazením ozubených hřebenů kombinací jiných mechanismů, jako jsou páky, ozubené segmenty a klikové mechanismy.

Výhodou řešení s ozubenými hřebeny by byly konstantní převodové poměry (nezávislé na okamžité poloze) mezi posunutými od vaček a pohyby ramene výměníku. Případné nelineární chování náhradních mechanismů jde ale přepočítat, takže jsem dal přednost jednoduššímu konstrukčnímu řešení.

### Umístění vaček v mechanismu

Na zadaném schématu se vně otočného rámu vyskytuje větší množství ozubených převodů. Tuto komplikovanou část jsem se pokusil zjednodušit. Zjednodušení přišlo se změnou orientace vaček vůči výměníku. Díky tomuto výhodnějšímu umístění bylo možné snížit počet převodů.

### Rozsah natočení a tvar ramene výměníku

Z prostorových důvodů jsem nezvolil převodový poměr  $i_2$  příliš velký, a proto je rozsah otáčení ramene výměníku vůči otočnému rámu poměrně omezen. Tento rozsah otáčení je ve směru úhlu  $\varphi_2$  od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$ . To je ale pro tento koncept výměníku dostatečné (průběh vyměňování bude popsán až dále v této práci).

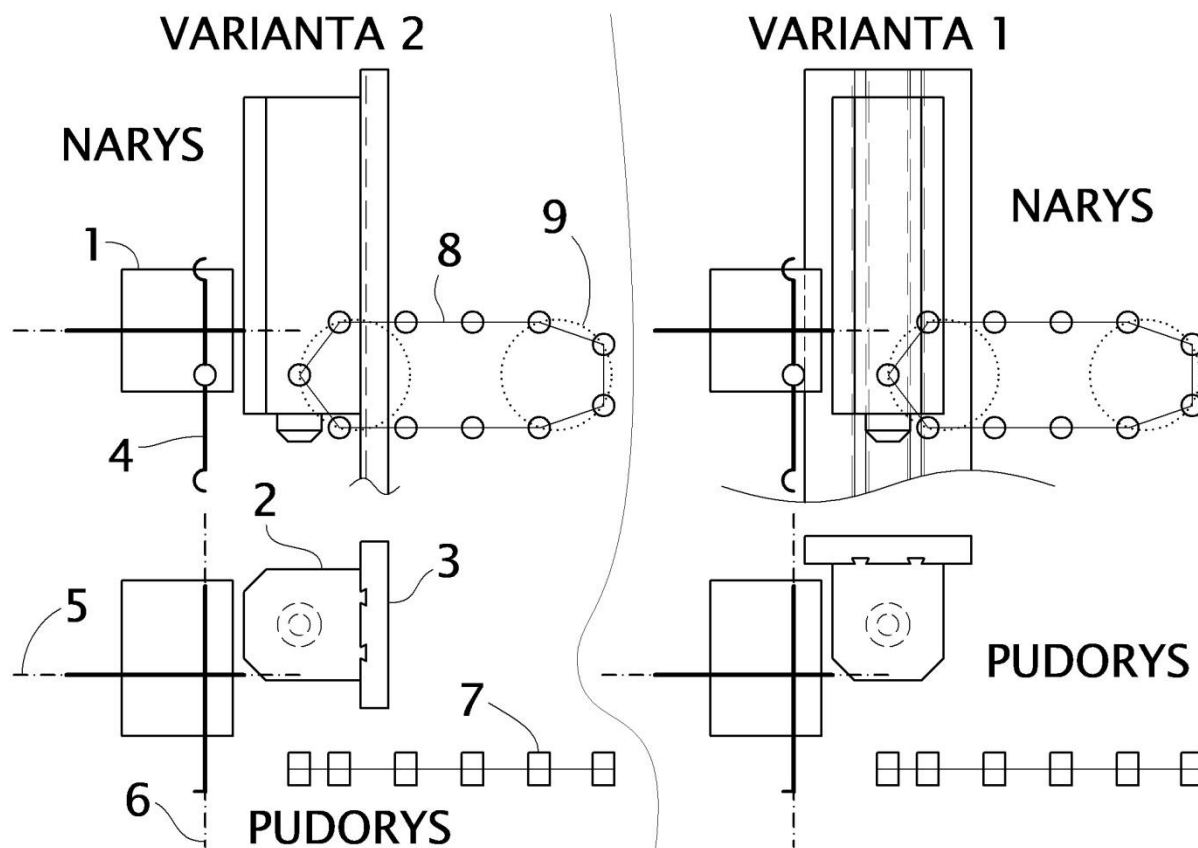
Kvůli takto omezenému rozsahu otáčení bylo ale nutné upravit tvar ramene výměníku. Tento tvar je pravděpodobně méně obvyklý, jde o zasekávací typ, kde je zasekávání na opačných koncích realizováno opačným směrem otáčení.

### Ovládání vysouvání a otáčení ramene výměníku

Další změnu proti zadanému schématu jsem udělal v mechanismu přenášení pohybů do otočného rámu. Hřídel, která otáčí s klikovým mechanismem 3, není dutá, je uložena v ložiskách na opačných koncích a prochází skrz celý otočný rám. Těleso, které spojuje posouvání klikových mechanismů 21 a 22, je uloženo na zmíněné hřídeli, vůči které se pohybuje rotačně (kolem osy hřídele) a translačně (ve směru osy hřídele). Takovéto uložení umožňují například klecová vedení. Pro převod této translace na rotaci ramene výměníku jsem přidal pomocnou hřídel.

## **4.2 Umístění výměníku a zásobníku nástrojů vůči obráběcímu stroji**

Výměník a zásobník nástrojů lze umístit vůči obráběcímu stroji více způsoby. Záleží na volném prostoru v okolí vřeteníku. Nedostal jsem zadaný konkrétní obráběcí stroj, takže jsem zvolil dvě možná umístění, která mi přišla nejvíce vhodná, a nakreslil jsem je do schematického obrázku:



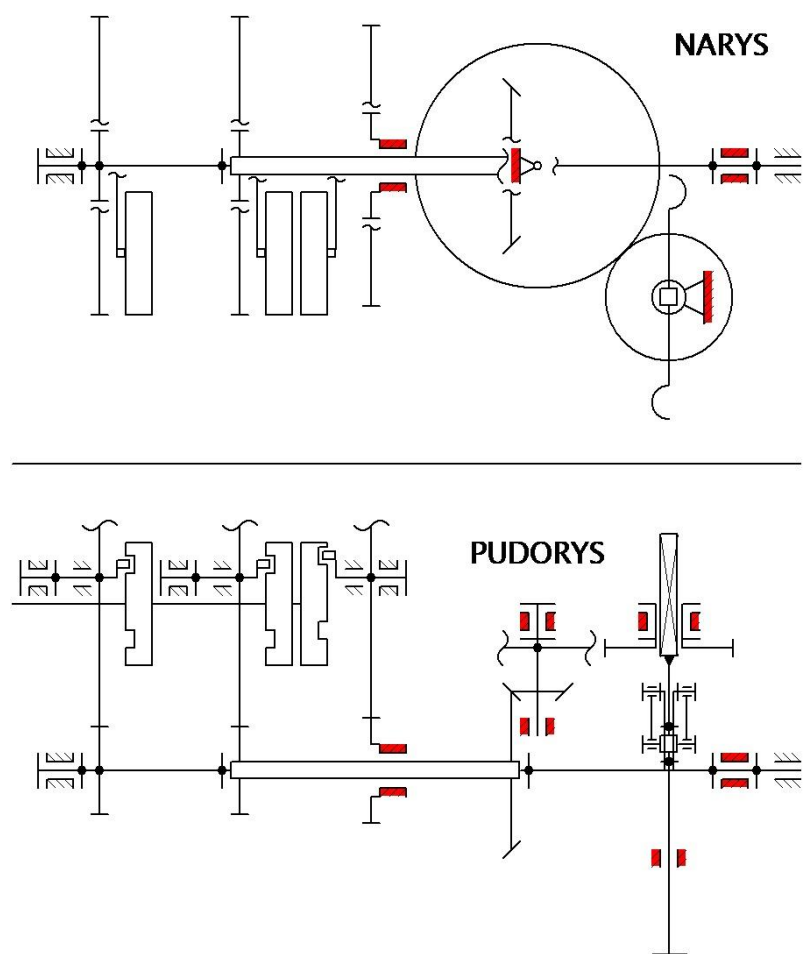
Obr. 4) Umístění výměníku a zásobníku nástrojů vůči vřeteníku

Dále v této práci budu uvažovat toto umístění, které lze vidět na obrázku (Obr. 4). Pro obě nakreslené varianty lze použít stejný průběh vyměňování. Do obrázku jsem přidal číselný popis, který vysvětlím zde:

1) otočný rám výměníku; 2) vřeteník; 3) schematicky nakreslené vedení vřeteníku; 4) rameno výměníku; 5) osa rotace otočného rámu výměníku; 6) osa rotace ramene výměníku a směr vysouvání ramene výměníku; 7) pouzdro pro nástroj; 8) schematicky nakreslený článek řetězového zásobníku nástrojů; 9) naznačené kolo řetězového zásobníku nástrojů

### 4.3 Alternativní varianta mechanismu

Vačka číslo dva (ovládající otáčení ramene výměníku vůči otočnému rámu) je na mém prvním kinematickém schématu poměrně nevýhodně umístěná na vlastní hřídeli. Dále je posunutí od této vačky přenášeno pomocí soustavy dvou klikových mechanismů a to může na první pohled vypadat poměrně komplikovaně. Napadlo mě tyto zmíněné části nahradit jinými mechanismy podle přiloženého schématu:



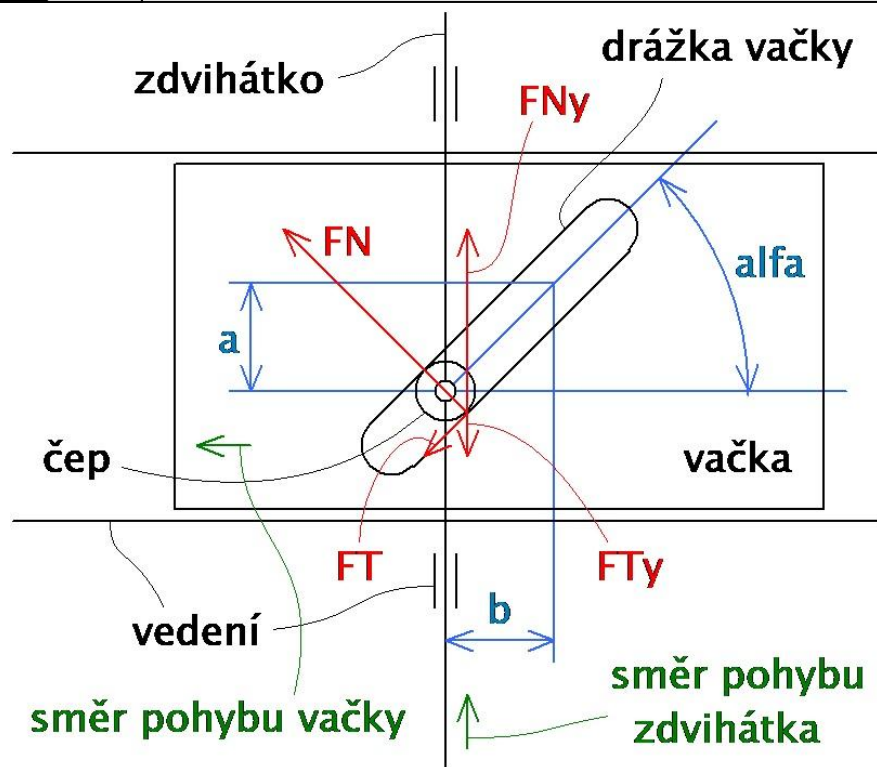
Obr. 5) Alternativní návrh kinematického schéma

Kinematické schéma na obrázku (Obr. 5) se zdá být výhodnější z více důvodů. Otáčení ramene výměníku v otočném rámu je přímo úměrné otáčení páky zapadající do drážky příslušné vačky. Všechny vačky jsou na stejné hřídeli. Translace byla nahrazena rotací, takže některá vedení mohla být nahrazena ložisky.

Toto řešení má ale i nevýhodu, kvůli které jsem zůstal u původního návrhu. Jde o to, že takto je rotace ramene výměníku vůči otočnému rámu ovlivněna rotací otočného rámu (původně to tak bylo pouze u vysouvání ramene výměníku z otočného rámu). Nejde o to, že by to bylo složitější na výpočet, naopak to je výrazně jednodušší než přepočty klikových mechanismů. Problém je vidět až ve výsledku.

Abych to lépe vysvětlil, tak sem přiložím zjednodušený výpočet, který se bude týkat posuvné vačky zvedající zdvihátko. Výsledkem bych chtěl předvést obecnou vlastnost vaček, takže jsem si zvolil jen asi nejjednodušší možný model. Pro větší názornost přikládám i obrázek:





Obr. 6) Model jednoduché vačky

Kromě schematického nákresu jednoduché vačky jsou na obrázku (Obr. 6) ještě označeny rozměry a síly, které budu ve výpočtu používat.

Vačka se posouvá doleva a tím zvedá zdvihátko. Zajímá mě, jak velkou tlakovou silou (označenou na obrázku jako  $FN$ ) působí stěna drážky vačky na čep zdvihátka, aby při posunutí vačky o vzdálenost  $b$  vykonalo zdvihátko práci  $W$ . V první části výpočtu zanedbám tření ve vačce, takže platí:

$$FNy = \frac{W}{a} \quad (1)$$

Tolik z fyziky, dále už se jedná pouze o geometrickou záležitost. Z určené síly  $FNy$  se dá vypočítat hledaná síla  $FN$  takto:

$$FN = W \cdot \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}} \quad (2)$$

To je zajímavý výsledek, protože je vidět, že lze tlakovou sílu  $FN$  zmenšit zvětšením zdvihu vačky  $a$  (samozřejmě i zvětšením pracovní dráhy vačky  $b$ , i když to v této úloze nebudu uvažovat). Lze to případně přepsat ještě do jiného tvaru:

$$FN = \frac{W}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2(\alpha)}} \quad (3)$$

Zlomek  $W/b$  je možné takto považovat za nezajímavou konstantu, která může hledanou funkci pouze „roztáhnout“ ve svislém směru.

Nemělo by být ale zapomenuto na zanedbané tření. Když se úhel  $\alpha$  blíží pravému úhlu, tak je zde obrovská chyba. S uvažováním tření by odvození vypadalo takto:

$$FN_y = \frac{W}{a - f \cdot \frac{a^2}{b}} \quad (4)$$

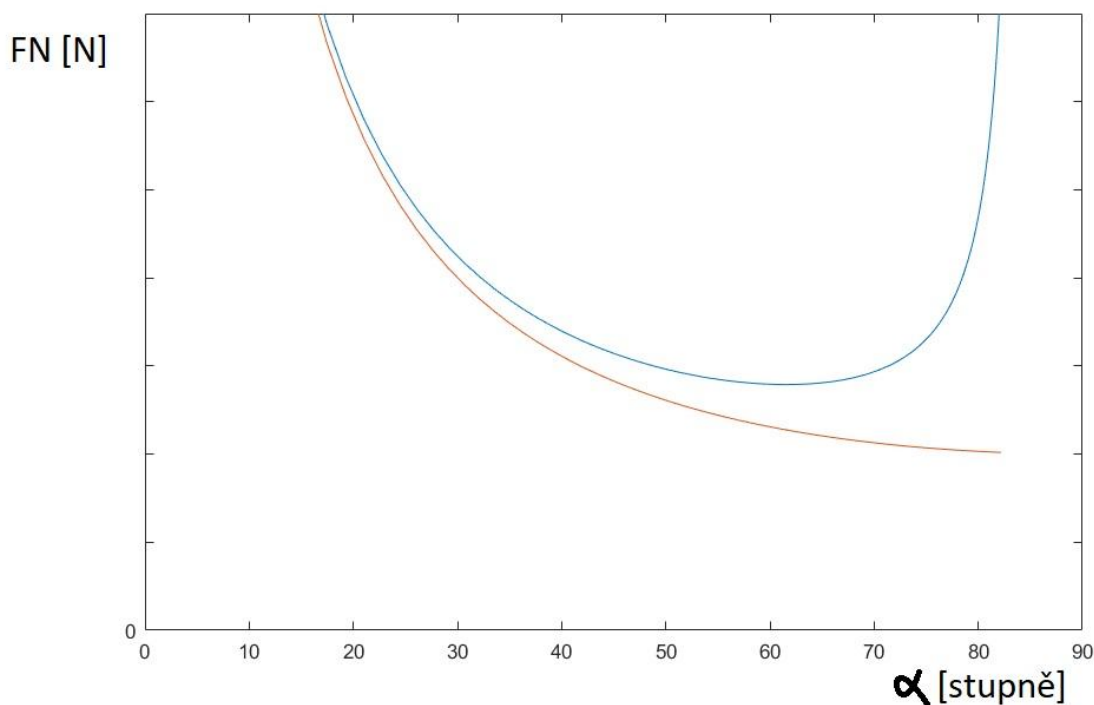
Kde  $f$  je součinitel smykového tření mezi materiály čepu a stěny drážky vačky.

$$FN = \frac{W \cdot \sqrt{a^2 + b^2}}{a \cdot b - f \cdot a^2} \quad (5)$$

Z tohoto tvaru funkce lze vidět, že zvětšování zdvihu vačky  $a$  už nebude mít na velikost síly  $FN$  stejný vliv jako zvětšování pracovní dráhy vačky  $b$ . Po další úpravě jsem získal podobný tvar rovnice jako výše bez tření (se zlomkem  $W/b$ ):

$$FN = \frac{W}{b} \cdot \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha)}}{\operatorname{tg}(\alpha) - f \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha)} \quad (6)$$

Tato získaná funkce už se hůře představuje, a proto přikládám její graf:



Obr. 7) Graf závislosti síly  $F_N$  na úhlu alfa

Druhý graf (ten spodní) zobrazený na obrázku (Obr. 7) je bez uvažování tření. Je vidět, že se tyto grafy v oblasti ostřejšího úhlu  $\alpha$  tolik nerozcházejí, a proto je zde možné vliv tření zanedbat (za  $f$  jsem dosadil hodnotu  $0,1$ ).

