



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# ANIMACE SILOVĚ DEFORMAČNÍHO CHOVÁNÍ OJNICHNÍCH ŠROUBŮ

ANIMATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF ROD BOLTED JOINTS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Richard Farkaš

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

BRNO 2017



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Richard Farkaš**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

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 bakalářské práce:

### **Animace silově deformačního chování ojnicních šroubů**

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

Ojnice zajišťuje přenos sil mezi pístem a klikovým hřídelem motoru. Ojnicní šrouby slouží k připevnění víka ojnice. Ojnice i ojnicní šrouby jsou namáhány proměnným dynamickým zatížením. Představa o silově deformační odezvě šroubů má zásadní význam pro jejich správný návrh.

Typ práce: vývojová - konstrukční

#### **Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem je vytvoření animací objasňujících silově deformační chování předepjatých ojnicních šroubů, jako např. vznik provozního diagramu.

Díličí cíle bakalářské práce:

- identifikace parametrů vhodných pro vytvoření animace,
- navržení jednoduchého výpočtového modelu,
- vytvoření animace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

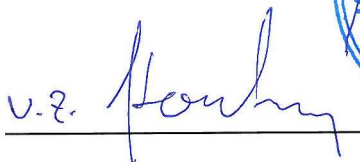
#### **Seznam literatury:**

DEJL, Zdeněk. Konstrukce strojů a zařízení I: spojovací části strojů : návrh, výpočet, konstrukce. Ostrava: Montanex, 2000, 225 s. ISBN 80-722-5018-3.

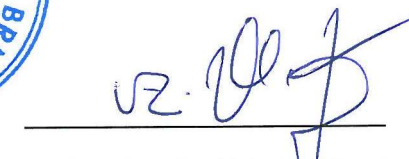
SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 25. 10. 2016

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu



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



---

## **ABSTRAKT**

Táto práca sa zaoberá vyšetrením silovo deformačného chovania predpätých ojníčnych skrutiek, kinematiky a silového pôsobenia v rámci kľukového mechanizmu štvordobého zážihového spaľovacieho motora. Daná problematika je objasnená pomocou animácií, ktoré sú určené pre vzdelávacie účely.

## **KEÚČOVÉ SLOVÁ**

Ojničné skrutky, animácia, deformácia, kľukový mechanizmus, dynamika, kinematika, štvordobý zážihový motor

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the investigation of the force-deformation behavior of prestressed crankshaft bolts, kinematics and dynamics within the crank mechanism of the four-stroke spark-ignition engine. This issue is illustrated by animations intended for educational purposes.

## **KEY WORDS**

Crankshaft bolts, animation, deformation, crank mechanism, dynamics, kinematics, four-stroke spark-ignition engine



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

FARKAŠ, R. *Animace silově deformačního chování ojnicních šroubů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 51 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D..



---

## **POĎAKOVANIE**

Na tomto mieste by som chcel poďakovať prof. Ing. Martinovi Hartlovi, Ph. D. za jeho ochotu konzultovať problémy, za jeho odborný nadhľad a dobré pripomienky počas tvorenia bakalárskej práce.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Čestne prehlasujem, že túto bakalársku prácu na tému Animace silově deformačního chování ojnicních šroubů som vypracoval sám pod odborným dohľadom prof. Ing. Martina Hartla, Ph.D. a všetky odborné zdroje som uviedol v zozname literatúry.

V Brne dňa 18.5.2017

.....  
Richard Farkaš



---

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>14</b>
2.1	Štvordobý zážihový motor	14
2.1.1	Princíp činnosti štvordobého zážihového spaľovacieho motora	15
2.1.2	Pracovný cyklus štvordobého motora	15
2.1.3	Pracovný diagram zážihového motora	17
2.2	Kľukový mechanizmus	18
2.2.1	Dynamika kľukového mechanizmu	18
2.2.2	Výpočet primárnych síl	18
2.2.3	Výpočet primárnych síl	20
2.2.4	Výpočet dráhy, rýchlosti a zrýchlenia piestu	21
2.2.5	Výpočet sekundárnych síl	24
2.2.6	Zotrvačné sily rotačných hmôt	25
2.2.7	Zotrvačné sily posuvných hmôt	25
2.2.8	Stanovenie zotrvačnosti náhradou ojnice dvomi bodmi	26
2.2.9	Výpočet síl na kľuke	27
2.3	Ojnica	28
2.3.1	Veko ojnice	29
2.3.2	Ojničné skrutky	30
2.3.3	Predpäté skrutkové spoje	31
2.3.4	Tuhosť spojovaných súčastí	31
2.3.5	Tuhosť spojovacích súčastí	33
2.3.6	Závislosť sily predpätia od uťahovacieho momentu	35
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>METÓDY</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>41</b>
5.1	Kinematika kľukového mechanizmu	41
5.2	Silové pôsobenie v kľukovom mechanizme	42
5.3	Konštrukcia montážneho diagramu a zaťaženia striedavou silou	43
<b>6</b>	<b>DISKUSIA</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVER</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>47</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b>	<b>48</b>
<b>10</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV A GRAFOV</b>	<b>50</b>
<b>11</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK</b>	<b>51</b>



## 1 ÚVOD

Zážihový motor, zostrojený podľa príkladu Nikolasa Augusta Otta, ktorý v roku 1878 na svetovej výstave v Paríži prvýkrát predstavil štvordobý plynový kompresný motor s cudzím zapaľovaním, prevádza energiu obsiahnutú v palive na energiu pohybovú. [2]

Prvýkrát sa však v sériovej výrobe objavili až začiatkom dvadsiateho storočia, keď na trh vstúpila firma Ford so svojimi motorovými vozidlami. V dnešnej dobe je to jeden z najpoužívanejších motorov v motorových vozidlách.

Pohybová energia sa prostredníctvom kľukového mechanizmu prenáša na kľukový hriadeľ, kde sa premení na krútiaci moment, ktorý je potrebný pre funkciu automobilov, alebo aj iných strojov. Táto premena však vytvára určité silové pôsobenia, ktoré zaťažujú jednotlivé členy kľukového mechanizmu. Medzi tieto členy patria aj ojnicné skrutky, ktoré majú za úlohu zaistiť polohu ojnicného veka ku zvyšku ojnice. Takéto prevedenie je v praxi najbežnejšie, umožňuje jednoduchú demontáž stroja. Tieto skrutky sú zaťažované, ako konštantnými silami od predpätia, tak aj premenlivou silou vyplývajúcou z chodu spaľovacieho motora. Pre správny návrh ojnicných skrutiek je dôležité správne porozumieť zaťažovacím silám, ktoré na ne pôsobia. Vďaka premenlivému charakteru týchto síl to však môže byť neintuitívne. Knižná literatúra poskytuje len text, ktorý je doplnený statickými obrázkami. V dnešnej dobe však knižnú literatúru môžeme doplniť o názorné animácie, ktoré čitateľovi pomôžu pochopiť podstatu problému, pomocou špeciálnych grafických prvkov. Navyše je animačné prevedenie vizuálne atraktívnejšie ako statické obrázky v bežnej literatúre.

Na základe toho sa v tejto bakalárskej práci budem venovať teoretickému spracovaniu silovo deformačného chovania predpäťých ojnicných skrutiek a jeho následnému spracovaniu do animácií. Tieto animácie budú slúžiť na doplnenie výuky pre študentov fakulty strojného inžinierstva na VUT.

## 2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

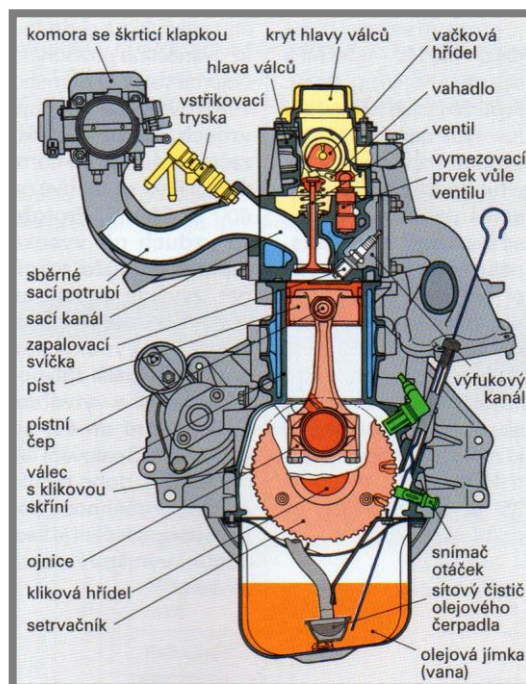
V tejto kapitole sú popísané teoretické znalosti potrebné pre analýzu veličín a ich závislostí, ktoré vystupujú v animáciách. Týka sa to teórie o štvordobých zážihových motoroch, kľukovom mechanizme a predpätých skrutkových spojoch. Všetky vzťahy sú odvodené z literatúry [1], [4], [5], [6] a [8].

### 2.1 Štvordobý zážihový motor

Štvordobý zážihový motor je spaľovací motor, ktorý spaľovaním paliva mení chemickú energiu na energiu tepelnú a tú následne mení tlakom na piest na energiu mechanickú. [3]

Štvordobý zážihový motor sa skladá z týchto hlavných častí:

- skriňa motora – obsahuje hlavu valcov, valce, olejovú vaňu, veko a kľukovú skriňu
- kľukový mechanizmus – skladá sa z piestu, ojnice a kľukového hriadeľa,
- rozvodový mechanizmus – tvoria ho ventily, ventilové pružiny, ventilové váhadlá, vačkový hriadeľ, rozvodová reťaz a rozvodové kolesá,
- zariadenia pre prípravu zmesi – tvorí sacie potrubie a karburátor, alebo vstrekovacie zariadenie,
- pomocné zariadenia – ako zapalovanie, chladenie, mazanie a výfuková sústava. [2]



Obr. 2-1 Konštrukcia zážihového motora [3]

Pre potreby tejto bakalárskej práce sa budem zaoberať hlavne kľukovým mechanizmom spaľovacieho motora. Aby bolo možné analyzovať priebeh silového pôsobenia na ojniciu je nutné poznať jeho pracovný cyklus.