Konečně se dostávám k důvodu, proč jsem dělal tento výpočet. Zde v alternativním návrhu je rotace ramene výměníku vůči otočnému rámu ovlivněna rotací otočného rámu (jak už bylo zmíněno). To znamená (zjednodušeně řečeno) že se u příslušné vačky k celkovému zdvihu pro otáčení ramene musí přidat ještě zdvih pro kompenzaci ovlivnění (a takto vznikne maximální zdvih). Maximální zdvih je ale z konstrukčních důvodů omezený, takže se v některých místech vačky v průběhu výměny zvětší tlaková síla (je to možné například vidět v grafu, při stejném rozměru  $b$  se zmenší rozměr  $a$ ). Zvětšení tlakové síly v drážce vačky je samozřejmě nežádoucí, a proto jsem radši vybral původní návrh s klikovými mechanismy.



## 5 POHYBY VÝMĚNÍKU

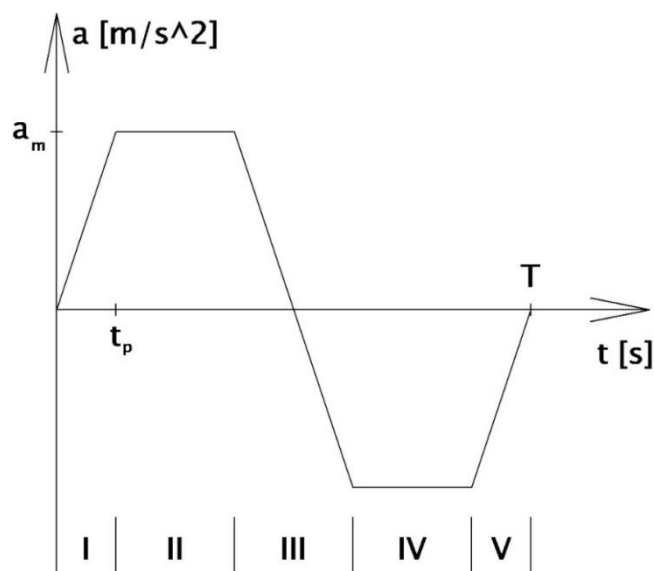
### 5.1 Průběhy zrychlení, rychlostí a posunutí/natočení ramene výměníku

Rameno výměníku se může vysouvat z otočného rámu, může vůči otočnému rámu rotovat a dále může unášivě rotovat společně s otočným rámem. Má tedy 3 stupně volnosti.

Posunutí ramene výměníku o vzdálenost  $x_c$  za celkový čas  $T$  může být realizováno s různými průběhy zrychlení.

Pro rotaci platí to stejné, pouze s odpovídajícími úhlovými veličinami, takže dále v rámci zjednodušení zápisu budu uvádět pouze translační veličiny.

Při volbě vhodného průběhu zrychlení jsem vycházel z požadavků, aby byl tento průběh spojitý a aby bylo maximální zrychlení co nejmenší při omezené velikosti změny zrychlení. Vyšel mi tento průběh zrychlení v čase:



Obr. 8) Průběh zrychlení v čase

Na obrázku (Obr. 8) lze vidět vyznačené intervaly pomocí římských číslic. Na těchto intervalech se liší rovnice, kterými lze průběh zrychlení popsat. Z těchto rovnic lze integrováním získat průběh polohy v čase:

I:

$(0, t_p)$

$$a = \frac{a_m}{t_p} \cdot t \quad (7)$$

Kde  $a_m$  je maximální zrychlení,  $t_p$  je doba konstantního růstu zrychlení a  $a$  je okamžité zrychlení v čase  $t$ .

$$v = \frac{a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t^2 \quad (8)$$

Kde  $v$  je okamžitá rychlost.

$$x = \frac{a_m}{6 \cdot t_p} \cdot t^3 \quad (9)$$

Kde  $x$  je okamžitá poloha.

II:

$$\left( t_p, \frac{T}{2} - t_p \right)$$

$$a = a_m \quad (10)$$

$$v = a_m \cdot t + c_1 \quad (11)$$

Kde  $c_1$  je integrační konstanta. Průběh rychlosti musí být spojitý, tedy lze zapsat, že se rychlost v koncovém bodě intervalu I rovná rychlosti v počátečním bodě intervalu II. Z této rovnice lze vyjádřit integrační konstantu  $c_1$ .

$$c_1 = -\frac{a_m \cdot t_p}{2} \quad (12)$$

Obdobně bude možné vyjádřit i další integrační konstanty, které se vyskytnou ve výpočtu. Pro zjednodušení zápisu je tedy nebudu dále vysvětlovat.

$$v = a_m \cdot t - \frac{a_m \cdot t_p}{2} \quad (13)$$

$$x = \frac{a_m}{2} \cdot t^2 - \frac{a_m \cdot t_p}{2} \cdot t + c_2 \quad (14)$$

$$c_2 = \frac{a_m \cdot t_p^2}{6} \quad (15)$$

$$x = \frac{a_m}{2} \cdot t^2 - \frac{a_m \cdot t_p}{2} \cdot t + \frac{a_m \cdot t_p^2}{6} \quad (16)$$

III:

$$\left( \frac{T}{2} - t_p, \frac{T}{2} + t_p \right)$$

$$a = -\frac{a_m}{t_p} \cdot t + \frac{T \cdot a_m}{2 \cdot t_p} \quad (17)$$

$$v = -\frac{a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t^2 + \frac{T \cdot a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t + c_3 \quad (18)$$

$$c_3 = \frac{a_m \cdot T}{2} - a_m \cdot t_p - \frac{a_m \cdot T^2}{8 \cdot t_p} \quad (19)$$

$$v = -\frac{a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t^2 + \frac{T \cdot a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t + \frac{a_m \cdot T}{2} - a_m \cdot t_p - \frac{a_m \cdot T^2}{8 \cdot t_p} \quad (20)$$

$$x = -\frac{a_m}{6 \cdot t_p} \cdot t^3 + \frac{T \cdot a_m}{4 \cdot t_p} \cdot t^2 + \frac{a_m \cdot T}{2} \cdot t - a_m \cdot t_p \cdot t - \frac{a_m \cdot T^2}{8 \cdot t_p} \cdot t + c_4 \quad (21)$$

$$c_4 = -\frac{a_m \cdot T^2}{8} + \frac{a_m \cdot T \cdot t_p}{4} + \frac{a_m \cdot T^3}{48 \cdot t_p} \quad (22)$$

$$x = -\frac{a_m}{6 \cdot t_p} \cdot t^3 + \frac{T \cdot a_m}{4 \cdot t_p} \cdot t^2 + \frac{a_m \cdot T}{2} \cdot t - a_m \cdot t_p \cdot t - \frac{a_m \cdot T^2}{8 \cdot t_p} \cdot t - \frac{a_m \cdot T^2}{8} + \frac{a_m \cdot T \cdot t_p}{4} + \frac{a_m \cdot T^3}{48 \cdot t_p} \quad (23)$$

IV:

$$\left( \frac{T}{2} + t_p, T - t_p \right)$$

$$a = -a_m \quad (24)$$

$$v = -a_m \cdot t + c_5 \quad (25)$$

$$c_5 = -\frac{a_m \cdot t_p}{2} + T \cdot a_m \quad (26)$$

$$v = -a_m \cdot t - \frac{a_m \cdot t_p}{2} + T \cdot a_m \quad (27)$$

$$x = -\frac{a_m}{2} \cdot t^2 - \frac{a_m \cdot t_p}{2} \cdot t + T \cdot a_m \cdot t + c_6 \quad (28)$$

$$c_6 = -\frac{a_m \cdot t_p^2}{6} - \frac{a_m \cdot T^2}{4} \quad (29)$$

$$x = -\frac{a_m}{2} \cdot t^2 - \frac{a_m \cdot t_p}{2} \cdot t + T \cdot a_m \cdot t - \frac{a_m \cdot t_p^2}{6} - \frac{a_m \cdot T^2}{4} \quad (30)$$

V:

$(T - t_p, T)$

$$a = \frac{a_m}{t_p} \cdot t - \frac{T \cdot a_m}{t_p} \quad (31)$$

$$v = \frac{a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t^2 - \frac{T \cdot a_m}{t_p} \cdot t + c_7 \quad (32)$$

$$c_7 = \frac{a_m \cdot T^2}{2 \cdot t_p} \quad (33)$$

$$v = \frac{a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t^2 - \frac{T \cdot a_m}{t_p} \cdot t + \frac{a_m \cdot T^2}{2 \cdot t_p} \quad (34)$$



$$x = \frac{a_m}{6 \cdot t_p} \cdot t^3 - \frac{T \cdot a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t^2 + \frac{a_m \cdot T^2}{2 \cdot t_p} \cdot t + c_8 \quad (35)$$

$$c_8 = -\frac{a_m \cdot t_p \cdot T}{2} + \frac{a_m \cdot T^2}{4} - \frac{a_m \cdot T^3}{6 \cdot t_p} \quad (36)$$

$$x = \frac{a_m}{6 \cdot t_p} \cdot t^3 - \frac{T \cdot a_m}{2 \cdot t_p} \cdot t^2 + \frac{a_m \cdot T^2}{2 \cdot t_p} \cdot t - \frac{a_m \cdot t_p \cdot T}{2} + \frac{a_m \cdot T^2}{4} - \frac{a_m \cdot T^3}{6 \cdot t_p} \quad (37)$$

Do koncové vzdálenosti  $x_c$  se posune rameno výměníku v čase  $T$ . Tyto hodnoty jsem dosadil do poslední rovnice za  $x$  a za  $t$ . Vyjádřil jsem maximální zrychlení  $a_m$  a získal jsem tak tuto rovnici:

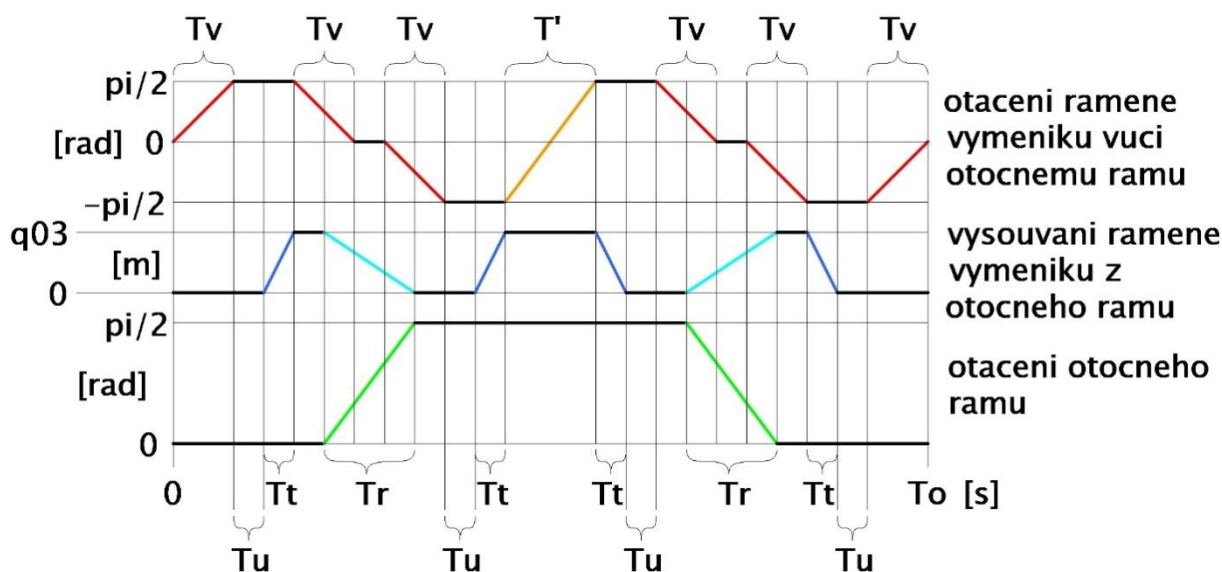
$$a_m = \frac{x_c}{-\frac{t_p \cdot T}{2} + \frac{T^2}{4}} \quad (38)$$

Vypočítané maximální zrychlení  $a_m$  jsem dále dosadil do odvozených pěti průběhů polohy. Průběhy jsem spojil po jednotlivých intervalech a získal jsem tak hledanou závislost polohy na čase.

## 5.2 Posunutí a natočení ramene výměníku v průběhu jedné otáčky vaček

Proces vyměňování nástrojů lze popsat pomocí tří grafů – natočení ramene výměníku vůči otočnému rámu, vysunutí ramene výměníku z otočného rámu a natočení otočného rámu v závislosti na čase. Za předpokladu, že by byla úhlová rychlost vaček konstantní, pak by mohlo být na vodorovné ose i natočení vaček.

Pro začátek jsem vytvořil návrh těchto grafů. V tomto návrhu jsem zjednodušil průběhy změn polohy/natočení (nahradil jsem je přímkami). Dále jsem zde zobrazil hlavní parametry procesu vyměňování. Lze to vidět zde:



Obr. 9) Návrh procesu vyměňování nástrojů

Na obrázku (Obr. 9) zbývá vysvětlit zavedené značení.  $T_v$  je čas otočení ramene výměníku vůči otočnému rámu o  $\pi/2$ .  $T_t$  je čas vysunutí ramene výměníku z otočného rámu o délku maximálního vysunutí  $q_{03}$ .  $T_r$  je čas otočení otočného rámu o  $\pi/2$ .

Čas  $T_u$  je čas potřebný pro uvolnění nebo uchycení obráběcího nástroje ve vřeteníku (případně v zásobníku nástrojů, pokud by to bylo potřeba).

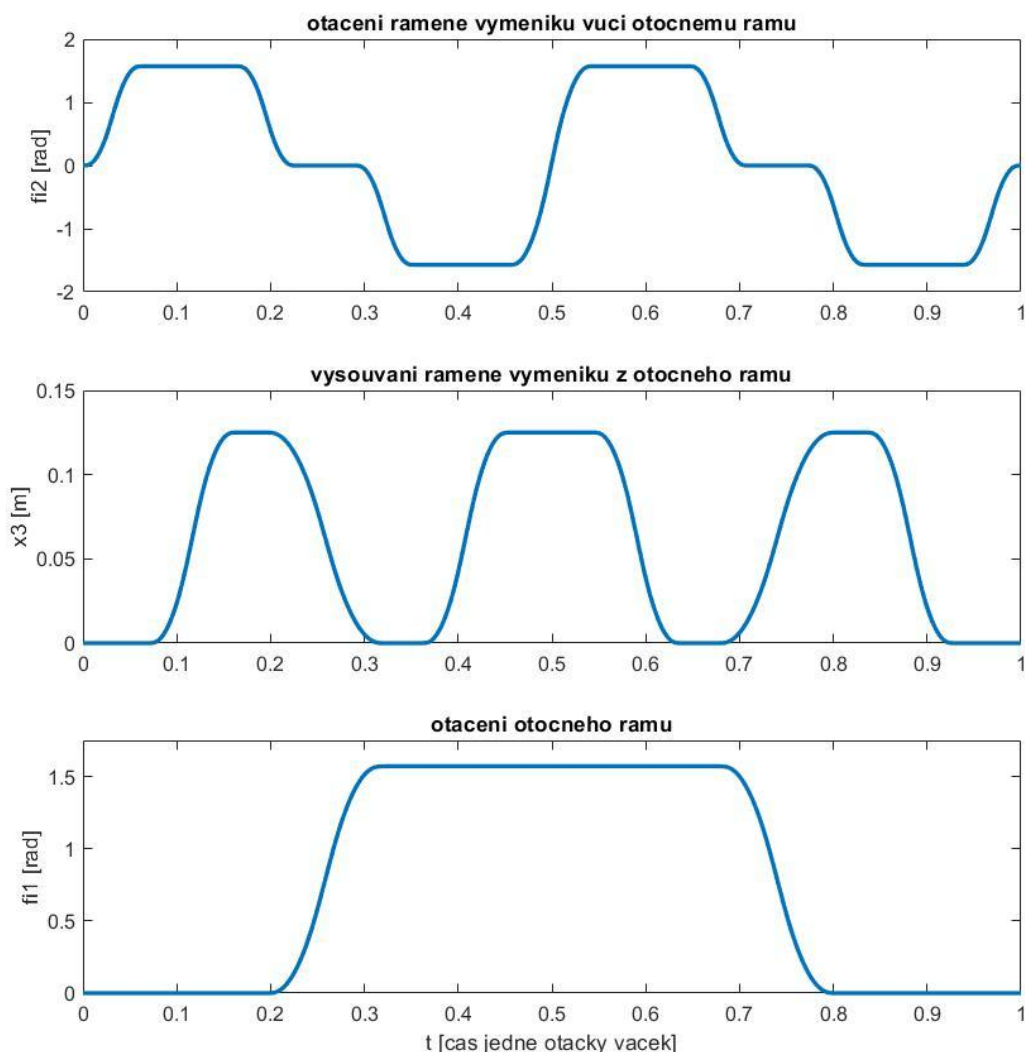
Čas označený jako  $T'$  není parametr, ale je dopočítaný. Je tak dlouhý, aby při otáčení ramene výměníku o  $\pi$  vůči otočnému rámu bylo maximální úhlové zrychlení stejně velké jako maximální úhlové zrychlení při otáčení ramene výměníku o  $\pi/2$  vůči otočnému rámu za čas  $T_v$ . To jsem vypočítal tak, že jsem vyřešil kvadratickou rovnici, která vznikla úpravou rovnice pro výpočet maximálního zrychlení:

$$T'^2 - 2 \cdot t_p \cdot T' - \frac{4 \cdot x_c}{a_m} = 0 \quad (39)$$

Pouze jedno řešení této kvadratické rovnice má fyzikální význam:

$$T' = 2 \cdot \left( \frac{t_p}{2} + \sqrt{\frac{t_p^2}{4} + \frac{x_c}{a_m}} \right) \quad (40)$$

Dále jsem využil odvozené rovnice průběhu změny polohy/natočení, zvolil jsem všechny potřebné parametry a získal jsem grafy popisující proces vyměňování nástrojů:



Obr. 10) Grafy popisující proces vyměňování nástrojů

Grafy na obrázku (Obr. 10) jsou velmi podobné výše zobrazenému návrhu grafů, pouze už neobsahují zjednodušení.

Parametry  $T_v$ ,  $T_t$ , a  $T_r$  (včetně příslušných časů konstantního růstu zrychlení  $t_p$ ) by měly být vhodně zvoleny, aby odpovídaly dynamickému i statickému zatížení jednotlivých pohybů.

### 5.3 Klikové mechanismy

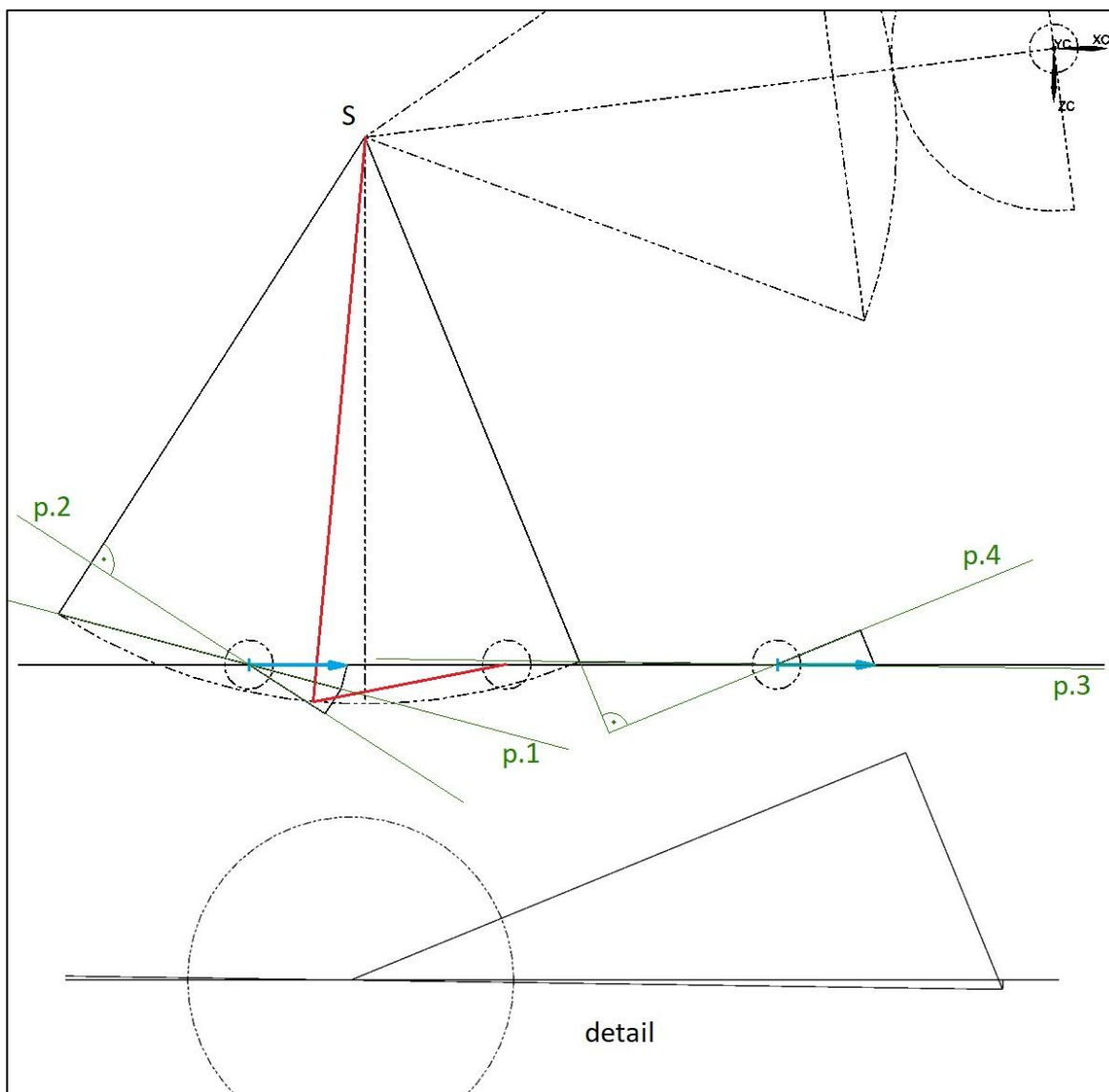
Klikové mechanismy bylo nutné vhodně navrhnout podle rozsahů pohybů, které mají přenášet.

Bod klikového mechanismu 3, který se pohybuje translačně, má rozsah pohybu vzdálenost maximálního vysunutí ramene výměníku z otočného rámu. Počáteční poloha tohoto bodu je v krajní poloze, při které je tyč ramene výměníku nejvíce zasunuta v otočném rámu.

Klikový mechanismus 21 musí mít rozsah otáčení  $180/i_2$  stupňů, kde  $i_2$  je převodový poměr větší než 1. Počáteční natočení leží na ose tohoto úhlu.

Bod klikového mechanismu 22, který se pohybuje translačně, má stejně velký rozsah pohybu jako bod klikového mechanismu 21, který se pohybuje translačně, a má i stejné umístění počáteční polohy vůči krajním polohám.

Dále jsem navrhl vhodnou orientaci krajních poloh klikových mechanismů. Pro přehlednější vysvětlení přikládám obrázek:



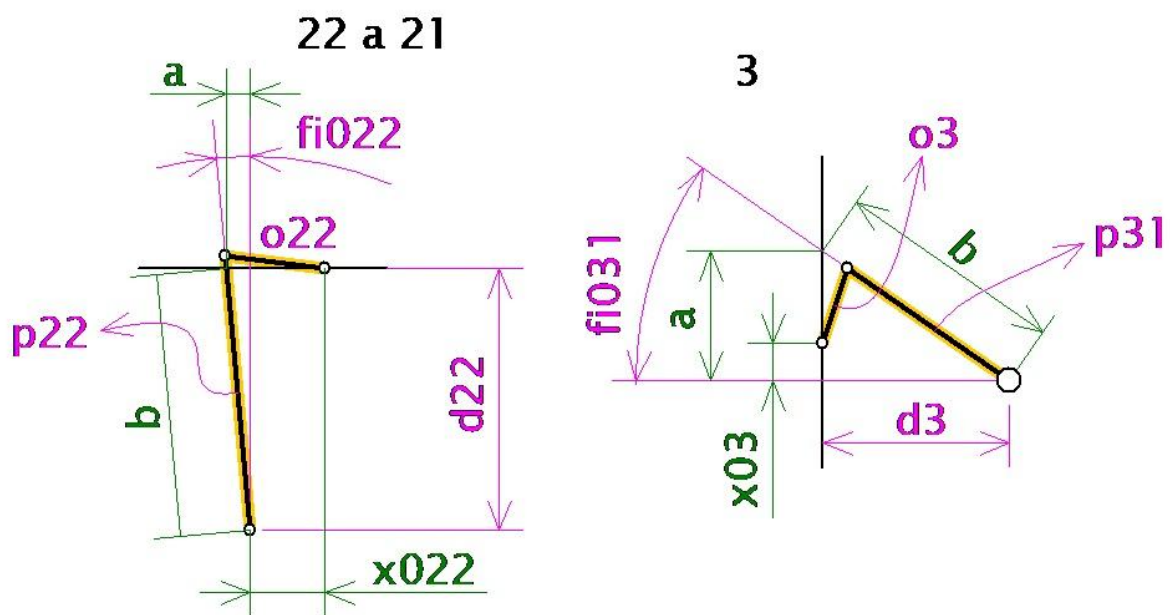
Obr. 11) Náčrt klikového mechanismu 21

Na obrázku (Obr. 11) lze vidět náčrt klikového mechanismu 21. Červeně je vyznačena počáteční poloha. Orientaci krajních poloh jsem zvolil tak, aby v těchto polohách způsobovala stejně velká síla (vyznačená na obrázku modrou šipkou) stejně velký moment v bodě S.

Toto jsem nepočítal pomocí rovnic, ale použil jsem k tomu nástroje z CAD softwaru. S využitím vazeb a kót jsem definoval, že kolmý průmět do přímky 2 kolmého průmětu do přímky 1 vyznačené síly musí být stejně velký jako kolmý průmět do přímky 4 kolmého průmětu do přímky 3 druhé stejně velké vyznačené síly. Přímka 3 je téměř vodorovná a kolmý průmět do ní tedy není pod vyznačenou silou příliš vidět. Proto jsem do spodní části obrázku umístil ještě detail.

Vhodnou orientaci krajních poloh u ostatních dvou klikových mechanismů jsem navrhl velmi podobně, a proto by měl zde stačit v rámci zjednodušení zápisu obrázek pouze jednoho klikového mechanismu.

Pro klikový mechanismus 21 bude dále nutné odvodit přepočítání z natočení na posunutí. Pro klikové mechanismy 22 a 3 bude nutné odvodit přepočítání z posunutí na natočení. K odvození budu potřebovat označit některé další rozměry, a proto přikládám tento obrázek:



Obr. 12) Schéma klikových mechanismů 22 a 3

Na obrázku (Obr. 12) lze vidět klikové mechanismy a označené rozměry. Schéma klikového mechanismu 21 je zaměnitelné se schématem klikového mechanismu 22. Rozměry označené fialově jsou zvoleny a zelené rozměry je potřeba dopočítat. Rozměry  $a$  a  $b$  nepotřebují znát, jsou ale pomocné, vypočítají se takto:

$$a = d_{22} \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{022}) \quad (41)$$

$$b = \frac{d_{22}}{\cos(\varphi_{022})} \quad (42)$$

Se známými rozměry  $a$  a  $b$  bude možné použít kosinovou větu.

$$o_{22}^2 = (p_{22} - b)^2 + (a + x_{022})^2 + 2 \cdot (p_{22} - b) \cdot (a + x_{022}) \cdot \sin(\varphi_{022}) \quad (43)$$

Po dosazení a úpravě vznikne takováto kvadratická rovnice:

$$x_{022}^2 + 2 \cdot \sin(\varphi_{022}) \cdot p_{22} \cdot x_{022} - o_{22}^2 + p_{22}^2 + d_{22}^2 - 2 \cdot p_{22} \cdot d_{22} \cdot \cos(\varphi_{022}) = 0 \quad (44)$$

Řešení kvadratické rovnice, které má správný geometrický význam, vypadá takto:

$$x_{022} = \frac{-p_{22} \cdot \sin(\varphi_{022}) + \sqrt{p_{22}^2 \cdot \sin^2(\varphi_{022}) + o_{22}^2 - p_{22}^2 - d_{22}^2 + 2 \cdot p_{22} \cdot d_{22} \cdot \cos(\varphi_{022})}}{1} \quad (45)$$

Pro klikový mechanismus 21 lze stejným způsobem získat odpovídající rovnici:

$$x_{021} = \frac{-p_{21} \cdot \sin(\varphi_{021}) + \sqrt{p_{21}^2 \cdot \sin^2(\varphi_{021}) + o_{21}^2 - p_{21}^2 - d_{21}^2 + 2 \cdot p_{21} \cdot d_{21} \cdot \cos(\varphi_{021})}}{1} \quad (46)$$

A pro klikový mechanismus 3 také, i když  $x_{03}$  bude zde s opačným znaménkem.

$$x_{03} = \frac{p_{31} \cdot \sin(\varphi_{031}) - \sqrt{p_{31}^2 \cdot \sin^2(\varphi_{031}) + o_3^2 - p_{31}^2 - d_3^2 + 2 \cdot p_{31} \cdot d_3 \cdot \cos(\varphi_{031})}}{1} \quad (47)$$

Vztah pro převod natočení na posunutí u klikového mechanismu 21 lze získat už jen malou modifikací:

$$x_2 = \frac{-p_{21} \cdot \sin(\varphi_{21}) + \sqrt{p_{21}^2 \cdot \sin^2(\varphi_{21}) + o_{21}^2 - p_{21}^2 - d_{21}^2 + 2 \cdot p_{21} \cdot d_{21} \cdot \cos(\varphi_{21})} - x_{021}}{1} \quad (48)$$

Kde  $\varphi_{21}$  je okamžité natočení klikového mechanismu 21.

Přepočtení posunutí na natočení u klikových mechanismů 22 a 3 lze opět vyřešit pomocí kosinové věty a goniometrických funkcí:

$$\varphi_{22} = \arccos\left(\frac{a_{22}^2 - d_{22}^2 - (x_{022} + x_2)^2 - p_{22}^2}{-2 \cdot \sqrt{d_{22}^2 + (x_{022} + x_2)^2} \cdot p_{22}}\right) - \arctg\left(\frac{x_{022} + x_2}{d_{22}}\right) - \varphi_{022} \quad (49)$$

$$\varphi_{31} = \arccos\left(\frac{a_{31}^2 - d_3^2 - (x_{03} - x_3)^2 - p_{31}^2}{-2 \cdot \sqrt{d_3^2 + (x_{03} - x_3)^2} \cdot p_{31}}\right) + \arctg\left(\frac{x_{03} - x_3}{d_3}\right) - \varphi_{031} \quad (50)$$

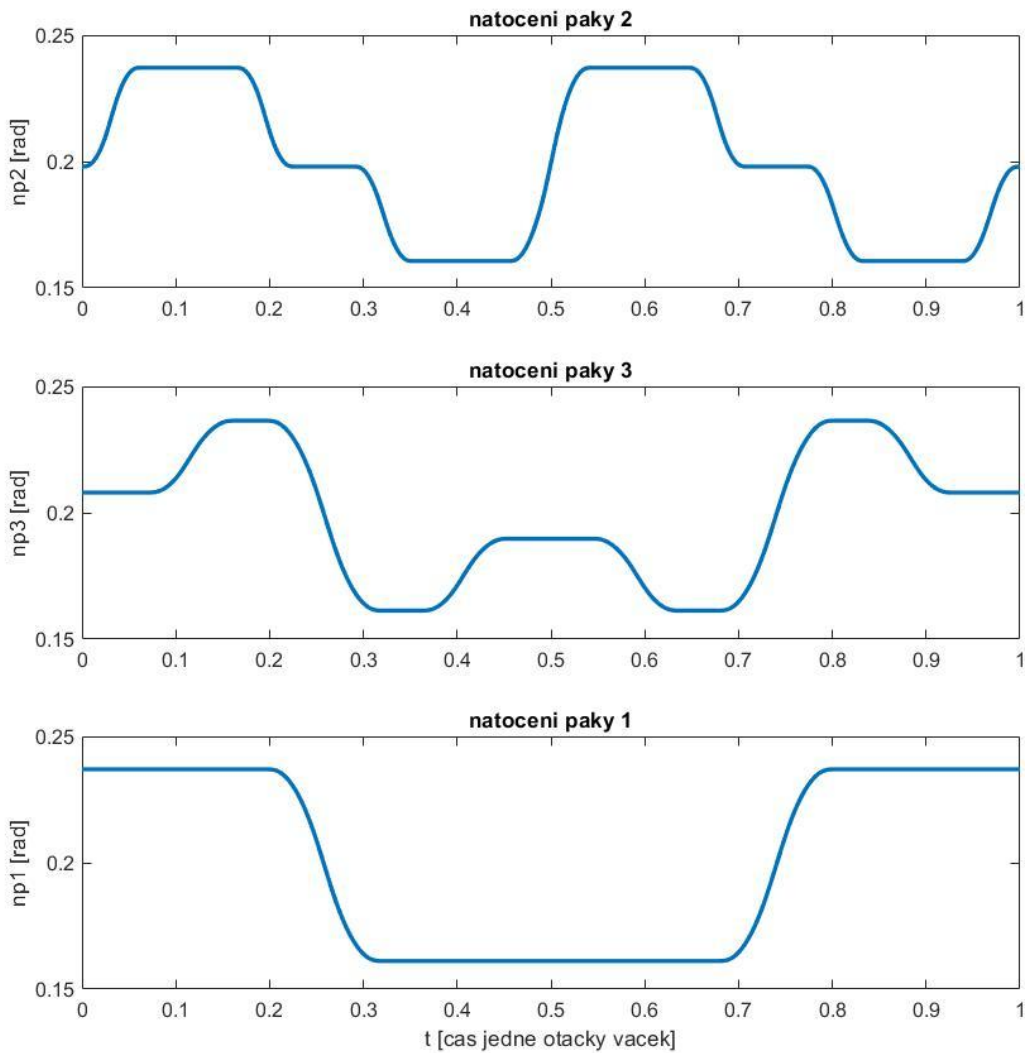
#### 5.4 Natočení pák zapadajících do drážek vaček v průběhu výměny

Nejjednodušší na výpočet bude průběh natočení páky ovládající otáčení otočného rámu. Stačí vydělit vypočítaný průběh natočení otočného rámu příslušným převodovým poměrem  $i_1$  (kde  $i_1 > 1$ ). Tento podíl jsem zároveň ještě vynásobil číslem -1, kvůli orientaci vačky 1 vůči mechanismu. Dále jsem se rozhodl, že budu natočení páky měřit od roviny, ve které leží obě rovnoběžné osy rotace vačky a páky. Pro tento účel jsem zvolil a přičetl k podílu (na obrázku vyznačený) úhel  $\varphi_{01}$  počátečního natočení páky vůči zmíněné rovině.

Podobně jsem z průběhů pohybů ramene výměníku vůči otočnému rámu vypočítal i průběhy natočení zbývajících dvou pák. Použil jsem k tomu navíc ještě odvozené přepočty pro klikové mechanismy.

Jediné zajímavé, co stojí ještě za zmínku, je ovlivnění vysouvání ramene výměníku rotací otočného rámu. Pokud totiž při otočení otočného rámu o určitý úhel nemá dojít k posunutí ramene výměníku vůči otočnému rámu, tak se musí hřídel ovládající rotaci klikového mechanismu 3 otočit spolu s otočným rámem o stejný úhel.