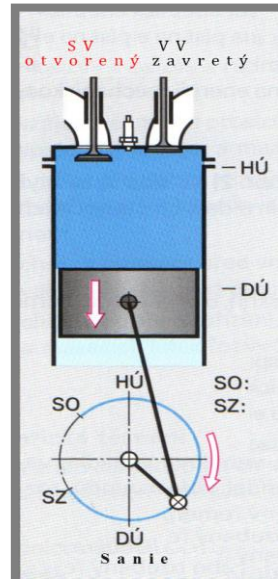
### 2.1.1 Princíp činnosti štvordobého zážihového spaľovacieho motora

Pri zážihovom motore je zmes paliva so vzduchom vytváraná karburátorom, alebo vstrekovacou sústavou mimo spaľovacieho priestoru. Tu je behom pohybu piesta smerom do dolnej úvrate stlačená. Zmes je zapálená pomocou zapaľovacej sviečky a časovo riadeného zapaľovania s cudzou energiou. Dôjde ku vznieteniu zmesi a uvoľnená energia, daná výhrevnosťou zmesi, zvýši tlak vo valci a pôsobením výslednej sily dôjde k pohybu piesta. Pomocou kľukového mechanizmu sa mení priamočiary pohyb piesta na pohyb rotačný. Po každom dohorení zmesi sú spálené plyny následne vytlačené z valca a je nasatá čerstvá zmes paliva a vzduchu. Táto výmena obsahu valca sa nazýva pracovný cyklus motora a pri štvordobých motoroch prebieha behom dvoch zdvihov. To znamená, že pre jeden pracovný cyklus sú potrebné dve otáčky kľukového hriadeľa, teda otočenie kľuky o  $720^\circ$ . [2]

### 2.1.2 Pracovný cyklus štvordobého motora

Pracovný cyklus štvordobého zážihového spaľovacieho motora pozostáva zo štyroch fáz – sanie, kompresia, expanzia a výfuk. [2]

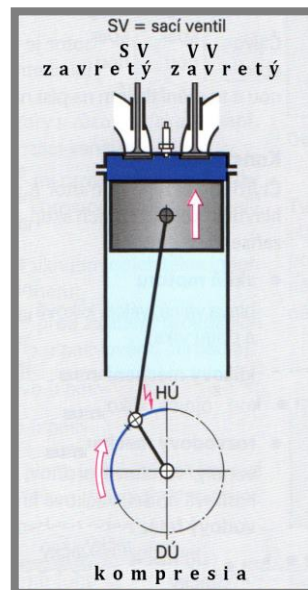
- Sanie - Pri pohybe piesta nadol vzniká v dôsledku zväčšenia priestoru vo valci rozdiel tlakov  $-0,01$  MPa až  $-0,03$  MPa oproti vonkajšiemu tlaku. Keďže je tlak mimo motora vyšší ako tlak vo valci, nasáva sa vzduch do sacieho systému. Zápalná zmes paliva a vzduchu sa tvorí buď v sacom kanáli, alebo priamo vo valci vstrekom paliva a vzduchu. Sací ventil sa otvára už aj  $45^\circ$  pred hornou úvratou a zatvára sa len  $35^\circ$  až  $90^\circ$  uhla natočenia kľuky za dolnou úvratou.



Obr. 2-2 Sanie [3]

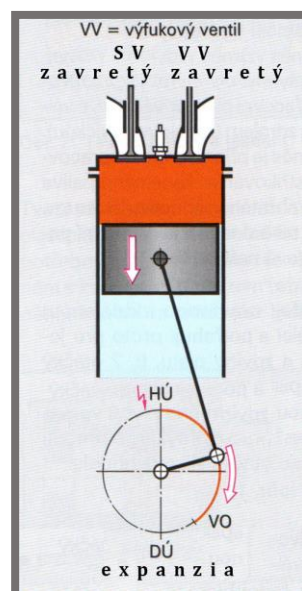
- Kompresia - Pri pohybe piesta nahor sa zmes paliva a vzduchu stláča na jednu sedminu až dvanástinu pôvodného objemu valca. U priameho vstrekovania sa stláča vzduch, okamih vstreku začína krátko pred hornou úvratou. Keďže sa vzduch pri vysokej teplote nemôže rozpínať, zvyšuje sa tak tlak na konci kompresie až na  $1,8$  MPa. Vysoký tlak podporuje ďalšiu premenu paliva na plyn a vytváranie homogénnej zmesi so vzduchom. Spaľovanie tým pádom

môže dobre, rýchlo a úplne prebehnúť. Počas doby kompresie je sací aj výfukový ventil uzavretý. [3]



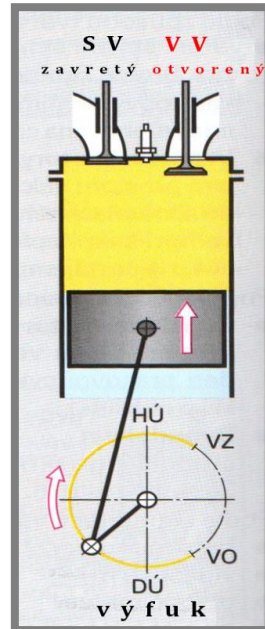
Obr. 2-3 Kompresia [3]

- Expanzia - Spaľovanie je aktivované elektrickým výbojom, preskočením zážihovej iskry medzi elektródami zapalovacej sviečky. Potom, ako elektrická iskra na zapalovacej sviečke zapálila stlačenú zmes paliva so vzduchom, stúpa teplota horením zmesi. Tlak vo valci prudko rastie a tlačí na piest. Ten cez ojnicu odovzdá krútiaci moment motora na kľukový hriadeľ. Výkon sa zvyšuje so zvyšujúcimi sa otáčkami a zvyšujúcim sa krútiacim momentom. [2]



Obr. 2-4 Expanzia [3]

- Výfuk - Pohybujúci sa piest vytlačá spálené plyny vysokou rýchlosťou cez otvorený výfukový ventil. [2] Je to posledná časť cyklu po ktorej sa cyklus následne opakuje.

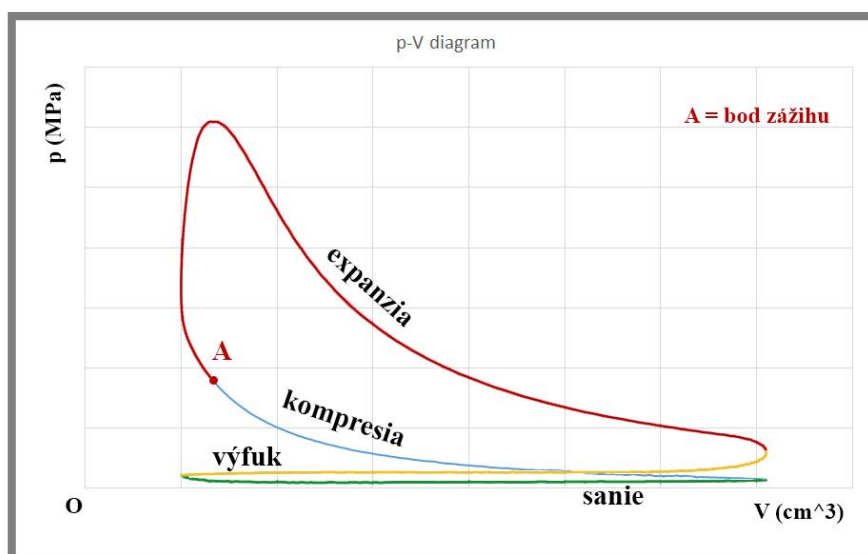


Obr. 2-5 Výfuk [3]

### 2.1.3 Pracovný diagram zážihového motora

2.1.3

Pracovný cyklus zážihového štvordobého motora je možné znázorniť v závislosti tlaku vo valci na okamžitom objeme (p-V diagram). Vzťahy medzi tlakom, objemom a teplotou plynov sú dané stavovými zmenami podľa Boyle-Mariottovho a Gay-Lussacovho zákona. [3] Priebeh cyklu je znázornený na obr. 2-6.