Z průběhů popisujících proces vyměňování nástrojů jsem tedy takto vypočítal průběhy natočení pák zapadajících do drážek vaček. Lze to vidět zde:



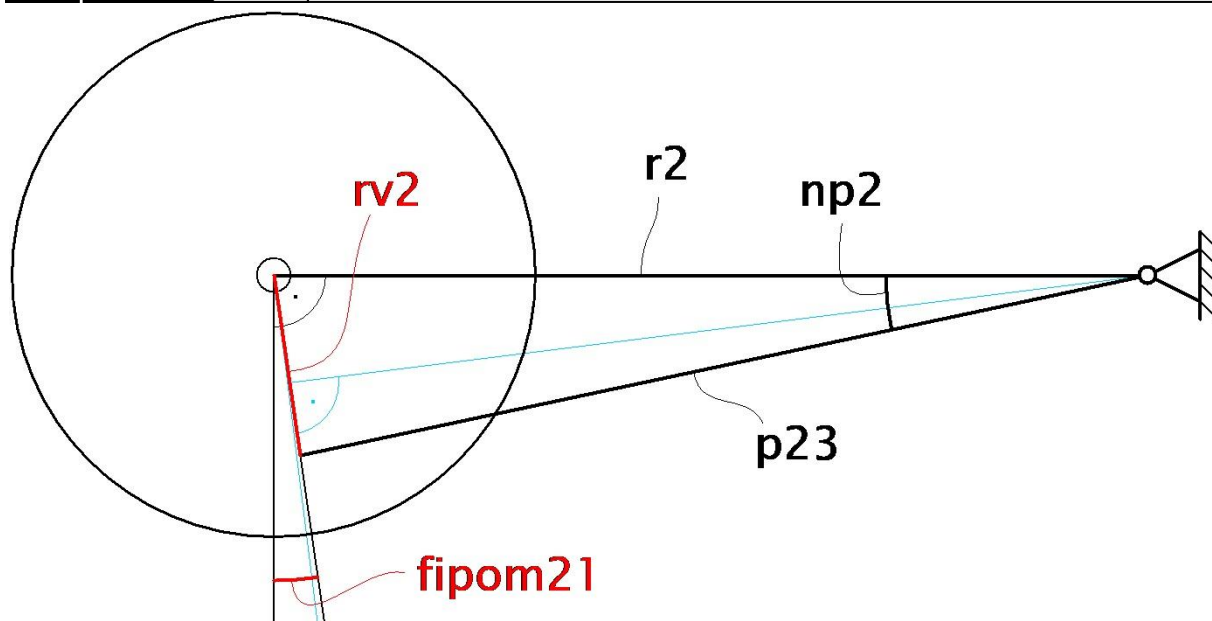
Obr. 13) Natočení pák zapadajících do drážek vaček v průběhu výměny

Jak lze vidět na obrázku (Obr. 13), klikové mechanismy příliš nezkrusily průběhy natočení pák 1 a 2. Klikové mechanismy pracují pouze v oblasti, kde se chovají poměrně lineárně. Za zmínku stojí průběh natočení páky 3, kde lze vidět ovlivnění rotací otočného rámu.

### 5.5 Výpočet tvaru vaček

Pro výpočet tvaru drážek ve vačkách jsem využil vypočítané průběhy natočení pák. U každé vačky jsem průběh natočení páky přepočítal na průběhy vzdálenosti  $r_v$  a úhlu  $\varphi_{pom}$ . Vzdálenost  $r_v$  je vzdálenost osy čepu (zapadajícího do drážky vačky) od osy rotace vačky. Úhel  $\varphi_{pom}$  je úhel, který bude nejjednodušeji popsán vyznačením na obrázku:





Obr. 14) Vyznačení rozměrů pro výpočet tvaru vačky

Na obrázku (Obr. 14) je možné vidět vyznačené rozměry pro výpočet tvaru druhé vačky. Výpočet zbylých dvou vaček bude stejný, a proto zde uvedu jenom jeden výpočet.

Vzdálenost  $r_{v2}$  se dá vypočítat pomocí kosinové věty:

$$r_{v2} = \sqrt{p_{23}^2 + r_2^2 - 2 \cdot p_{23} \cdot r_2 \cdot \cos(np2)} \quad (51)$$

Úhel  $\varphi_{pom21}$  se dá vypočítat pomocí sinové věty:

$$\frac{r_{v2}}{\sin(np2)} = \frac{p_{23}}{\cos(\varphi_{pom21})} \quad (52)$$

$$\varphi_{pom21} = \arccos\left(\frac{p_{23} \cdot \sin(np2)}{r_{v2}}\right) \quad (53)$$

V dalším kroku jsem k průběhu úhlu  $\varphi_{pom21}$  přičetl průběh úhlu otočení vačky. Uvažoval jsem, že se vačka otáčí konstantní úhlovou rychlostí, takže úhel natočení vačky je přímo úměrný času. Z tohoto součtu mi vyšel průběh, který jsem si označil jako  $\varphi_{pom22}$ .

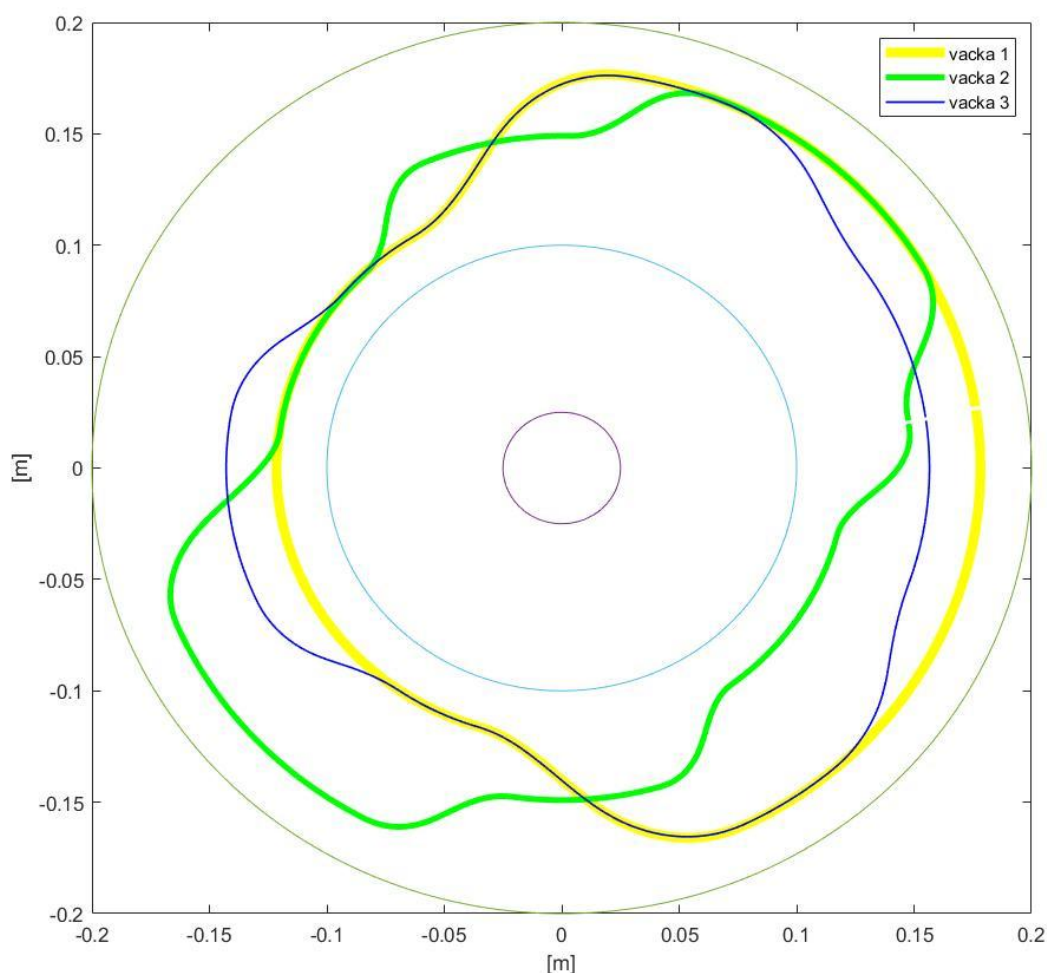
Průběhy  $r_{v2}$  a  $\varphi_{pom22}$  dohromady již zcela definují výsledný tvar drážky vačky. Každý bod tohoto tvaru je určen úhlem a vzdáleností od středu.

Pro moje účely ale budou výhodnější kartézské souřadnice:

$$vx2 = r_{v2} \cdot \cos(\varphi_{pom22}) \quad (54)$$

$$v_{y2} = r_{v2} \cdot \sin(\varphi_{pom22}) \quad (55)$$

Tímto způsobem jsem získal tvar drážek všech tří vaček v kartézských souřadnicích, je to vidět zde:



Obr. 15) Tvar drážek vaček

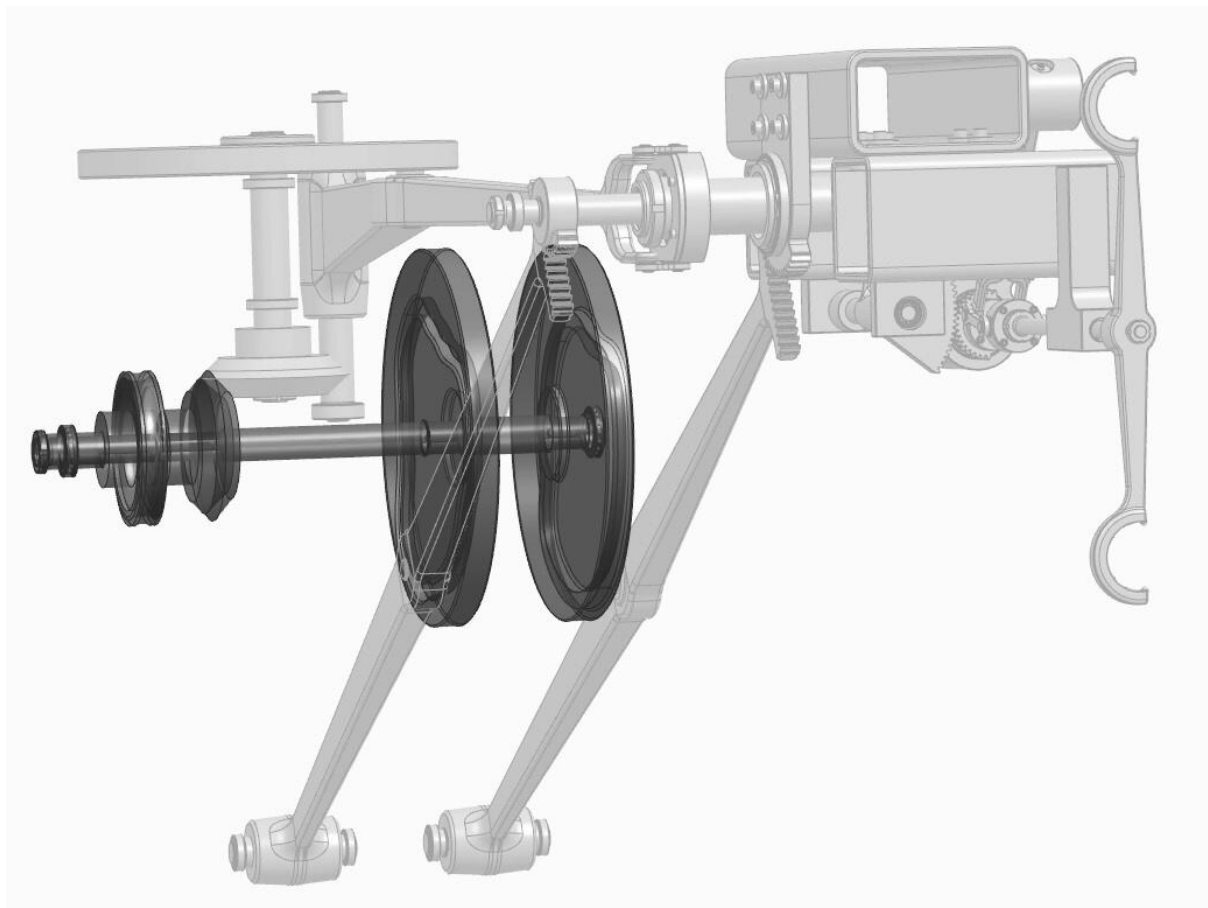
Na obrázku (Obr. 15) lze vidět všechny tři drážky vaček v jednom obrázku. Parametry celého mechanismu jsem zvolil tak, aby drážky ležely v přiměřeném mezikruží.

Vačka 1 ovládá otáčení otočného rámu, vačka 2 ovládá otáčení ramene výměníku vůči otočnému rámu a vačka 3 ovládá vysouvání ramene výměníku z otočného rámu.

## 6 NÁVRH KONSTRUKCE

### 6.1 Rotace otočného rámu

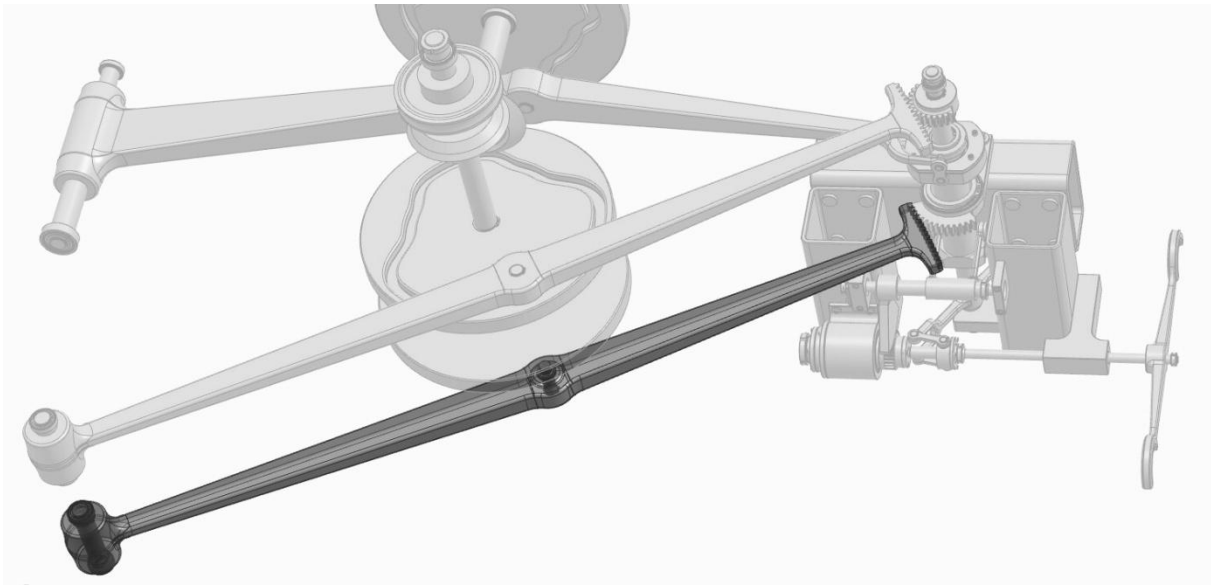
Vačka ovládající rotaci otočného rámu je umístěna na společné hřídeli společně s vačkou, která ovládá vysouvání ramene výměníku z otočného rámu. To lze vidět zde na obrázku:



Obr. 16) Vačka 1 a vačka 3

Dále je na obrázku (Obr. 16) vidět na stejné hřídeli ještě šnekové kolo a kuželové ozubené kolo (tato kola jsou vymodelována pouze bez zubů). Hřídel se otáčí ve dvou ložiskách. Tato ložiska jsou uložena v pevném rámu, který není vymodelován. Ložisko vlevo je zajištěno maticí, a proto může sloužit k přenosu axiálního zatížení v obou směrech.

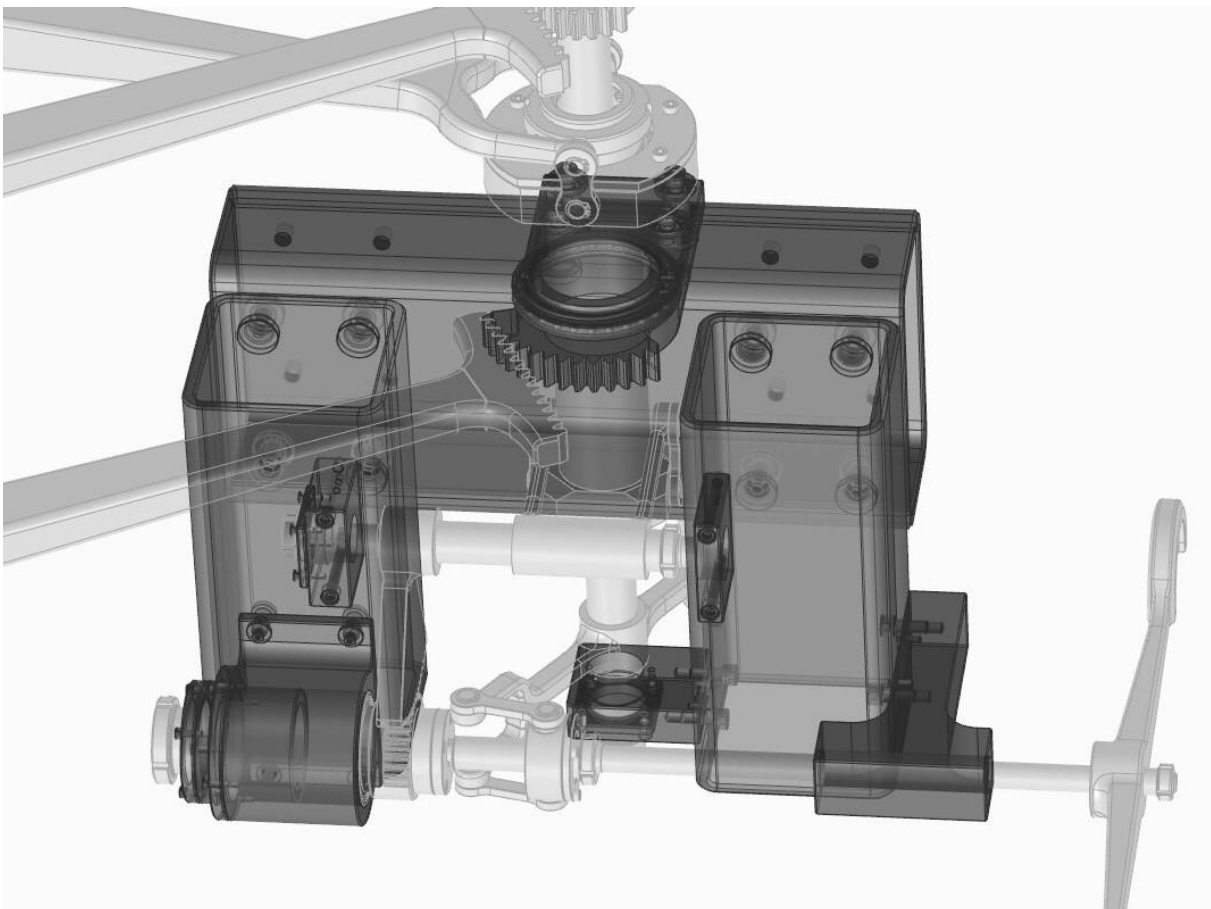
Do drážky vačky 1 zapadá čep z páky, kterou lze vidět zde:



Obr. 17) Páka 1

Tato páka z obrázku (Obr. 17) je zároveň také ozubený segment. V levé dolní části obrázku lze vidět 2 ložiska, ve kterých páka může rotovat. Ložiska musí být vhodně uložena v pevném rámu, aby byl vymezen jejich pohyb v obou axiálních směrech.

Tento ozubený segment zapadá do ozubeného segmentu, který je součástí otočného rámu. Otočný rám lze vidět zde:

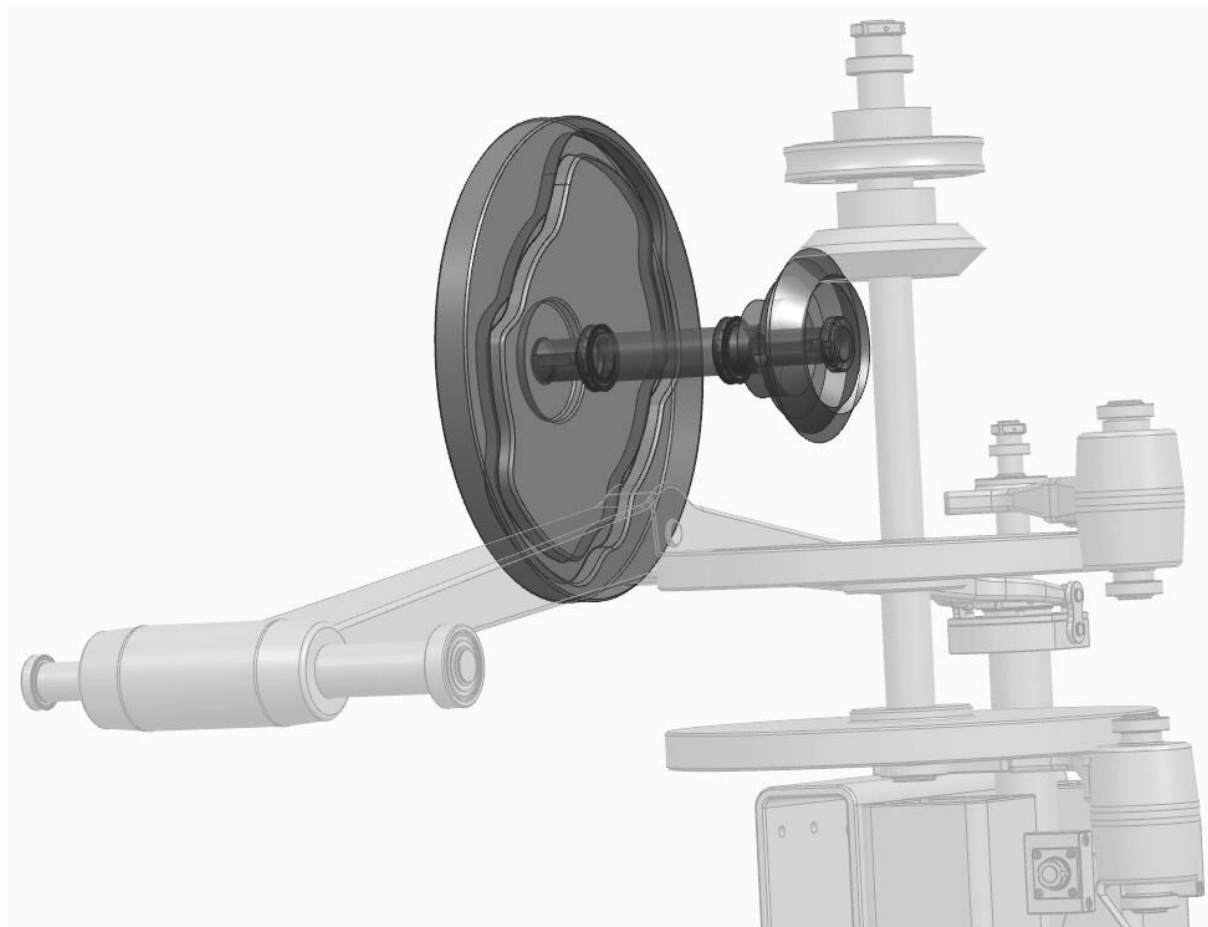


Obr. 18) Otočný rám

Jak lze vidět na obrázku (Obr. 18), základ otočného rámu tvoří sešroubované obdélníkové profily. Otočný rám se otáčí ve dvou ložiskách. Jedno je uloženo v pevném rámu a přenáší pouze radiální zatížení (na obrázku v horní části). Druhé přenáší radiální i axiální zatížení na hřídel ležící na ose otáčení otočného rámu. Na rámu jsou ještě přišroubovány díly sloužící k uložení ložisek a vedení dalších mechanismů.

## 6.2 Rotace ramene výměníku

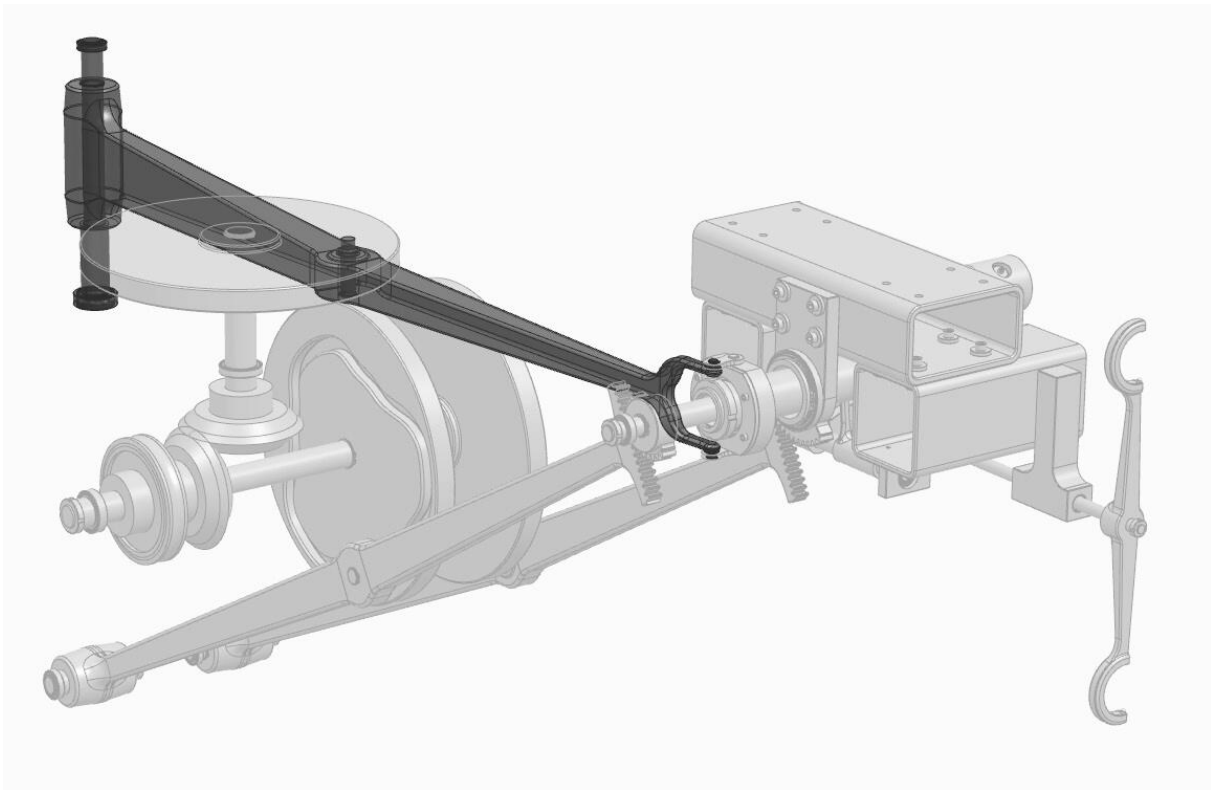
Vačka ovládající rotaci ramene výměníku vůči otočnému rámu je umístěna na vlastní hřídeli, jak je vidět zde:



Obr. 19) Vačka 2

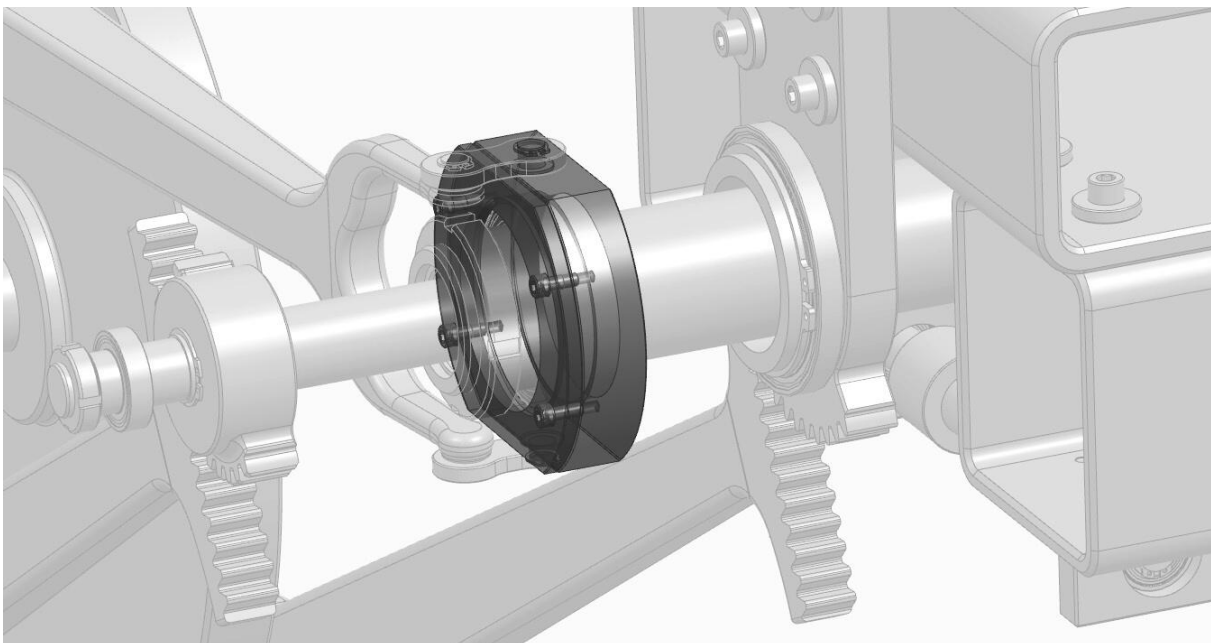
Mezi touto hřídelí a společnou hřídelí vačky 1 a 3 je kuželový ozubený převod. Převodový poměr tohoto převodu je 1, takže má vačka 2 stejně velkou úhlovou rychlost jako ostatní dvě vačky. Dále je možné na obrázku (Obr. 19) vidět ložiska. Tato ložiska jsou opět uložena v pevném rámu. Ložisko zajištěné (společně s kuželovým ozubeným kolem) maticí může mít v pevném rámu vymezený pohyb v obou axiálních směrech.

Následující část mechanismu se hodně podobá části, kterou jsem už popsal, takže jen přidávám obrázek:



Obr. 20) Páka 2

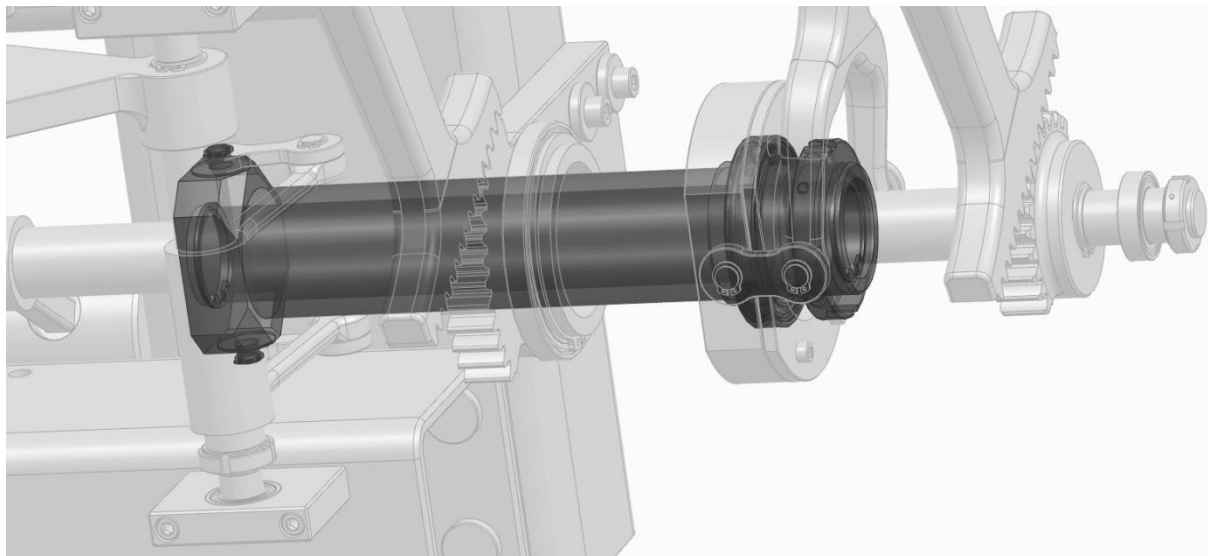
Tato páka na obrázku (Obr. 20) je součástí klikového mechanismu 22.  
 Translační pohyb klikového mechanismu 22 koná tento díl:



Obr. 21) Translační část klikového mechanismu 22

Translační část klikového mechanismu 22, jak lze vidět na obrázku (Obr. 21), je pouzdrem ložiska, které slouží k přenosu síly v axiálním směru.

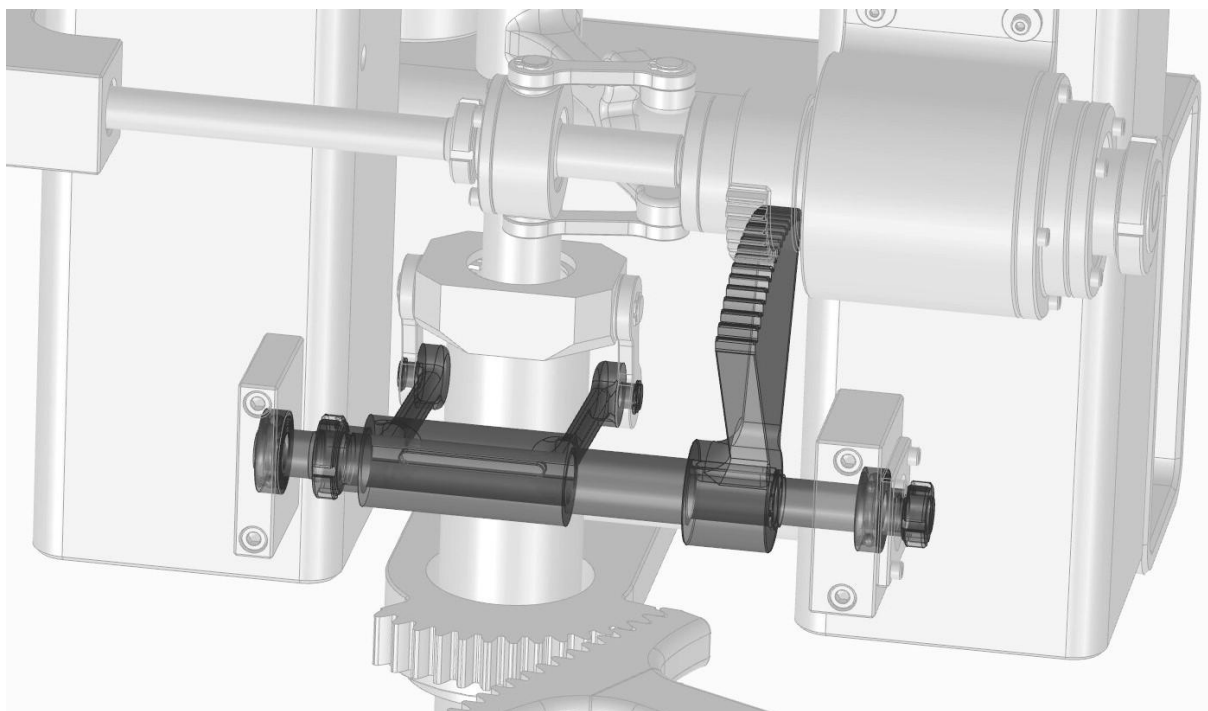
Tato síla se přenáší na translační část klikového mechanismu 21, kterou je možné vidět zde na obrázku:



Obr. 22) Translační část klikového mechanismu 21

Na obrázku (Obr. 22) už je možné vidět i zmíněné ložisko zajištěné maticí. Ložisko zde musí být, protože translační části mechanismů 22 a 21 vůči sobě v určitých částech průběhu vyměňování rotují. Translační část klikového mechanismu se pohybuje na dvou klecových vedeních, která jsou nasunuta na vnitřní hřídeli.

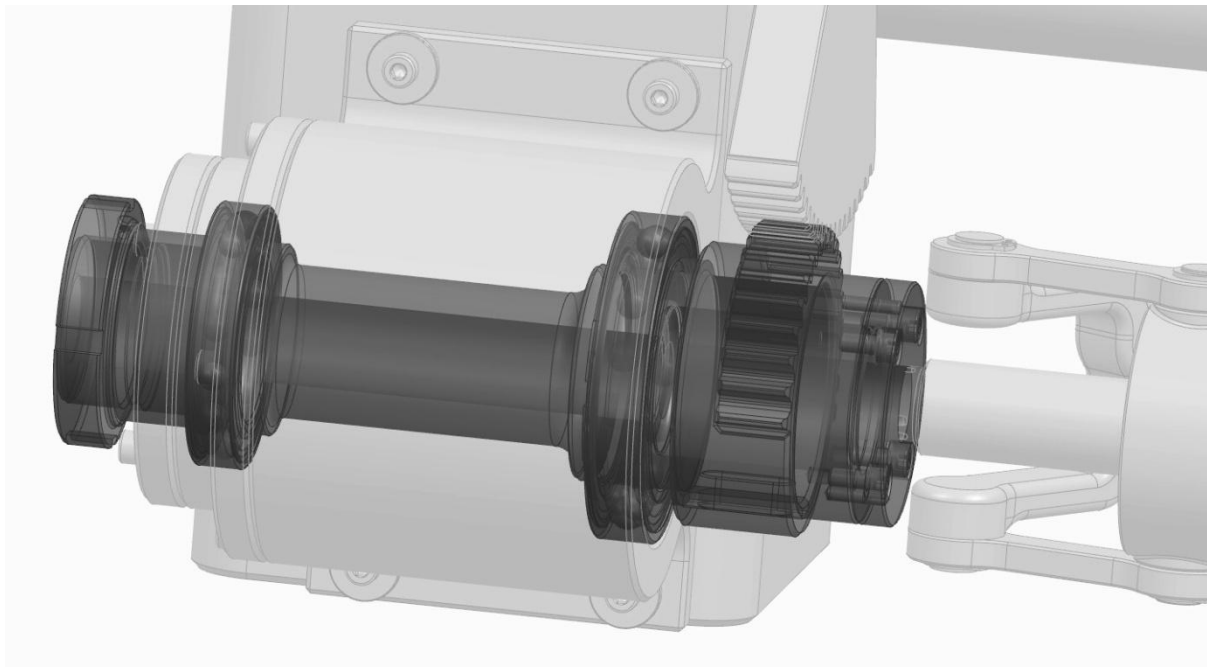
Rotační část klikového mechanismu 21 je uložena na společné hřídeli s ozubeným segmentem, jak lze vidět zde:



Obr. 23) Hřídel rotace klikového mechanismu 21

Hřídel na obrázku (Obr. 23) se otáčí ve dvou ložiskách, která jsou uložena v otočném rámu. Ložisko vpravo na obrázku je na hřídeli zajištěno maticí a v rámu je uloženo tak, aby mohlo být přenášeno zatížení v obou axiálních směrech.