Obr. 2-6 p-V diagram

## 2.2 Kľukový mechanizmus

Kľukový mechanizmus je dôležitým ústrojenstvom všetkých piestových strojov. [6] Zabezpečuje premenu priamočiareho pohybu na pohyb rotačný. Skladá sa z piestu, ojnice a kľukového hriadeľa. [9]

### 2.2.1 Dynamika kľukového mechanizmu

Premena tepelnej energie paliva na mechanickú prácu sa deje prostredníctvom účinku vznikajúcich síl, vyvolaných tlakom plynu v spaľovacom priestore. Tieto sily uvádzajú do pohybu predovšetkým kľukový mechanizmus a tým udeľujú zotrvačnosť hmotám jeho súčastí, ktorá sa taktiež prejavuje silovými účinkami. Preto sa v motore vyskytujú dva druhy síl, ktoré je nutné navzájom rozlišovať. A to:

- sily akčné, alebo primárne – dané tlakom plynov,
- sily reakčné, alebo teda sily sekundárne – dané zotrvačnými účinkami pohybujúcej sa hmoty. [4]

### 2.2.2 Výpočet primárnych síl

Medzi akčné sily patrí vnútorná sila od tlaku média na piest. Je definovaná vzťahom

$$F_i = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot p, \quad (2-1)$$

kde  $F_i$  je tlaková sila pôsobiaca na piest,  $D$  je priemer piestu a  $p$  je okamžitý tlak pôsobiaci vo vnútri valca. [6]

Sila  $F_i$  pôsobí ako na hlavu valca, tak aj na piest a tým taktiež na piestny čap. V tomto čape sa rozkladá na zložku  $S$  pôsobiacu v smere osi ojnice a na zložku  $N$ , ktorá pôsobí v smere kolmom na stenu valca. Sila  $S$  sa ďalej ojnnicou prenáša do kľukového čapu, kde pôsobí na rameno kľuky. Do stredu otáčania kľuky ju môžeme preniesť tým, že si tu doplníme pomyselné sily  $S'$  a  $S''$ , ktoré majú rovnaký smer, ale navzájom opačný zmysel. Tým pádom nemajú žiaden účinok, pretože sa navzájom vyrušia. Vzniká teda dvojica síl  $S$  a  $S'$ , ktoré na ramene  $r'$  vytvárajú krútiaci moment daný vzťahom

$$M_k = S \cdot r', \quad (2-2)$$

kde  $r'$  je rameno pôsobenia medzi danými silami a je možné ho vyjadriť v závislosti na uhloch  $\alpha$  a  $\beta$

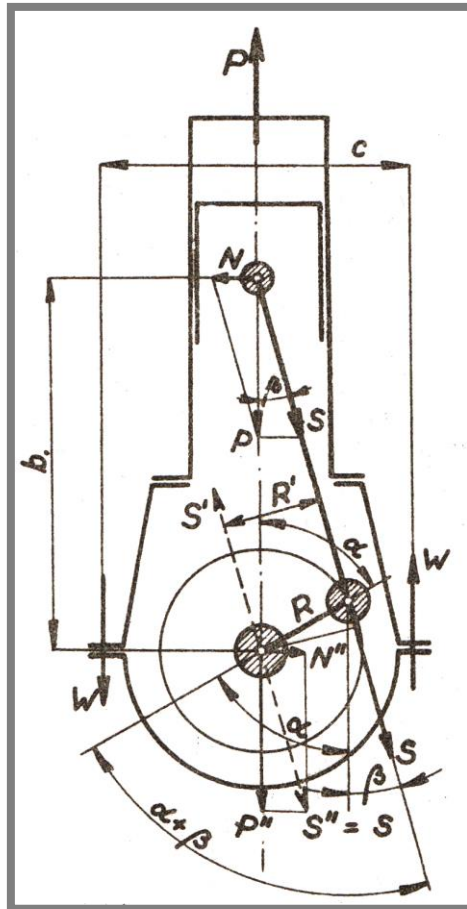
$$r' = r \cdot \sin(\alpha + \beta) \cdot [4] \quad (2-3)$$

Silu  $S$  pôsobiacu v ojnici môžeme vyjadriť vzťahom

$$S = \frac{F_i}{\cos\beta}, \quad (2-4)$$

teraz môžeme vyjadriť krútiaci moment ako

$$M_k = F_i \cdot r \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad [4] \quad (2-5)$$



Obr. 2-7 Rozloženie akčných síl [4]

Ďalej v mechanizme vystupuje klopný moment, pričom je možné dokázať, že sa rovná krútiacemu momentu, má však opačný zmysel otáčania: [4]

$$M_{kl} = N \cdot b, \quad (2-6)$$

pričom  $M_{kl}$  je klopný moment,  $b$  je vzdialenosť piestneho čapu od stredu otáčania kľukového hriadeľa daná vzťahom

$$b = r \cdot \cos \alpha + l \cdot \cos \beta \quad (2-7)$$

a  $N$  je zložka sily  $F_i$  pôsobiaca kolmo na stenu valca a vieme ju vyjadriť pomocou vzťahu

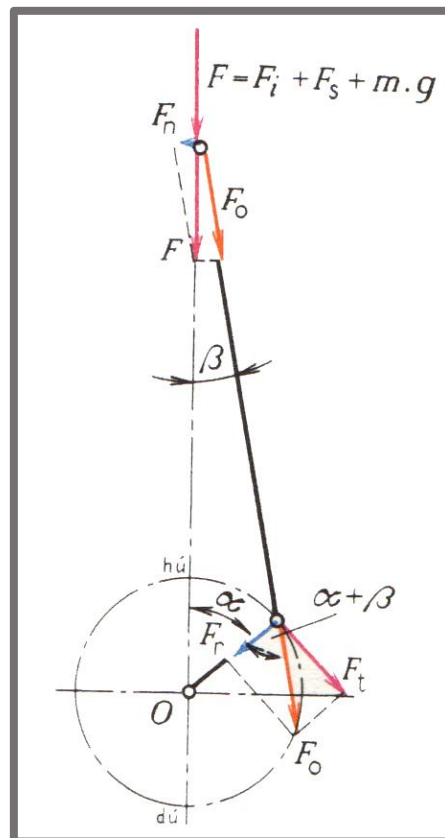
$$N = F_i + \tan \beta. \quad (2-8)$$

### 2.2.3 Výpočet primárnych síl

Aby bolo možné určiť výslednú silu na piest je však potrebné poznať zotrvačnú silu posuvných hmôt. Výsledná sila na piest sa potom vypočíta z rovnice

$$F = F_i + F_s + m_p \cdot g , \quad (2-9)$$

kde  $F$  je výsledná sila pôsobiaca na piest,  $F_s$  je zotrvačná sila posuvných hmôt a člen  $m_p \cdot g$  reprezentuje tiažovú silu pôsobiacu na piestnu skupinu. Táto tiažová sila sa uvažuje len pri stojatých strojoch a pre zjednodušenie výpočtov budeme uvažovať, že kľukový mechanizmus je uložený vodorovne a toto silové pôsobenie zanedbáme.[6]



Obr. 2-8 Výsledná sila na piest [6]

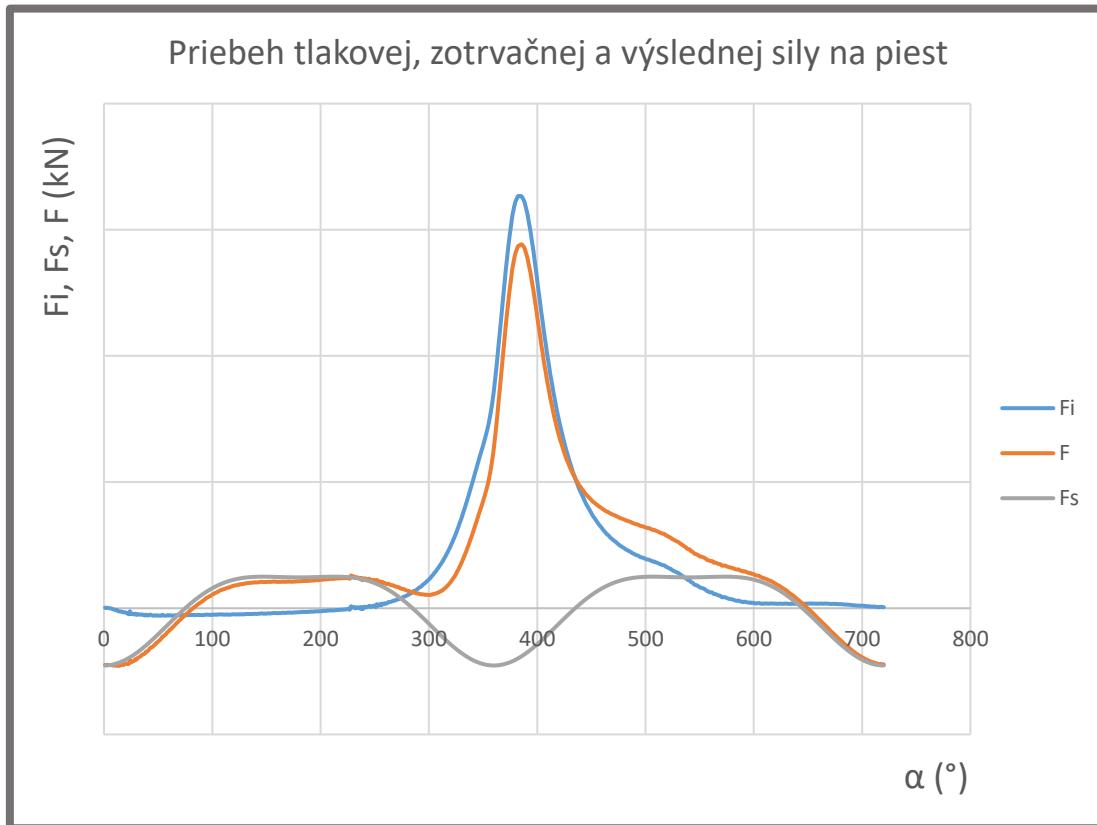
Predpokladom zistenia zotrvačných síl jednotlivých súčastí kľukového mechanizmu je znalosť ich dráhy, rýchlosti a zrýchlenia. Stanovením týchto veličín sa zaoberá kinematika, ktorá vyšetruje pohyb súčastí bez ohľadu na vznikajúce sily. [4]

Kinematika vychádza z určitých predpokladov, ktoré sú potrebné pre jednoduchšie riešenie daného problému. Prvým predpokladom je rovnomerný pohyb kľukového hriadeľa, čiže jeho uhlová rýchlosť

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \text{konštante} . \quad (2-10)$$

Tým sa zanedbávajú zmeny tejto rýchlosti, ktoré sú spôsobené nedokonalou funkciou zotrvačníka, premenlivým pohybom stroja v priestore a podobne.

Druhým predpokladom je absolútna tuhosť kľukového mechanizmu, ktorého súčasti sú spojené bez akejkoľvek vôle. [4]



Obr. 2-9 Priebeh výslednej sily na piest

### 2.2.4 Výpočet dráhy, rýchlosti a zrýchlenia piestu

Dráha, rýchlosť aj zrýchlenie sa v závislosti na čase menia a preto ich môžeme vyjadriť ako určité funkcie času ( $s = f_1(t)$ ,  $v = f_2(t)$ ,  $a = f_3(t)$ ). Prírastok času je rovnomerný a za predpokladu, že aj pohyb kľukového hriadeľa je rovnomerný, tak uhol jeho natočenia je úmerný času ( $\alpha \sim t$ ). Preto je taktiež možné vyjadriť dráhu, zrýchlenie a rýchlosť ako funkcie natočenia a teda: [4]

$$s = F_1(\alpha), \quad (2-11)$$

$$v = F_2(\alpha), \quad (2-12)$$

$$a = F_3(\alpha). \quad (2-13)$$

Takýto prístup je vhodnejší, lebo je matematicky jednoduchší. Pre určenie polohy piesta vychádzame zo vzťahu

$$s = l + r - (l \cdot \cos \beta + r \cdot \cos \alpha), \quad (2-14)$$

pričom  $l$  je dĺžka ojnice,  $r$  je polomer kľukového hriadeľa,  $\beta$  je uhol ojnice a  $\alpha$  je uhol natočenia kľuky. Pre určenie dráhy je potrebné určiť závislosť uhla ojnice na uhle natočenia kľuky. [4]

Je praktické určiť pomer polomeru kľukového hriadeľa a dĺžky ojnice. Tento pomer označujeme  $\lambda$  a udáva koľkokrát je u bežných motorov dĺžka ojnice väčšia, ako polomer kľuky. [4] Vypočíta sa zo vzťahu

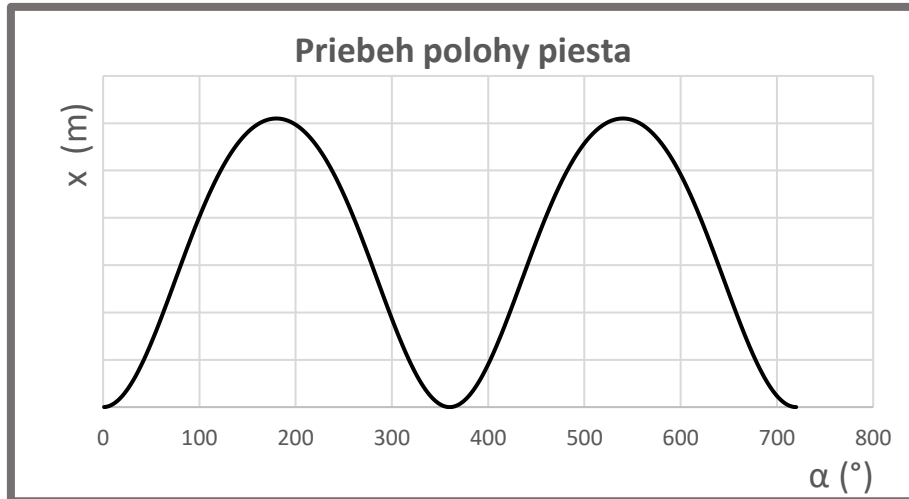
$$\lambda = \frac{r}{l}. \quad (2-15)$$

Z geometrie kľukového mechanizmu vieme potom vyjadriť uhol  $\beta$  v závislosti na pomere  $\lambda$  a natočení kľuky  $\alpha$ , [8]

$$\beta = \arcsin(\lambda \cdot \sin \alpha). \quad (2-16)$$

Po dosadení a úprave dostaneme vzťah, ktorý je príliš zložitý na derivovanie pre získanie rýchlosti a zrýchlenia. Preto sa nahradzuje výrazom približným, ktorý je pre praktické potreby úplne postačujúci. Výsledný zjednodušený vzťah pre dráhu piesta je [4]

$$s = r \cdot [(1 - \cos \alpha) + \frac{1}{2} \lambda \cdot \sin^2 \alpha]. \quad (2-17)$$

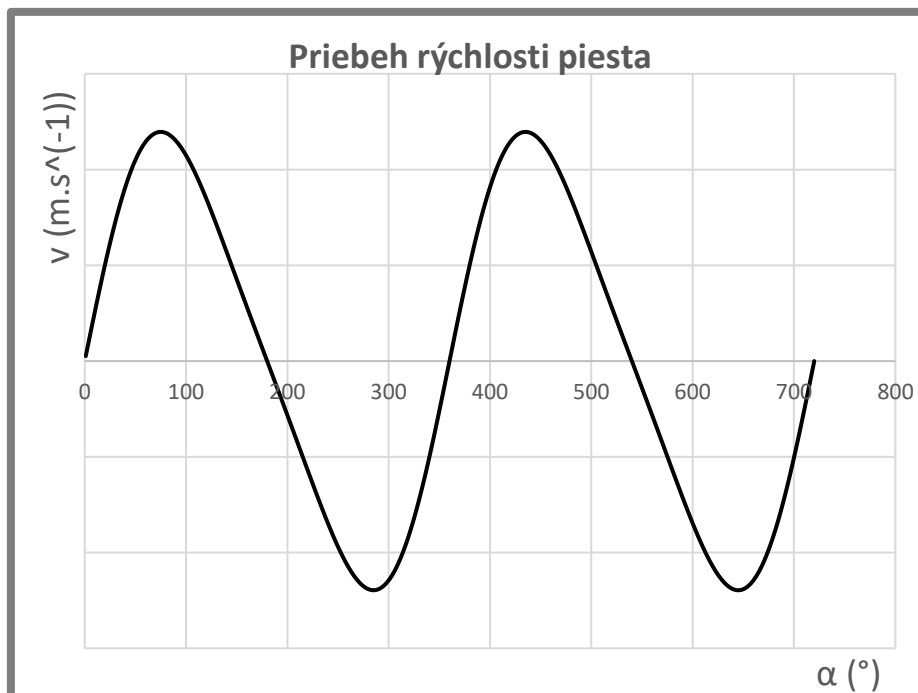


Obr. 2-10 Dráha piestu

Rýchlosť piesta v ľubovoľnom bode je možné potom získať deriváciou dráhy podľa času, ale vzhľadom k tomu, že pre zjednodušenie úlohy vyjadrujeme rýchlosť ako funkciu natočenia kľuky je nutné derivovať podľa  $\alpha$ : [4]

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \omega \cdot \frac{ds}{d\alpha} = r \cdot \omega (\sin \alpha + \frac{1}{2} \lambda \cdot \sin 2\alpha) , \quad (2-18)$$

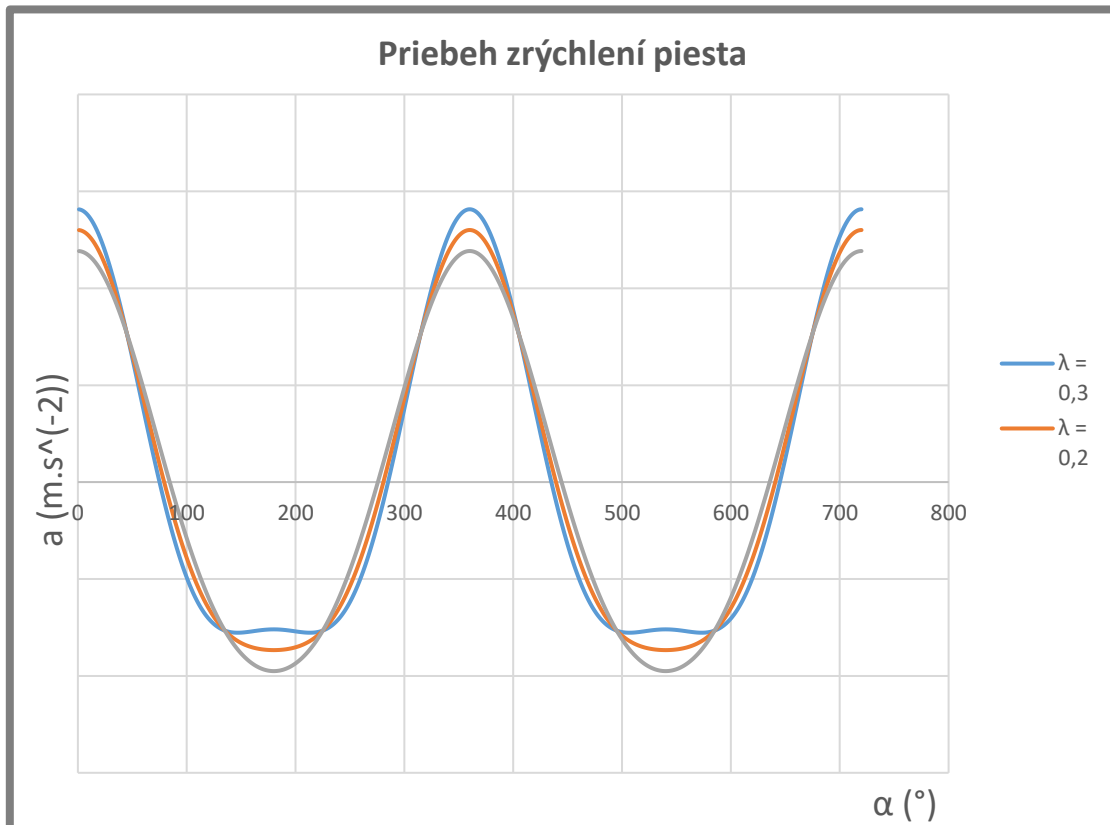
kde  $\omega$  je uhlová rýchlosť otáčania kľukového hriadeľa.