Ozubený segment s větším průměrem zapadá do ozubeného segmentu s menším průměrem, který je možné vidět tady:



Obr. 24) Dutá hřídel

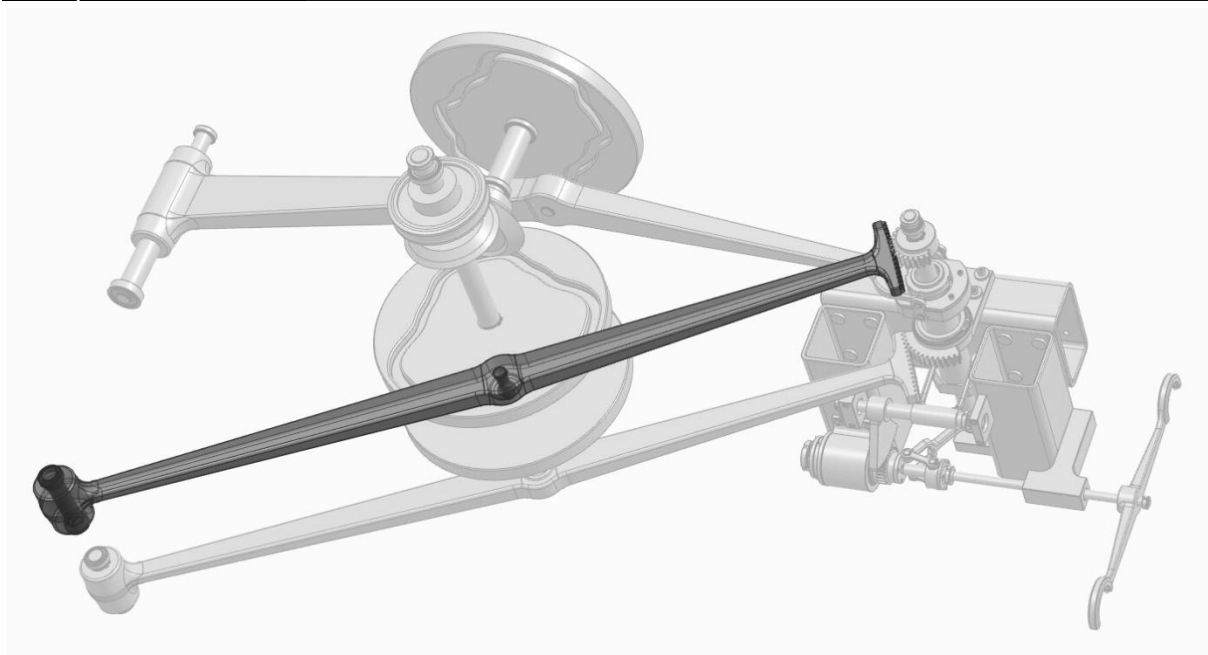
Ozubený segment z obrázku (Obr. 24) je umístěn na společné duté hřídeli spolu s kuličkovým vedením umožňujícím přenášení točivého momentu (vedení je nasunuto na tyči s drážkami). Vedení je za přírubu přišroubováno ke hřídeli. Dutá hřídel se otáčí ve dvou ložiskách, která jsou uložena v otočném rámu. Ložisko více vlevo na obrázku je na duté hřídeli zajištěno maticí a v otočném rámu je uloženo tak, aby mohlo být přenášeno zatížení v obou axiálních směrech.

Rameno výměníku je umístěno na prodloužení zmíněné tyče s drážkami a jeho rotace je tedy stejná jako rotace duté hřídele.

### 6.3 Posouvání ramene výměníku

Umístění vačky ovládající posouvání ramene výměníku už bylo popsáno výše, takže to zde nebudu opakovat. Dále zkrátím i popis páky zapadající do této vačky, protože páka 3 je podobná páce 1. Páku 3 je možné vidět zde:

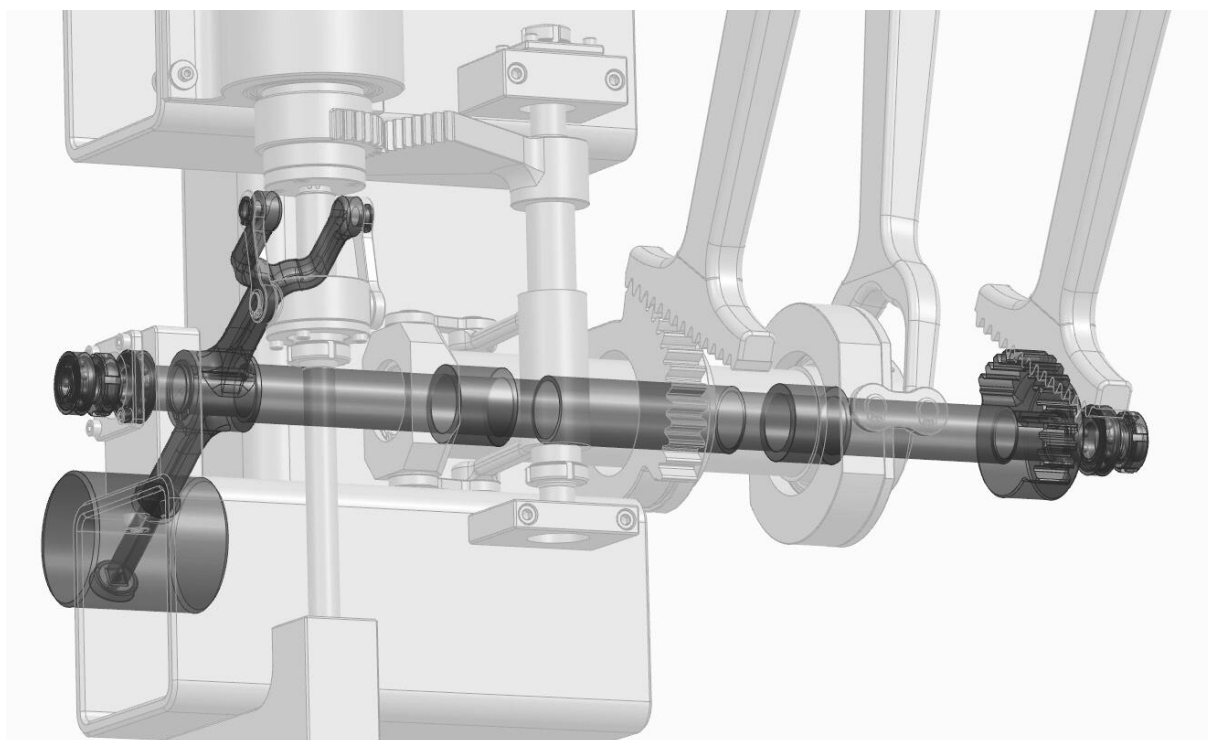




Obr. 25) Páka 3

Na obrázku (Obr. 25) je vidět, že je páka 3 opravdu podobná páce 1. Liší se pouze prohnutím a poloměrem ozubeného segmentu.

Ozubený segment páky otáčí hřídelí, která je vidět zde:



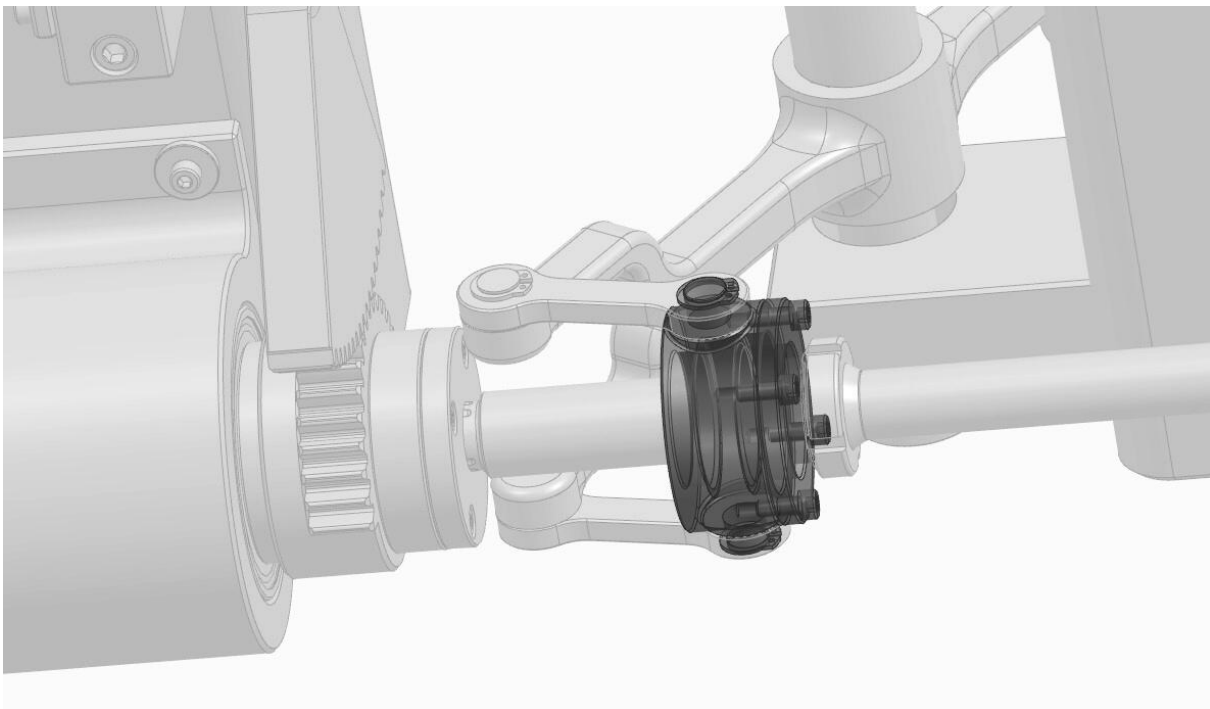
Obr. 26) Hřídel rotace klikového mechanismu 3

Na obrázku (Obr. 26) je na hřídeli kromě ozubeného segmentu vidět více dílů. Jsou zde vidět nasunutá zmíněná klecová vedení (vymodelovaná pouze schematicky). Jsou vidět 3 ložiska. Jedno (také už zmíněné) je umístěno mezi otočným rámem a hřídelí. Zbývá dvě slouží

k uložení hřídele v pevném rámu. Ložisko na obrázku vpravo je na hřídeli zajištěno maticí a může tedy na pevný rám přenášet i axiální zatížení v obou směrech.

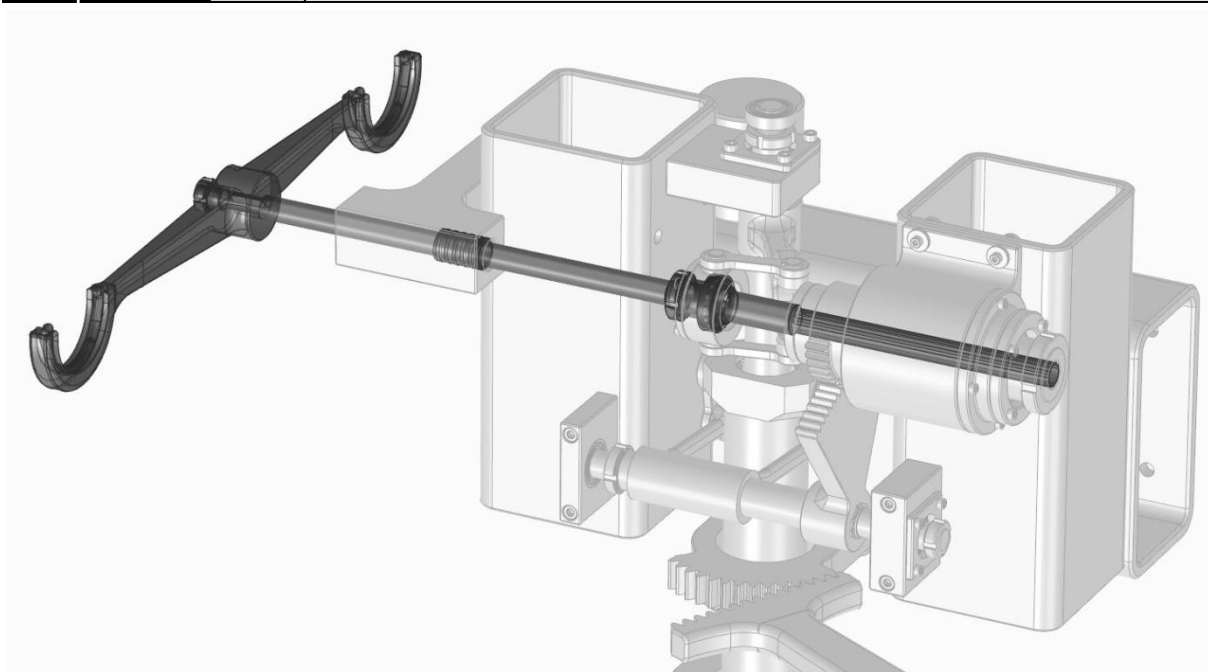
Na opačnou stranu od kliky klikového mechanismu 3 jsem navrhl umístění závaží. Toto závaží slouží ke zmenšení statického momentu síly na hřídeli od působení gravitace v situaci, kdy je tyč ramene výměníku ve svislé poloze. Závaží ale zvětšuje dynamické síly (a také statický moment v situaci, kdy je tyč ve vodorovné poloze), takže by měl být při návrhu hmotnosti závaží zvolen vhodný kompromis.

Klikový mechanismus 3 nemůže posouvat přímo rameno výměníku, protože rameno výměníku v určitých částech průběhu vyměňování rotuje (vůči otočnému rámu). Sílu na rameno výměníku lze ale přenášet opět přes ložisko, jak je možné vidět zde:



Obr. 27) Translační část klikového mechanismu 3

Podobné konstrukční řešení, jaké je vidět na obrázku (Obr. 27), už jsem popsal výše, takže rovnou přejdu k obrázku s ramenem výměníku:

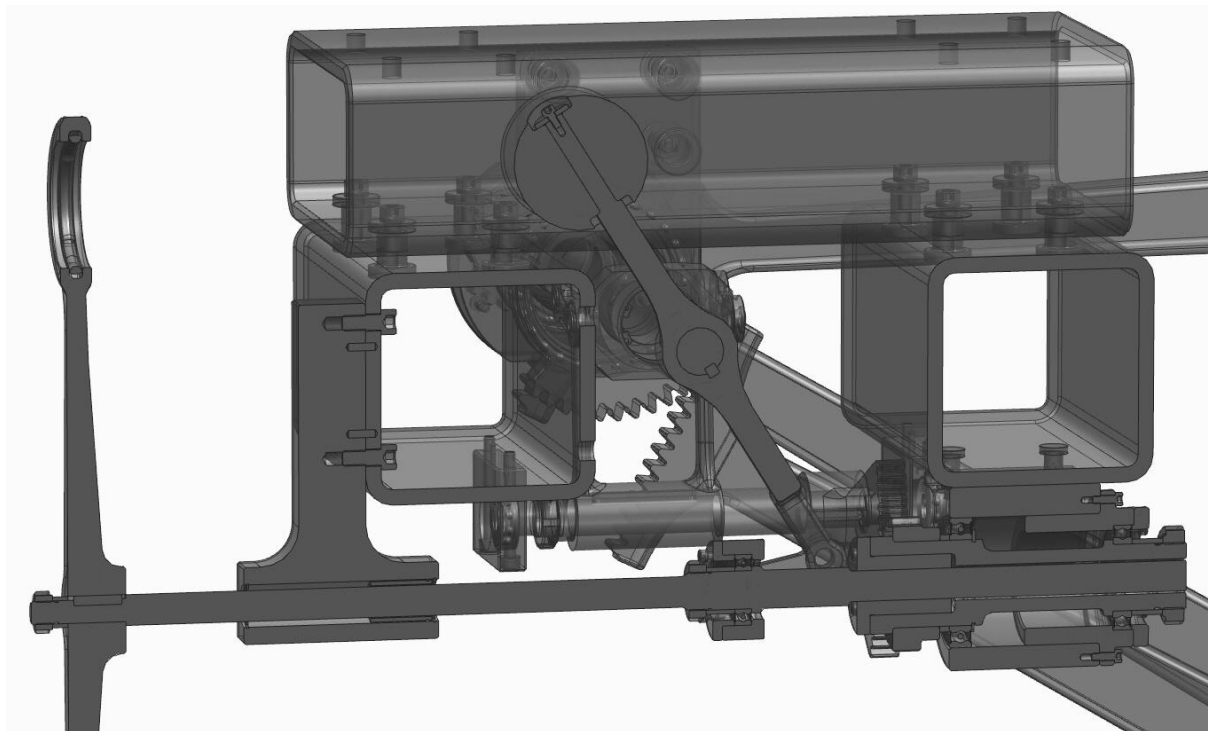


Obr. 28) Rameno výměníku

Na obrázku (Obr. 28) je možné vidět v pravé části zmíněnou tyč s drážkami, dále směrem doleva ložisko zajištěné maticí, klecové vedení (vymodelované pouze zjednodušeně) uložené v dílu otočného rámu a nakonec samotné rameno výměníku.