Obr. 2-11 Rýchlosť piestu

Zrýchlenie piesta je deriváciou jeho rýchlosti podľa času. Vzhľadom k tomu, že pre zjednodušenie znova vyjadrujeme zrýchlenie ako funkciu uhla natočenia kľuky, musíme derivovať podľa uhla natočenia kľuky  $\alpha$ : [4]

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \omega \cdot \frac{dv}{d\alpha} = r \cdot \omega^2 (\cos \alpha + \lambda \cdot \sin 2\alpha) \quad (2-19)$$



Obr. 2-12 zrýchlenia piestu

Na obr.2-12 sú znázornené zrýchlenia piestov v závislosti od uhla natočenia kľuky, pričom ich mechanizmy sa líšia hodnotou pomeru  $\lambda$ .

V praxi sa bežne používajú hodnoty  $\lambda$  v rozmedzí od 0,286 do 0,2. [6] Z grafu vidíme, že ak použijeme mechanizmus s pomerom  $\lambda$  vyšším ako 0,286, začína dochádzať k nerovnomernosti priebehu zrýchlenia piesta. Od tohto zrýchlenia závisia zotrvačné účinky, ktoré je jednoduchšie vyvažovať pri rovnomernom chode. Čím je však hodnota  $\lambda$  nižšia, tým je kolísanie hodnôt zrýchlenia vyššie, čo má dopad na zaťažovanie mechanizmu.

### 2.2.5 Výpočet sekundárnych síl

Reakčné sily sú prejavom odporu hmoty proti zmene ich stavu, v ktorom sa práve nachádzajú. Tento stav je charakterizovaný buď kľudom, alebo okamžitým pohybom hmoty.

Pretože zotrvačné sily sú vyvolané odporom hmoty proti zmene jej pohybu, pôsobia vždy proti zmyslu sily, ktorá túto silu zavádza.

Podľa druhu a pohybu jednotlivých hmôt kľukového mechanizmu rozoznávame v motore: [4]

- zotrvačné sily rotačných hmôt,
- zotrvačné sily posuvných hmôt,
- zotrvačné sily ojnice.

Pre zjednodušenie dynamického riešenia je nutné preložiť niektoré z týchto síl z ich skutočných pôsobísk v ťažiskách jednotlivých hmôt do zvolených miest, ktoré sú pri výpočte vhodnejšie. Tento proces sa nazýva redukcia síl a hmôt. Redukciu vždy prevádzame tak, aby náhradný hmotný systém mal rovnaké dynamické účinky ako systém pôvodný a tým sa mu rovnal. [4]

### 2.2.6 Zotrvačné sily rotačných hmôt

2.2.6

K rotačným hmotám ojnice patrí kľukový hriadeľ, veľká ojnicná hlava a časť drieku ojnice. Redukujeme ich spravidla do stredu kľukového čapu na polomer kľuky  $r$ . [4] Túto hmotnosť je možné vypočítať zo vzťahu

$$m_C = \sum \frac{m_i \cdot r_i}{r}, \quad (2-20)$$

pričom  $m_C$  je hmota rotujúcich častí kľukového mechanizmu,  $m_r$  je hmotnosť zalomenej časti kľuky redukovaná na polomer kľuky  $r$ ,  $m_i$  sú hmotnosti jednotlivých častí zalomenia kľuky,  $r_i$  sú polomery ťažísk jednotlivých zalomení a  $m_{or}$  je hmotnosť rotujúcich častí ojnice. Následne môžeme teda pomocou uhlovej rýchlosti kľuky  $\omega$  vypočítať zotrvačnú silu rotačných hmôt  $F_C$ , danú vzťahom

$$F_C = m_C \cdot r \cdot \omega^2. \quad [6] \quad (2-21)$$

### 2.2.7 Zotrvačné sily posuvných hmôt

2.2.7

Posuvné hmoty, ku ktorým patrí piest s príslušenstvom, malá ojnicná hlava a časť drieku ojnice, vyvolávajú zotrvačné sily  $F_s$  posuvných hmôt. Majú priamočiary pohyb v ose valca, alebo v smere, ktorý je s touto osou rovnobežný. Tým, že toto ťažisko leží stále v smere priamočiareho pohybu, nie je potrebné redukovať posuvné hmoty, pretože ich účinok bude rovnaký kamkoľvek ich v smere tohto pohybu presunieme. [4] Vypočítame ich zo vzťahu

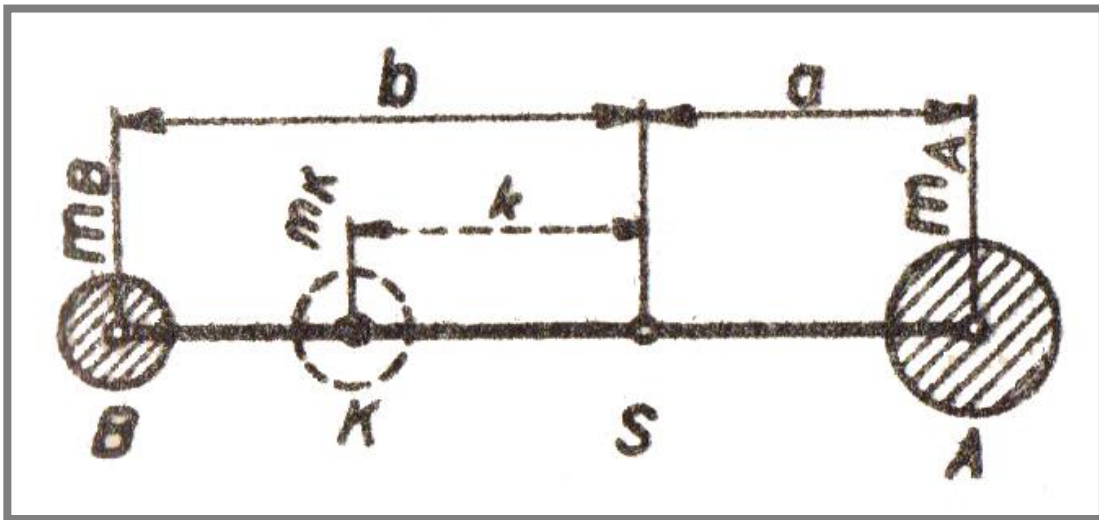
$$m_s = m_p + m_t + m_k + m_B, \quad (2-22)$$

kde  $m_s$  je hmotnosť posuvných hmôt,  $m_p$  je hmotnosť piestu s príslušenstvom,  $m_t$  je hmotnosť piestnej tyče,  $m_k$  je hmotnosť križiaka, ale moderné motory vo vozidlách používajú skrátenej kľukový mechanizmus, ktorý križiak neobsahuje, a  $m_B$  je hmotnosť posúvajúcej sa časti ojnice. [4] Po zistení hmotnosti posuvných hmôt môžeme pomocou zrýchlenia piesta  $a$  počítať zotrvačnú silu posuvných hmôt  $F_s$ :

$$F_s = m_s \cdot a. \quad (2-23)$$

### 2.2.8 Stanovenie zotrvačnosti náhradou ojnice dvomi bodmi

Ojnica koná všeobecný pohyb, ktorý sa dá rozložiť na pohyb priamočiary a rotačný. Aby sa zjednodušilo vyšetrowanie zotrvačných síl telies konajúcich všeobecný pohyb, prevádza sa vyšetrowaná sústava do náhradnej sústavy. Pri vyšetrowaní zotrvačných síl v kľukovom mechanizme sú dôležité hlavne zotrvačné sily pôsobiace na kľuku a na piest. Aby sme zistili vplyv ojnice na výslednú zotrvačnú silu, nahrádzame ju náhodnými hodnotami, umiestnenými v mieste piestneho čapu a v mieste kľukovej hlavy. [5]



Obr. 2-13 Náhrada ojnice dvomi bodmi [5]

Riešenie náhradného systému plynie z podmienok rovnocennosti oboch systémov. Náhradou dvomi bodmi dostaneme tri rovnice o dvoch neznámych: [5]

$$m_A + m_k = m , \quad (2-24)$$

$$m_A \cdot a = m_k \cdot k , \quad (2-25)$$

$$m_A \cdot a^2 + m_k \cdot k^2 = J_S = m \cdot i^2 , \quad (2-26)$$

kde  $J_S$  je moment zotrvačnosti k osi prechádzajúcej ťažiskom ojnice a  $i$  je polomer zotrvačnosti. Ostatné členy vystupujúce vo vzťahu sú objasnené na obrázku. [5]

Po úpravách a dosadení do vzorcov pre dielčie hmoty náhradného systému dostaneme ich konečné vyjadrenie [5]

$$m_A = m \cdot \frac{i^2}{a^2 + i^2} , \quad (2-27)$$

$$m_B = m \cdot \frac{a^2}{a^2 + i^2} . \quad (2-28)$$

Pri kľukovom mechanizme je vyžadované, aby hmoty konajúce čisto rotačný pohyb boli umiestnené v bode A a hmoty konajúce čisto posuvný pohyb v bode B.