#### 6.4 Detaily a řezy

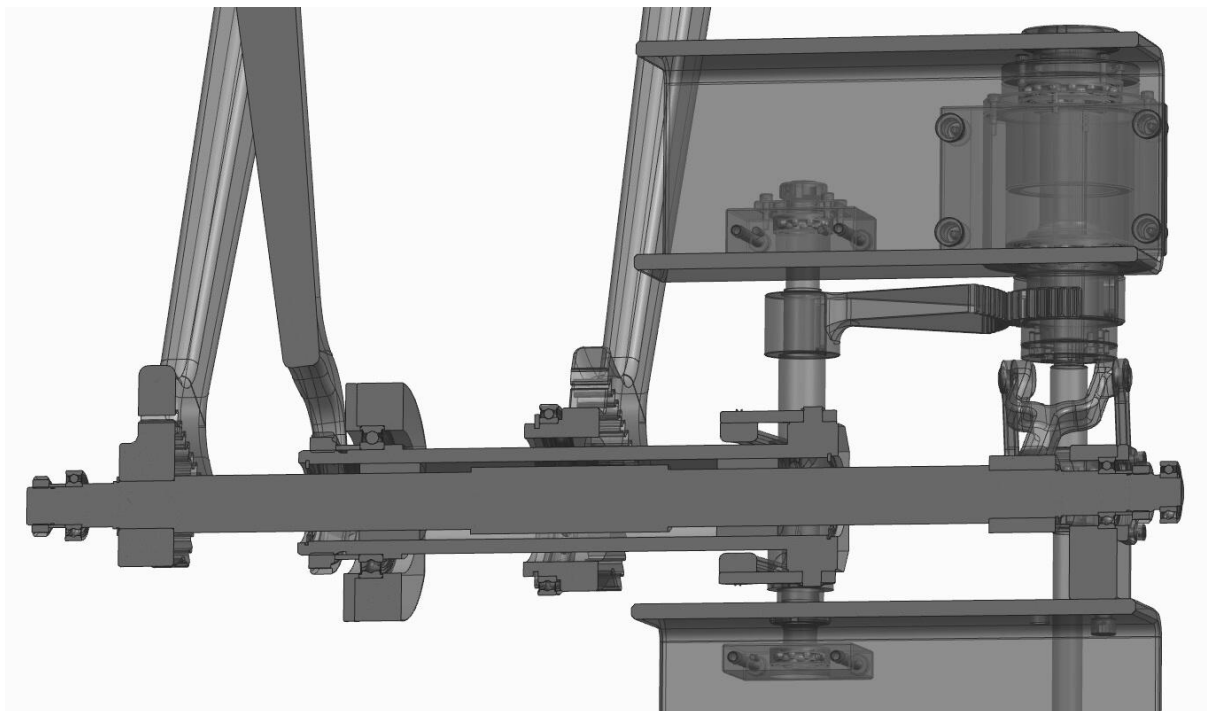
Na obrázcích pro popis jednotlivých pohybů nejsou zřetelně vidět některé detaily, a proto sem přiložím několik dalších obrázků:



Obr. 29) První řez výměníkem

Na obrázku (Obr. 29) lze vidět řez procházející osou tyče ramene výměníku, kolmý na osu rotace otočného rámu. Zde je asi nejzajímavější řez dutou hřídelí v pravé dolní části obrázku.

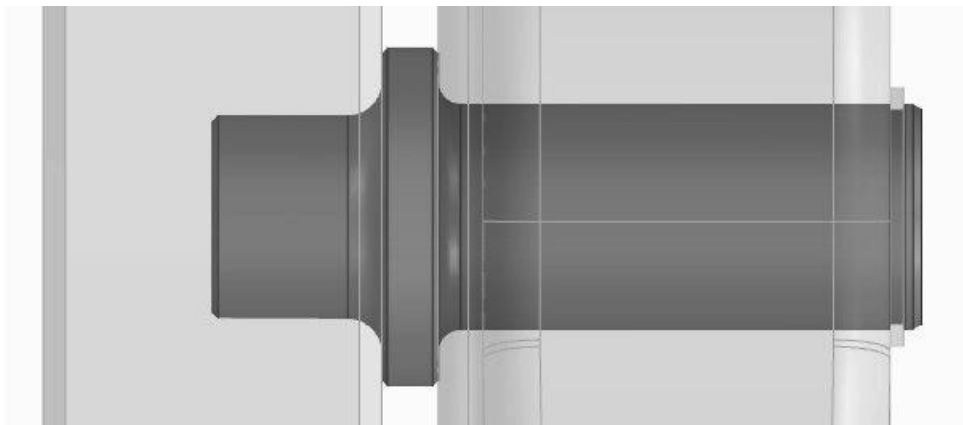
Podobný je i další obrázek:



Obr. 30) Druhý řez výměníkem

Zde na obrázku (Obr. 30) je řez procházející osou rotace otočného rámu, rovnoběžný s osou tyče ramene výměníku. Je na něm vidět umístění a zajištění klecových vedení ve střední části hřídele.

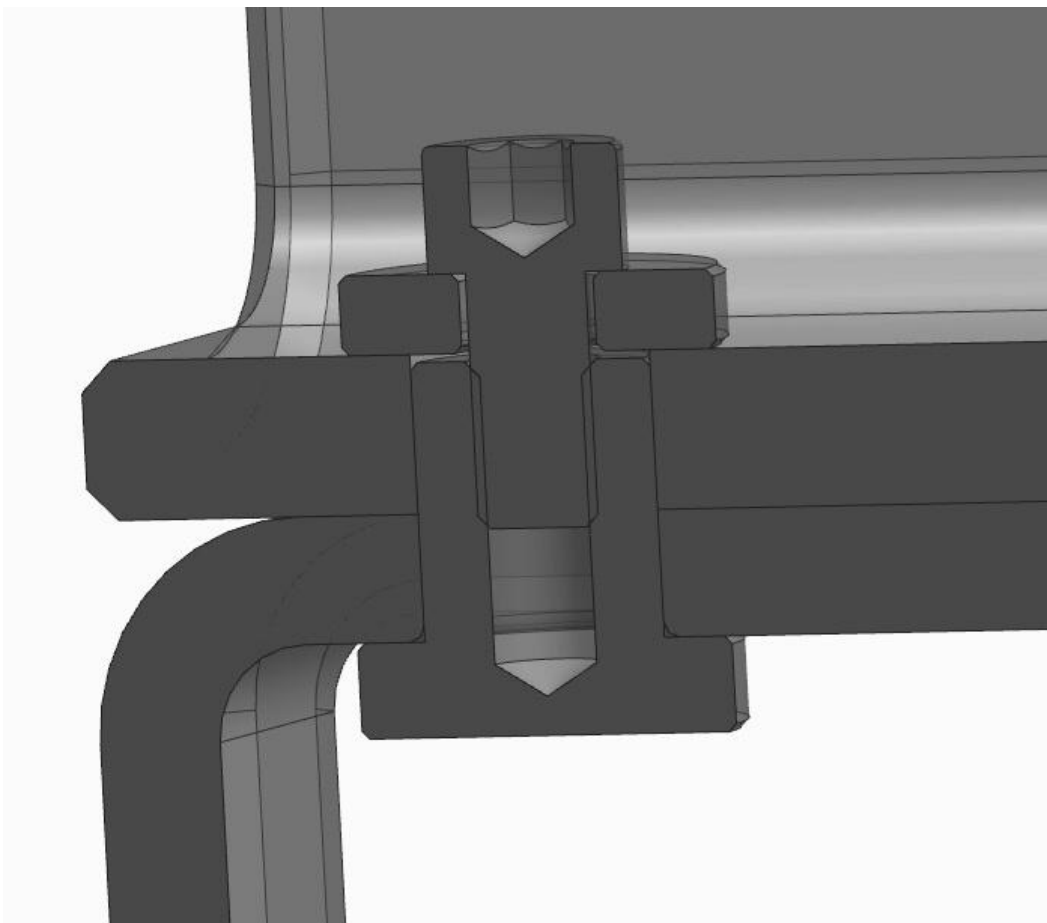
Dále přikládám obrázek detailu čepu zapadajícího do vačky:



Obr. 31) Čep zapadající do vačky

Na obrázku (Obr. 31) je v pravé části páka a v levé části vačka. Čep s pákou není vyrobený z jednoho kusu, aby bylo možné oba díly odlišně tepelně zpracovat a různě povrchově upravit. Zároveň by takto mohl být čep jednodušeji vyměnitelný po opotřebení. Čep je v tělese páky zajištěný proti vypadnutí pomocí pojistného kroužku.

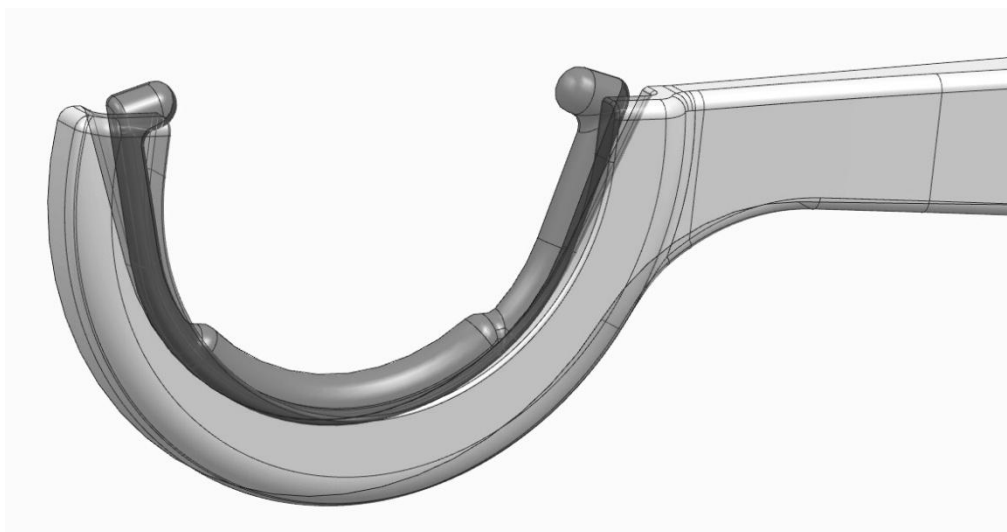
Na dalším obrázku je detail šroubového spojení obdélníkových profilů:



Obr. 32) Šroubové spojení

Toto spojení by mělo být s tvarovým stykem. Řešení, které jsem použil, (jedno z více možných) lze vidět na obrázku (Obr. 32). Na opačné straně proti hlavě šroubu by mohla být šestihránná hlava.

Dále lze vidět obrázek zakončení ramene výměníku (části uchopující nástroj):

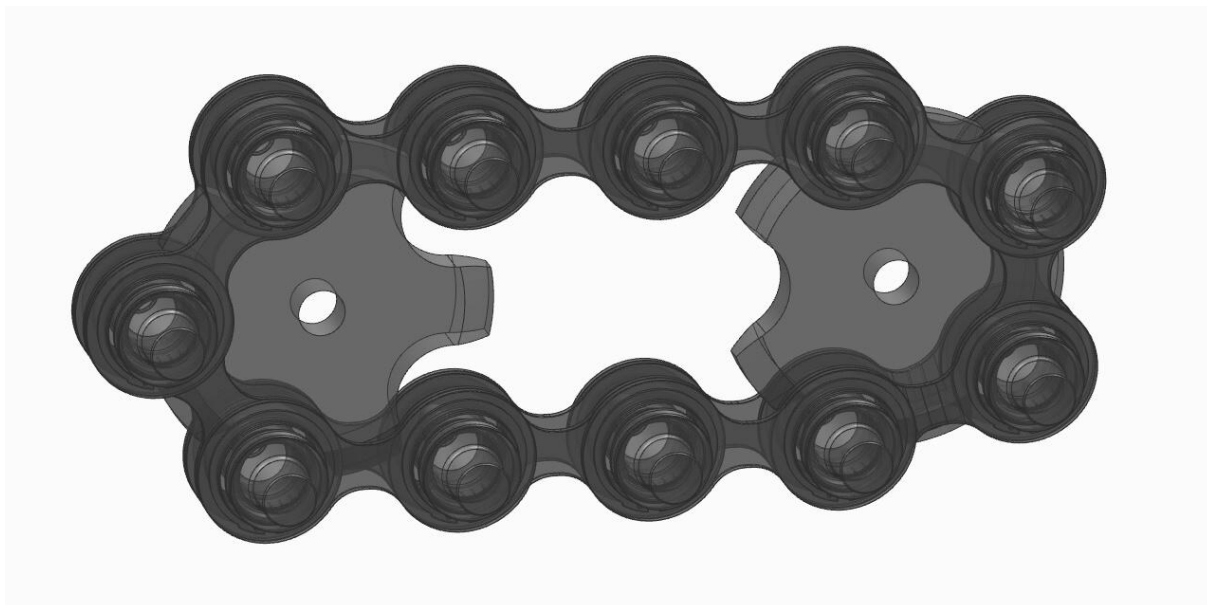


Obr. 33) Zakončení ramene výměníku

Pro větší přehlednost jsem na obrázku (Obr. 33) skryl zadní souměrnou část ramene výměníku. Řez byl proveden rovinou souměrnosti ramene výměníku (tou, která je kolmá na osu rotace ramene výměníku). K uchopení nástroje dojde s využitím sil od elastické deformace zobrazeného dílu.

### Zásobník nástrojů

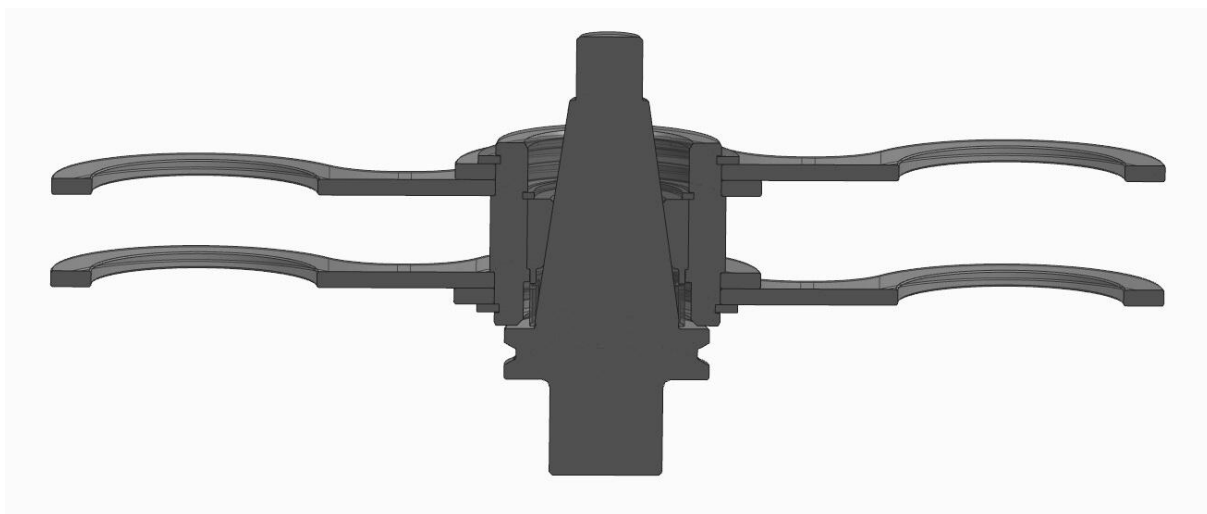
K 3D modelu výměníku jsem přidal i jednoduchý řetězový zásobník nástrojů. Zásobník nástrojů by ale mohl být řešen i jiným způsobem, například by mohl být řetězový meandrový. Zásobník lze vidět zde:



Obr. 34) Řetězový zásobník nástrojů

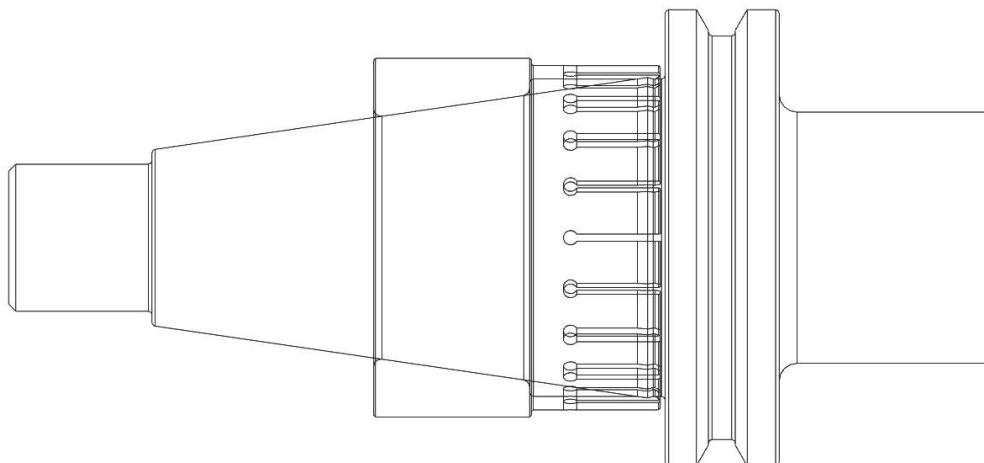
Při výměně je uchopen nástroj ze zásobníku, který je nejvíce vlevo na obrázku (Obr. 34). V tomto natočení zásobníku nepřekáží ramenu výměníku nástroje umístěné ve vedlejších osách řetězu.