Tým sú predpísané vzdialenosti  $a$  a  $b$  hmôt od ťažiska a podmienky pre splnenie prvých dvoch rovníc. Tretia rovnica nemôže byť splnená. [5] Po dosadení hodnôt z prvých dvoch rovníc dostaneme vzťah

$$m_A \cdot a^2 + m_B \cdot b^2 = J_S' \neq J_S, \quad (2-29)$$

pričom

$$J_S' = m \cdot \frac{b}{a+b} \cdot a^2 + m \cdot \frac{a}{a+b} \cdot b^2 = m \cdot a \cdot b. \quad (2-30)$$

Ak je

$$J_S = m \cdot i^2, \quad (2-31)$$

tak potom vzniká rozdiel momentov zotrvačnosti

$$\Delta J_S = J_S' - J_S = m \cdot a \cdot b - m \cdot a \cdot i^2 = m \cdot (a \cdot b - i^2). \quad (2-32)$$

Kompenzačnú hmotu ojnice  $\Delta m$  vieme vypočítať zo vzťahu [5]

$$\Delta m = m \cdot \frac{a \cdot b - i^2}{a^2 + b^2}. \quad (2-33)$$

Účinok tejto kompenzačnej hmoty vyrovnáva rozdiel momentu zotrvačnosti skutočnej ojnice a náhradnej sústavy pri zvolených dvoch bodoch. Jej veľkosť sa pohybuje v rozmedzí 2% až 10% celkovej hmoty ojnice. [5] Nie je možné ho zamieňať s dielčou hmotnosťou v ťažisku ojnice. Pri dynamickom riešení kľukového mechanizmu je potrebné uvažovať kompenzačný moment  $\Delta M$  kývavého pohybu ojnice, ktorý vzniká v súvislosti s rozdielom zotrvačnosti pri redukcii ojnice do dvoch bodov. Kompenzačný moment je rovný opačnému momentu zrýchľujúcich síl:

$$\Delta M = \Delta J_S \cdot \varepsilon_o, \quad (2-34)$$

kde  $\varepsilon_o$  je uhlové zrýchlenie ojnice a je dané vzťahom

$$\varepsilon_o = -\lambda \cdot \omega^2 \cdot \frac{(1-\lambda^2) \cdot \sin \alpha}{\sqrt{(1-\lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha)^3}}, \quad [8] \quad (2-35)$$

Účinok tohto momentu sa prejaví na kľukovom hriadelí a okrem toho spôsobuje klopný moment na ráme stroja. [5]

### 2.2.9 Výpočet síl na kľuke

Po dosadení výslednej sily z rovnice (1-9) vieme dopočítať výslednú silu pôsobiacu v ojnici  $F_o$  a výslednú normálovú silu pôsobiacu na stenu valca  $F_n$ : [6]

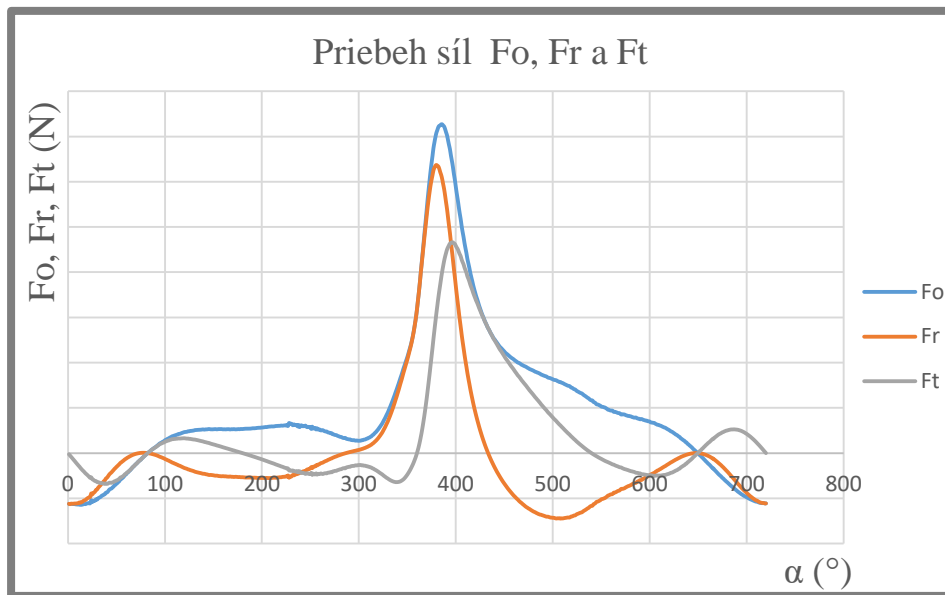
$$F_n = F \cdot \tan \beta, \quad (2-35)$$

$$F_o = \frac{F}{\cos \beta} . \quad (2-36)$$

Potom vieme dopočítať radiálnu silu  $F_r$  a tangenciálnu silu  $F_t$  na kľuke zo vzťahov:

$$F_r = F_o \cdot \cos(\alpha + \beta) , \quad (2-37)$$

$$F_t = F_r \cdot \sin(\alpha + \beta) . [6] \quad (2-38)$$



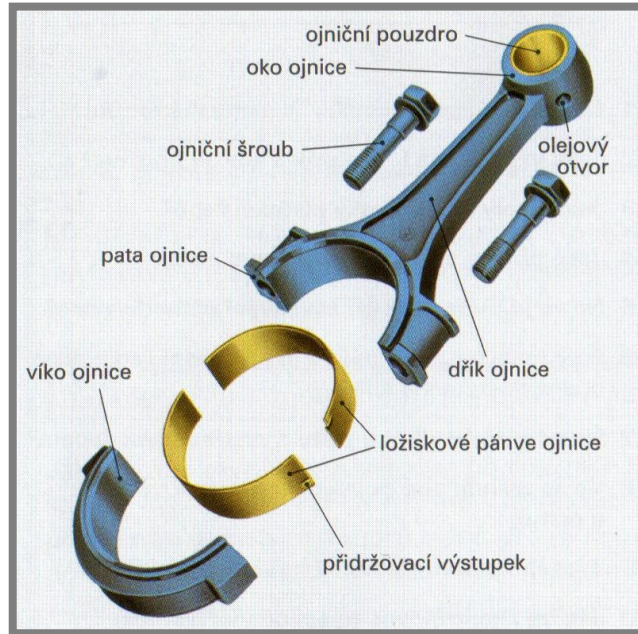
Obr. 2-14 Priebehy  $F_o$ ,  $F_r$  a  $F_t$

### 2.3 Ojnica

Ojnica je spojovacím článkom medzi piestom a kľukovým hriadeľom, na ktorý prenáša pôsobiace sily. Deje sa tak pri vzájomnom pohybe súčastí kľukového mechanizmu, ktorý mení priamočiary pohyb hriadeľa na pohyb rotačný, alebo naopak, pokiaľ je zdrojom pohybu tento hriadeľ. [4]

Ojnica je zaťažovaná tlakom plynov na piest a zotrvačnými silami pohybujúcej sa hmoty. Tlaky plynov majú pri nižších otáčkach prevažujúcu hodnotu a v priebehu pracovného cyklu náhle menia svoju veľkosť. Tým vyvolávajú nepriaznivé namáhanie zodpovedajúce rázu. [4]

Ojnice sa najčastejšie vyrábajú zápustkovým kovaním, alebo lisovaním z ocele. Pri veľkých, pomalobežných strojoch môžu byť z uhlíkových ocelí (11 423, 11 500, 11 600), pri menších, rýchlobežných strojoch z ušľachtilých uhlíkových a legovaných ocelí (12 040, 12 050, 13 240, 14 150, 14 240, 15 142, 15 260, 16 250, 16 341, 16 440), vždy zušľachtených. [6]

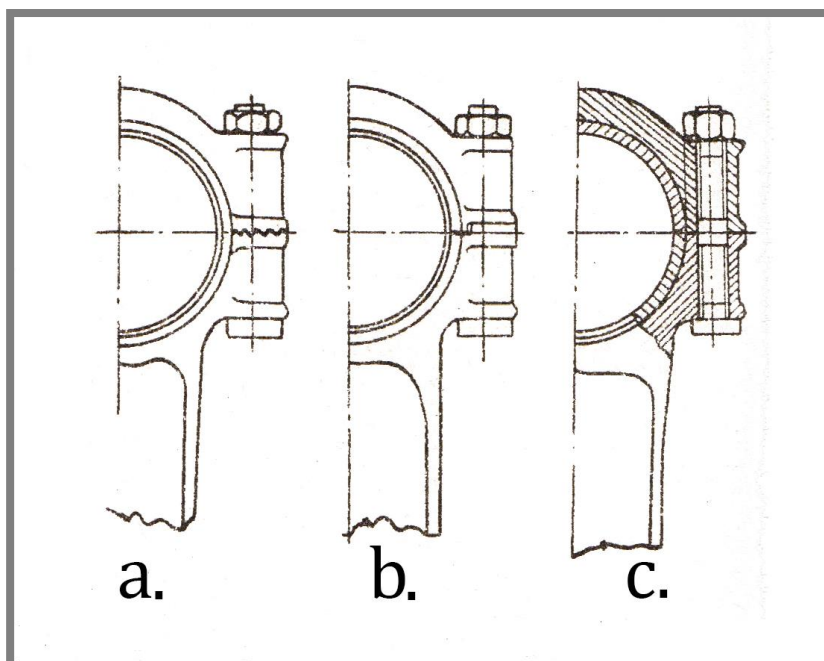


Obr. 2-15 Zloženie ojnice [3]

### 2.3.1 Veko ojnice

2.3.1

Veko ojnice je namáhané ohybom, a preto sa vystužuje rebrami. Jeho zaistenie sa bežne prevádza pomocou ojničných skrutiek, stupňovitým zámkom, alebo čelným ozubením.



Obr. 2-16 Možnosti zaistenia veka ojnice [4]

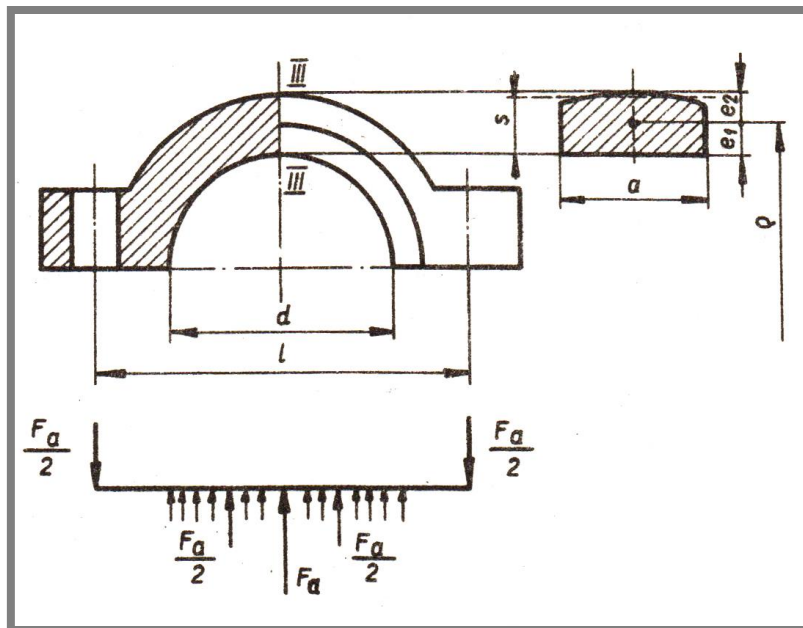
Možnosť a. je zaistenie čelným ozubením, b. je zaistenie stupňovitým zámkom a c. je zaistenie pomocou ojničných skrutiek.

Najvýhodnejšie je zaistenie pomocou ojničných skrutiek, pretože je výrobné najjednoduchšie. [4]

Veko ojničnej hlavy je namáhané zotrvačnou silou v hornej mŕtvej polohe. Ak je  $m$  hmota piestu vrátane príslušenstva a ojnice bez veka, potom maximálna sila pôsobiaca na veko ojnice je [5]

$$F_a = m \cdot a = m \cdot \omega^2 \cdot r(1 + \lambda) . \quad (2-39)$$

Pri výpočte sa považuje veko za nosník podoprený v mieste ojničných skrutiek a rovnomerne zaťažný po priemere otvoru. [5]



Obr. 2-17 Sila pôsobiaca na veko ojnice [5]

### 2.3.2 Ojničné skrutky

Ojničné skrutky slúžia k rozoberateľnému spojeniu hlavy s vekom. Pri štvordobých motoroch sú na počiatku scieho zdvihu namáhané hlavne ťahom zrýchľujúcimi silami, zatiaľ čo pri dvojdobých motoroch, kde výsledné sily zaťažujúce piest, vykazujú stále rovnaký smer, sú ojničné skrutky značne odľahčené. [4]

Okrem zotrvačných síl sú ojničné skrutky namáhané účinkom svojho dotiahnutia, ktoré musí dodať skrutkám náležité predpätie, aby pri maximálnej zotrvačnej sile nedošlo k odľahčeniu, alebo dokonca rozpojeniu styčných plôch veka a hlavy ojnice v ich dosadacej rovine. Toto predpätie je potrebné pripočítať k prevádzkovému namáhaniu skrutiek, ktoré sa počíta a kontroluje experimentálne. [4] Najčastejšie sa používajú priechnuté skrutky. Vyžadujú poistenie proti otáčaniu, ktoré sa prevádza zrezaním hlavy, aby sa mohla oprieť o vyfrézovanú plochu v ojnici. [4]

Maticy týchto skrutiek sú vyrobené z rovnakého materiálu a musia byť taktiež zaistené. Toto zaistenie zabezpečujú plechové, alebo pružné poistky, prídavné matice, drôt, alebo závlačky. [4]

Ojničné skrutky bývajú 2 až 4 a vyrábajú sa pružne poddajné z materiálu s vysokou pevnosťou (11 500, legované ocele 13 240, 15 140, 15 230, 16 430). Pričom dynamické namáhanie ojničného spoja vieme vypočítať pomocou vzťahu [6]

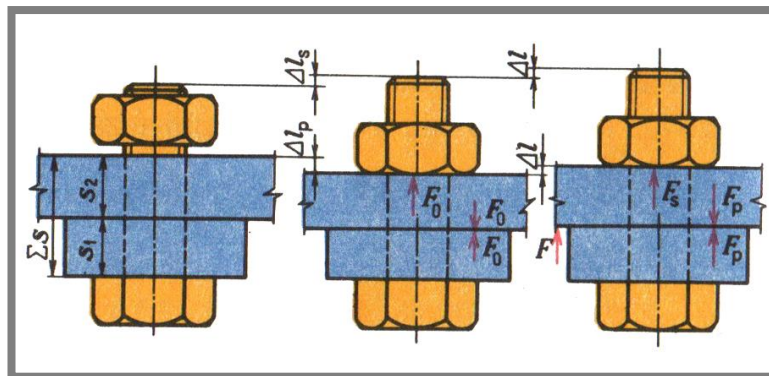
$$F = F_r + F_c = F_o \cdot \cos(\alpha + \beta) + (m_B - m_{ov}) \cdot r \cdot \omega^2 \quad (2-40)$$

kde  $F$  je zaťažujúca a  $m_{ov}$  je hmotnosť ojničného veľa.

### 2.3.3 Predpäté skrutkové spoje

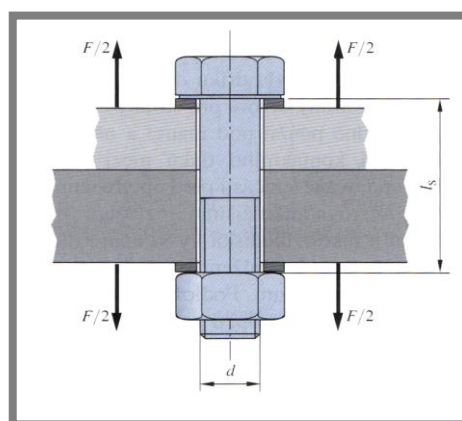
Ak utáhneme skrutky až na silu predpätia  $F_i$ , predĺžia sa pri tom o  $\Delta l_s$ , zatiaľ čo zovreté časti sa súčasne stlačia o  $\Delta l_p$ . Po montáži sú súčasti spojené dokopy a rovnako veľká sila predpätia vyvolávajúca ťah v skrutke vyvoláva tlak v spájaných súčastiach. Sila predpätia pôsobí v spoji po utiahnutí ešte pred pôsobením prevádzkového zaťaženia, teda sily  $F$ . [7]

2.3.3



Obr. 2-18 Predĺženie skrutky [7]

Na obr. 2-19 je skrutkový spoj zaťažený ťahom v smere osi skrutky. Je použitá podložka pod maticou a pod hlavou skrutky.  $l_s$  je zovretá dĺžka. [1]



Obr. 2-19 Skrutkový spoj zaťažený ťahom [1]

### 2.3.4 Tuhosť spojovaných súčastí

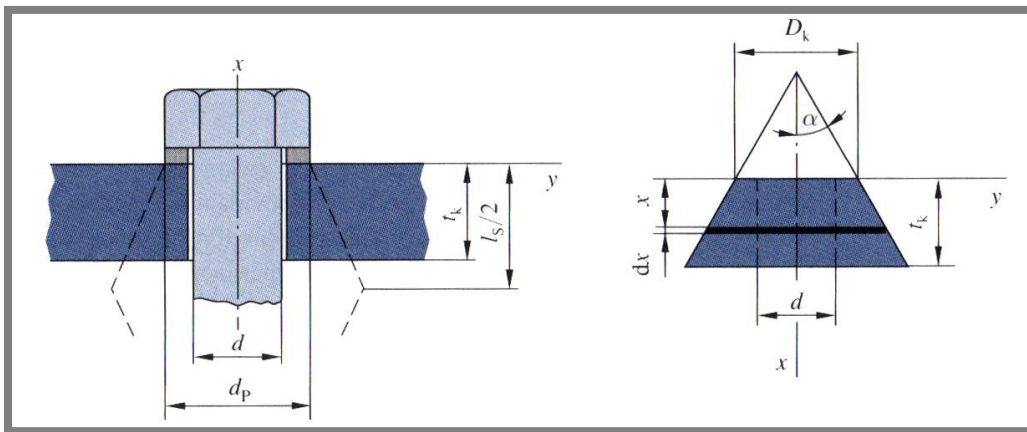
Pri výpočte síl pôsobiacich v predpätých skrutkových spojoch je potrebné poznať tuhosť spojovaných súčastí. Skrutkovým spojom je možné spojiť viacej ako dve

2.3.4

súčasti. Všetky tieto súčasti si vieme predstaviť ako tlačné pružiny v sérii a teda celková poddajnosť spojovaných súčastí je

$$\frac{1}{k_p} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_i}, \quad (2-41)$$

kde  $k_p$  je tuhosť spojovaných súčastí a  $i$  je ich počet. Samotnú tuhosť spojovaných súčastí počítame pomocou ich náhrady zrezanými kužeľmi s nepremennivými vrcholovými uhlami. Podstavy oboch kužeľov sú v polovici zovretej dĺžky. [1]



Obr. 2-20 zrezaný dvojkužeľ [1]

Na obr. 2-20 je kužeľ, kde uhol  $\alpha$  je rovný polovici vrcholového uhla kužeľa. Je vhodné uvažovať vrcholový uhol menší ako  $45^\circ$ , aby nedošlo k nadhodnoteniu spojovaných súčastí. Pre potreby tejto práce budeme uvažovať uhol  $\alpha = 33^\circ$ . Potom pre tento uhol dostaneme vzorec pre výpočet tuhosti spojovaných súčastí

$$k_i = \frac{(0,5774)\pi E d}{\ln \frac{(1,155t_k + D_k - d)(D_k + d)}{(1,155t_k + D_k + d)(D_k - d)}}, \quad (2-42)$$

pričom  $E$  je Youngov modul,  $d$  je priemer skrutky a  $D_k$  je priemer zovretej oblasti na spojovaných súčastiach. [1]