Způsob uložení nástroje v ose řetězu zásobníku je možné vidět lépe na tomto řezu:



Obr. 35) Řez jednou osou řetězu zásobníku nástrojů

Nástroj je v axiálním směru v zásobníku zajištěn opět s využitím elastické deformace. Na obrázku (Obr. 35) není toto zajištění příliš zřetelné, a proto přikládám ještě jeden detail:

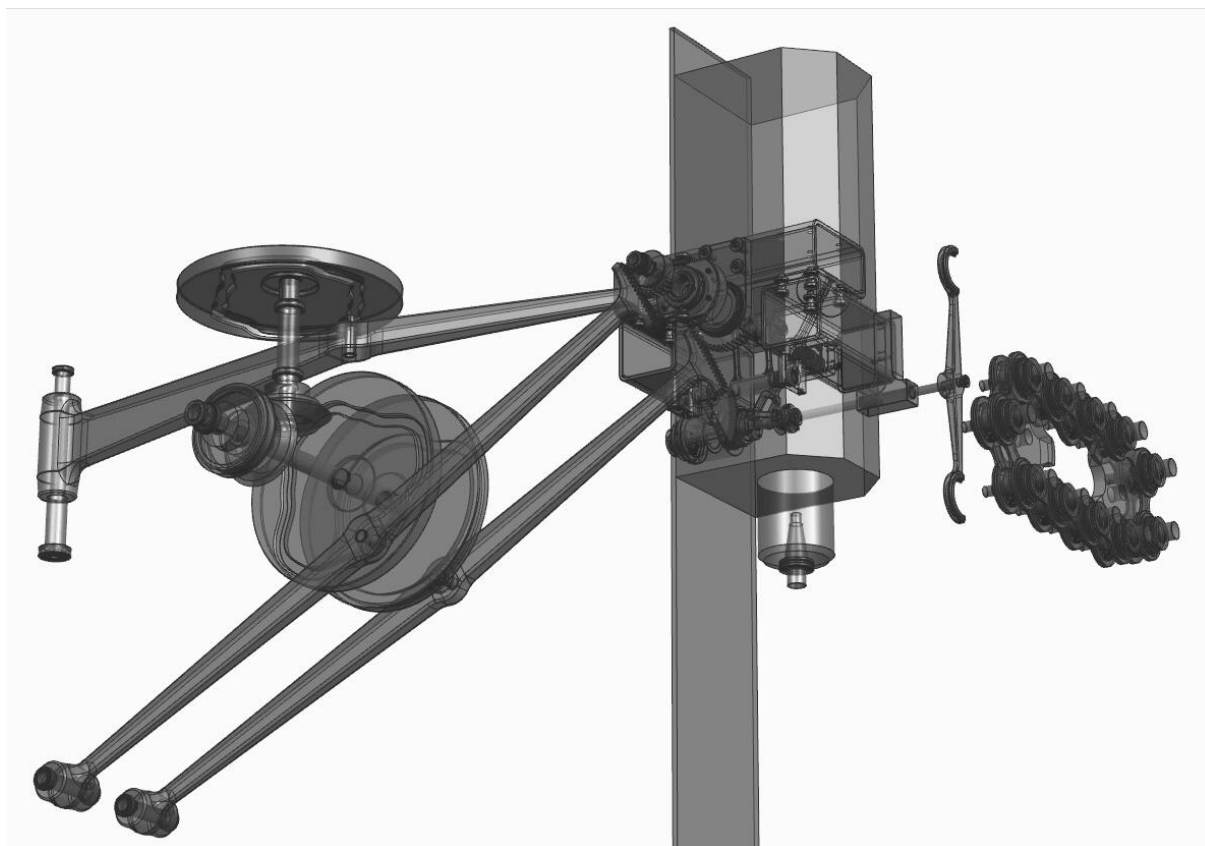


Obr. 36) Detail uložení nástroje v zásobníku

Řešení na obrázku (Obr. 36) je jen jedno z více možných. Pro odlišný tvar nástroje by pravděpodobně bylo nutné zvolit jiné řešení.

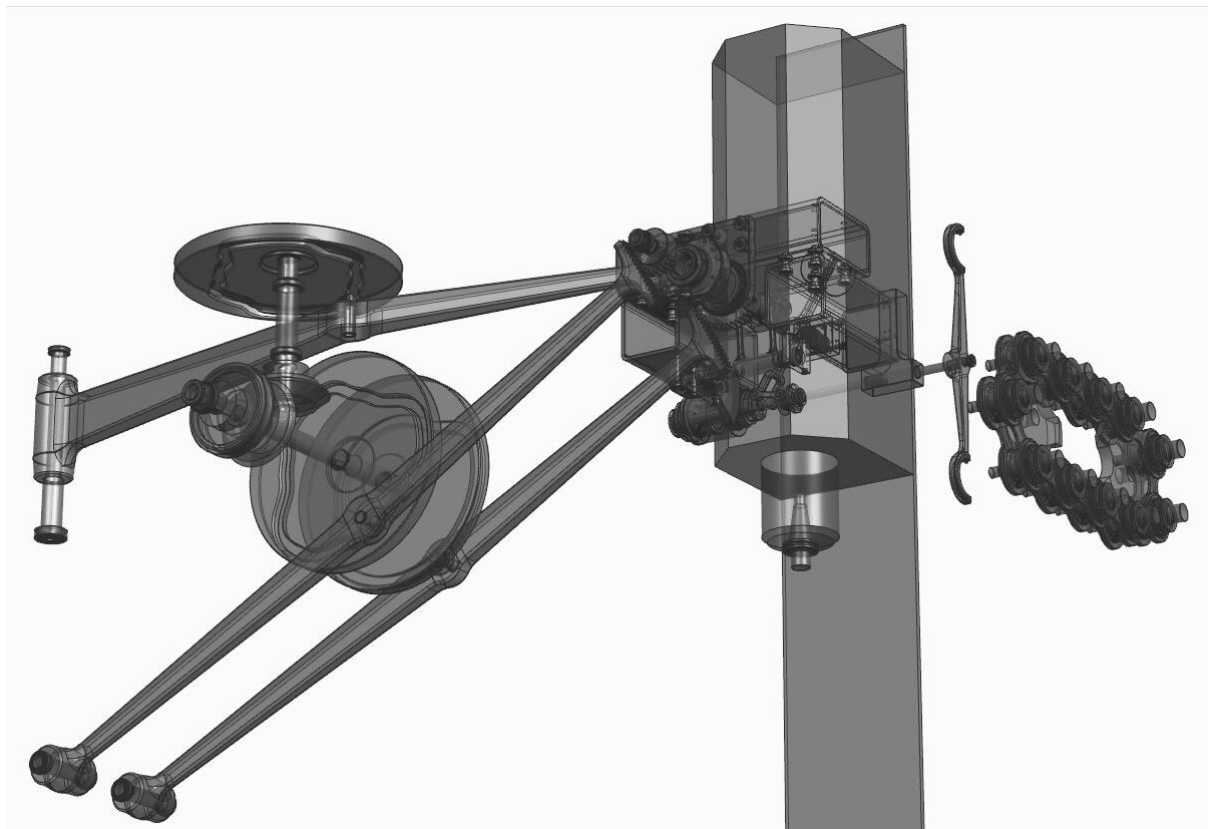
## 6.5 Celý výměník

Pro názornější vizualizaci 3D modelu jsem do jedné sestavy umístil k výměníku i zásobník nástrojů a zjednodušený vřeteník. Tuto celou sestavu je možné vidět zde na obrázku:



Obr. 37) První varianta umístění výměníku vůči vřeteníku

Na obrázku (Obr. 37) je vidět umístění výměníku a zásobníku nástrojů vůči vřeteníku, které je v koncepční části této práce označeno jako varianta 1. Variantu 2 je možné vidět zde:

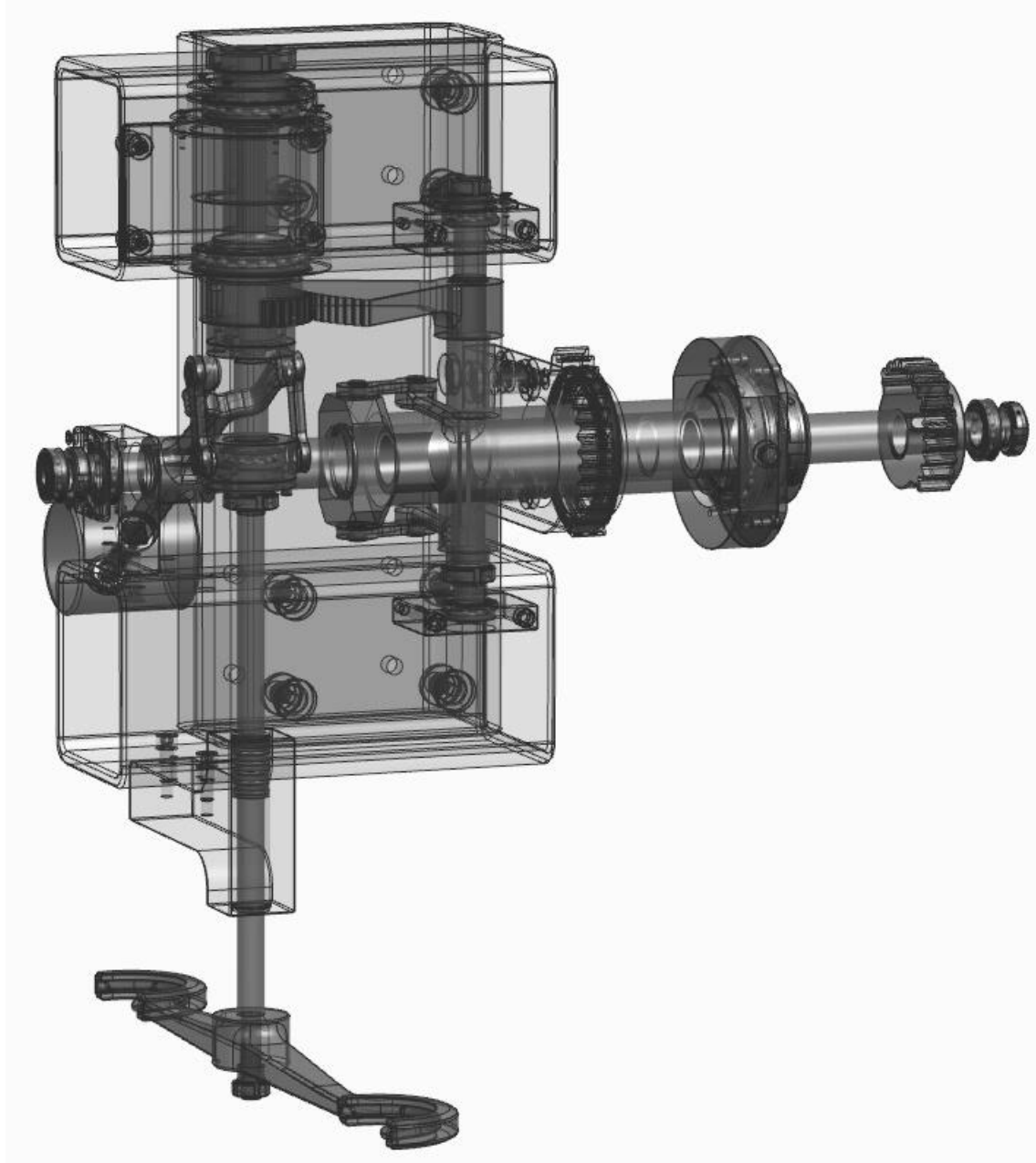


Obr. 38) Druhá varianta umístění výměníku vůči vřeteníku

Konstrukce pohyblivých částí výměníku (včetně tvarů vaček) se u varianty 2 z obrázku (Obr. 38) neliší od konstrukce pohyblivých částí výměníku u varianty 1.

Otočný rám výměníku obsahuje více detailů, a proto přikládám ještě tento obrázek:





Obr. 39) Otočný rám a jeho vnitřní mechanismy

Tento obrázek (Obr. 39) již není nutné příliš popisovat, protože jsem jednotlivé části vysvětlil výše.



## 7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Tato práce by se dala dále rozpracovávat o silové výpočty, které však jsou až dalším krokem po (v práci předloženém) kinematickém řešení. Dále je uveden nástin postupu takových výpočtů, které však nebyly předmětem zadání. Navržené kinematické řešení je výsledkem snahy o co nejdokonalejší přiblížení se funkci manipulátoru, jehož kinematické schéma (uváděné v literatuře) je na obrázku číslo 2.

Pro snížení zatížení vaček by bylo vhodné, aby byl celý výměník co nejlépe staticky vyvážený (to bych lépe definoval asi tak, aby se žádná část výměníku zastaveného v libovolné poloze nedala vlivem gravitace do pohybu při odpojení od vaček a při minimální velikosti tření). Dokonalého vyvážení nepůjde dosáhnout, ale je možné se tomu přiblížit. Za tímto účelem jsem například přidal protizávaží ke klikovému mechanismu 3. Dále jsem se snažil co nejvíce vyvážit otočný rám. Navrhl jsem takový tvar rámu, aby byl z větší části situovaný na opačné straně od osy otáčení než jeho vnitřní mechanismy.

Tyto úpravy ale měly za následek zvětšení momentu setrvačnosti. Z hlediska zatížení od dynamických jevů by bylo lepší, kdyby byly všechny momenty setrvačnosti (a hmotnosti) co nejmenší. Pro zachování stejného zatížení při zvětšení momentů setrvačnosti lze jednoduše zmenšit rychlost otáčení vaček. Rychlost by ale neměla být příliš zmenšena kvůli požadavku, aby byl co nejkratší čas výměny. V rámci optimalizace by měl být vypočítán nejkratší čas výměny, při kterém ještě nebude překročeno maximální dovolené napětí.

Výpočet by se v kostce skládal z několika částí. Z výpočtu tří redukovaných momentů setrvačnosti vztažených k pohybům tří pák (zapadajících do drážek vaček). Dílčí momenty setrvačnosti by mohly být zjištěny přímo v CAD softwaru. Dále z výpočtu úhlových zrychlení pák. To by se vypočítalo dvojitým derivováním známých průběhů natočení pák. Z toho by se dalo podle vzorce  $M = \alpha \cdot J$  vypočítat zatížení vaček od dynamických jevů. Nesmí se u toho ale zapomenout na přičtení redukovaných okamžitých statických silových momentů.

S přihlédnutím na tento mezivýsledek zatížení jednotlivých pák by mohly konečně být správně vůči sobě zvoleny úhly otočení vaček potřebné pro jednotlivé pohyby ramene výměníku. Pro lepší představu zmíněné úhly odpovídají rozměru  $b$  ve výpočtu v části práce zabývající se koncepcí výměníku.

S takto známým zatížením už bude možné ověřit, jestli jsou všechny součásti výměníku dostatečně pevné. Zároveň se takto odhalí místa, kde by naopak ještě mohla být ubraná hmotnost.



## 8 ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval návrhem konstrukce jednoúčelového manipulátoru pro automatickou výměnu nástrojů s třívačkovým generátorem pracovního cyklu.

V přehledu současného stavu poznání jsem shrnul základní informace o zásobnících nástrojů a o manipulátorech pro výměnu nástrojů.

Dále jsem se zabýval koncepcí výměníku. Zde jsem z více možných řešení vybral jedno, které mi přišlo nejlepší. Také jsem uvedl důvody, které mě k této volbě vedly.

Cílem výpočtové části práce bylo získání tvarů drážek ve vačkách. Postupoval jsem tak, že jsem nejprve navrhl pohyby ramene výměníku potřebné pro jednu výměnu (pohyby jsem popsal pomocí průběhů posunutí a natočení ramene výměníku). To jsem použil pro výpočet průběhů natočení pák přímo ovládaných vačkami. Z tohoto mezivýsledku už bylo možné dopočítat hledané tvary drážek ve vačkách. Všechny potřebné rovnice jsou zde uvedeny, popsány a odvozeny. Výpočty jsem prováděl s využitím softwaru Matlab. Kompletní výpočtový skript je v příloze. Skript navíc ještě obsahuje i jednoduchou animaci vyměňování nástrojů. S pomocí tohoto výpočtu jsem mohl vhodně zvolit parametry výměníku potřebné ke konstrukci.

V přílohách lze kromě skriptu najít ještě 3D model manipulátoru pro výměnu nástrojů ve výměnném formátu STP, výkres sestavy manipulátoru ve formátu PDF a druhou animaci vyměňování ve formátu MP4, která byla vytvořena v softwaru Adams (model vytvořený v Adamsu příložený není, protože přesahuje dovolenou velikost přílohy 15 MB).

Zmíněný 3D model je v části práce zabývající se konstrukcí výměníku poměrně detailně popsán s využitím obrázků.



## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

[2] MATIČKA, Robert a Jaroslav TALÁCKO. *Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů*. Praha: SNTL, 1980.

[3] 3D-CAD. *Thk.com* [online]. THK [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.thk.com/?q=cz>

[4] VÝROBKY. *Skf.com* [online]. SKF [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz>

[5] Vedení a jiné příslušenství. *Meusburger.com* [online]. Meusburger [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://ecom.meusburger.com/index/index.asp>

[6] Guide elements. *Strack.de* [online]. STRACK [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.strack.de/en/shop/>





## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1)	Zasekávací a napichovací způsob vyměňování.....	18
Obr. 2)	Kinematické schéma výměníku [2] .....	19
Obr. 3)	Upravené kinematické schéma výměníku .....	21
Obr. 4)	Umístění výměníku a zásobníku nástrojů vůči vřeteníku.....	23
Obr. 5)	Alternativní návrh kinematického schéma .....	24
Obr. 6)	Model jednoduché vačky.....	25
Obr. 7)	Graf závislosti síly FN na úhlu alfa .....	27
Obr. 8)	Průběh zrychlení v čase.....	29
Obr. 9)	Návrh procesu vyměňování nástrojů.....	34
Obr. 10)	Grafy popisující proces vyměňování nástrojů .....	35
Obr. 11)	Náčrt klikového mechanismu 21 .....	36
Obr. 12)	Schéma klikových mechanismů 22 a 3.....	37
Obr. 13)	Natočení pák zapadajících do drážek vaček v průběhu výměny .....	40
Obr. 14)	Vyznačení rozměrů pro výpočet tvaru vačky .....	41
Obr. 15)	Tvar drážek vaček .....	42
Obr. 16)	Vačka 1 a vačka 3 .....	43
Obr. 17)	Páka 1.....	44
Obr. 18)	Otočný rám.....	44
Obr. 19)	Vačka 2 .....	45
Obr. 20)	Páka 2.....	46
Obr. 21)	Translační část klikového mechanismu 22 .....	46
Obr. 22)	Translační část klikového mechanismu 21 .....	47
Obr. 23)	Hřídel rotace klikového mechanismu 21 .....	47
Obr. 24)	Dutá hřídel.....	48
Obr. 25)	Páka 3.....	49
Obr. 26)	Hřídel rotace klikového mechanismu 3 .....	49
Obr. 27)	Translační část klikového mechanismu 3 .....	50
Obr. 28)	Rameno výměníku .....	51
Obr. 29)	První řez výměníkem.....	51
Obr. 30)	Druhý řez výměníkem .....	52
Obr. 31)	Čep zapadající do vačky.....	52
Obr. 32)	Šroubové spojení.....	53

<b>Obr. 33) Zakončení ramene výměníku .....</b>	<b>53</b>
<b>Obr. 34) Řetězový zásobník nástrojů.....</b>	<b>54</b>
<b>Obr. 35) Řez jednou osou řetězu zásobníku nástrojů .....</b>	<b>54</b>
<b>Obr. 36) Detail uložení nástroje v zásobníku .....</b>	<b>55</b>
<b>Obr. 37) První varianta umístění výměníku vůči vřeteníku.....</b>	<b>55</b>
<b>Obr. 38) Druhá varianta umístění výměníku vůči vřeteníku .....</b>	<b>56</b>
<b>Obr. 39) Otočný rám a jeho vnitřní mechanismy .....</b>	<b>57</b>

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

- 1) Výpočtový skript
- 2) 3D model manipulátoru [3], [4], [5], [6]
- 3) Výkres sestavy manipulátoru
- 4) Animace vyměňování