Rovnicu (2-42) musíme použiť zvlášť pre každý zrezaný kužeľ v spoji, ak však majú dve súčasti rovnaký Youngov modul a je možné ich nahradiť dvoma rovnakými zrezanými kužeľmi s podstavami otočenými k sebe, potom o nich pri výpočte môžeme uvažovať ako o dvoch v sérii radených pružinách s rovnakou tuhosťou. [1]

### 2.3.5 Tuhosť spojovacích súčastí

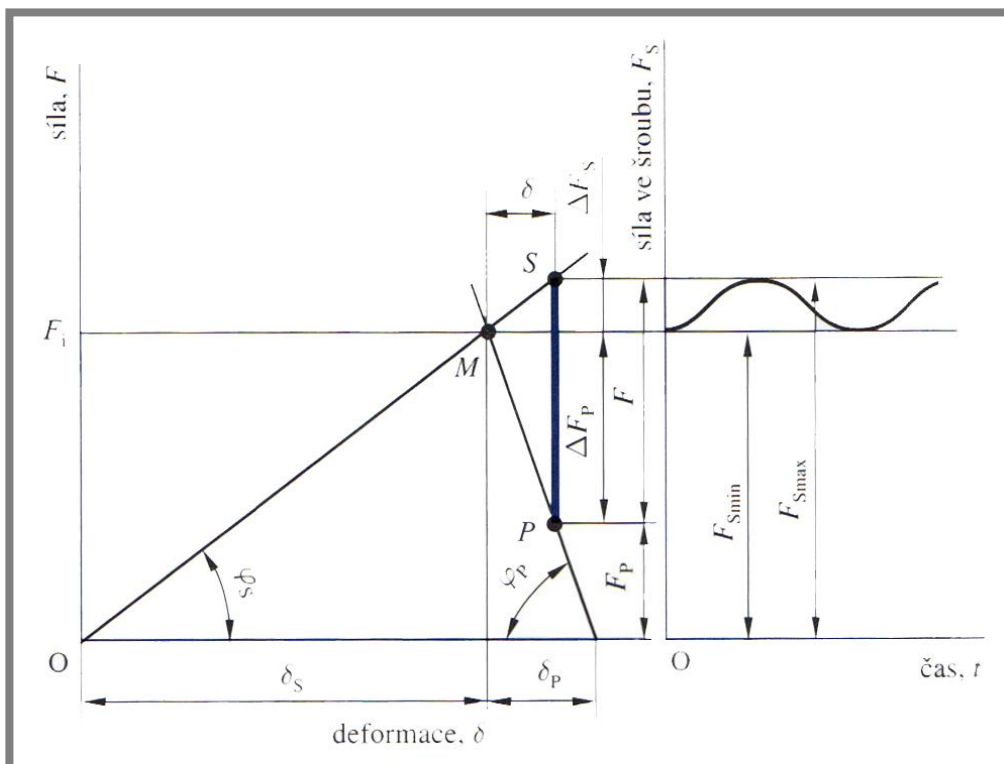
Taktiež je nutné poznať tuhosť spojovacích súčastí. Táto tuhosť je daná vzťahom

$$k_S = \frac{S_d A_S E}{S_d l_b + A_S l_g}, \quad (2-43)$$

kde  $E$  je Youngov modul spojovacích súčastí,  $l_g$  je dĺžka valcovej časti drieku bez závitov,  $l_b$  je dĺžka časti drieku so závitom v zovretí,  $A_S$  je výpočtový prierez skrutky a  $S_d$  je plocha valcovej časti drieku bez závitov: [1]

$$S_d = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2-44)$$

Uvažujeme sily v prevádzkovom stave v skrutkovom spoji pri ťahovom zaťažovaní v situácii, keď je predpätý skrutkový spoj zaťažovaný ťahom, prevádzkovou silou  $F$ , tak ako na obr. 2-19. Na obr.2-21 je montážny a pracovný diagram predpätého skrutkového spoja. Zaťažovacia dráha pod uhlom  $\varphi_S$  zodpovedá charakteristike skrutky a zaťažovacia dráha pod uhlom  $\varphi_P$  zodpovedá charakteristike spojovaných súčastí.  $k_S$  a  $k_P$  sú tangenty týchto uhlov. Predpokladajme, že pred pôsobením prevádzkového zaťaženia  $F$  bola pomocou uťahovania matice pri montáži vyvolaná sila predpätia  $F_i$ . Skrutka sa pri montáži predĺžila o  $\delta_S$  a spájané súčasti sa stlačili o  $\delta_P$ . [1]



Obr. 2-21 Montážny diagram predpätého spoja [1]

Zaťaženie predpätého skrutkového spoja prevádzkovou silou  $F$  spôsobuje ďalšie predĺženie skrutky, respektíve stlačenie spojovaných súčastí o určitú dĺžku  $\delta$ . Túto deformáciu vieme vyjadriť v závislosti na tuhostiach:

$$\delta = \frac{\Delta F_s}{k_s}, \quad (2-45)$$

alebo

$$\delta = \frac{\Delta F_p}{k_p}, \quad (2-46)$$

pričom  $\Delta F_s$  je časť prevádzkovej sily  $F$  prenášaná skrutkou a  $\Delta F_p$  je časť prevádzkovej sily  $F$  prenášaná spojovanými súčast'ami. Platí, že [1]

$$F = \Delta F_s + \Delta F_p, \quad (2-47)$$

preto môžeme zapísať tieto časti prevádzkovej sily ako

$$\Delta F_s = CF \quad (2-48)$$

a

$$\Delta F_p = (1 - C)F, \quad (2-49)$$

kde

$$C = \frac{k_s}{k_s + k_p} \quad (2-50)$$

sa nazýva tuhostná konštanta spoja. Výsledné zaťaženie skrutky v prevádzkovom stave je

$$F_s = F_i + \Delta F_s = F_i + CF \quad (2-51)$$

a výsledné zaťaženie spojovaných súčastí je

$$F_p = F_i - \Delta F_p = F_i - (1 - C)F. [1] \quad (2-52)$$

**2.3.6 Závislosť sily predpätia od ťahovacieho momentu**2.3.6

---

Sila, ktorou je skrutka predpäťá závisí na veľkosti momentu, ktorým je matica utiahnutá. Pre súčiniteľ trenia na stykovej ploche medzi podložkou a maticou, alebo hlavou skrutky  $f_0 = 0,15$ , čo je priemerná hodnota, dostaneme hodnotu súčiniteľa ťahovacieho momentu  $K \cong 0,20$  nezávisle na veľkosti použitých skrutiek, a to pre závit s hrubou aj jemnou roztečou. Rovnica pre ťahovací moment sa dá zapísať

$$M_U = KF_i d_s \cdot [1] \quad (2-53)$$

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

Pri návrhu ojničných skrutiek a aj ojnice samotnej je dôležité poznať priebeh ich zaťažovania v čase, aby sme vedeli určiť hodnoty extrémov zaťažovacích síl, prípadne deformácií, ktoré ich sprevádzajú. Táto problematika je v literatúre podrobne spracovaná, no obrázky a texty, ktoré objasňujú priebeh daných veličín nie sú dostatočne názorné. Pre veličiny, ktorých hodnoty sú závislé od času je vhodnejšie použiť ukážky v podobe animácií, ktoré problematiku objasnia v reálnom čase. Takto podané informácie sú pre čitateľov atraktívnejšie a jednoduchšie pre porozumenie, a preto sú vhodným doplnkom knižnej literatúry.

Cieľom tejto práce je vytvorenie animácií objasňujúcich silovo deformačné chovanie predpätých ojničných skrutiek, ktoré môžu byť použité ako študijný doplnok pri štúdiu danej problematiky. Zameranie jednotlivých animácií je popísané v nasledujúcich bodoch:

- kinematika kľukového mechanizmu – závislosť polohy, rýchlosti a zrýchlenia piesta od polohy piesta.
- silové pôsobenie v kľukovom mechanizme – závislosť tlakovej sily pôsobiacej na piest, zotrvačných síl a síl prenášaných ojnicou na ojničné skrutky od uhla natočenia kľukového hriadeľa
- konštrukcia montážneho diagramu a zaťaženia premenlivou silou – závislosť síl a deformácií od uhla natočenia kľuky

## 4 METÓDY

Všetky animácie boli vytvorené v programe MAXON Cinema 4D R18. Pomocné výpočty, grafy a dáta boli spracované v programe Microsoft Excel 2013. Technická



Obr. 4-1 Metódy

podpora k tvoreniu animácií bola čerpaná z internetových zdrojov [10] a [11]. Postup pri vytváraní animácií od začiatku až po výsledky je schematicky zakreslený na obr. 4-1.

Na začiatku je potrebné vytvoriť výpočtový model, ktorý spracuje všetky hodnoty potrebné pre zostrojenie grafov. Vhodné programy pre tento účel sú napríklad Microsoft Excel, MathWorks Matlab, alebo PTC Mathcad. Pre potreby tejto práce bol použitý program Microsoft Excel 2013, vďaka prehľadnosti výsledných dát, ktorú poskytuje a ich jednoduchému exportu. Program dáta spracuje a prehľadne usporiada do stĺpcov.

Spracovať dáta je možné viacerými spôsobmi, ako napríklad vyexportovaním celých grafov a ich následným vložením do pracovného priestoru programu Cinema 4D, alebo exportom dát z Excelu a vytvorením grafu už priamo v prostredí Cinemy 4D. V animáciách sú dáta spracované druhým spomenutým spôsobom. Vďaka tejto metóde získame väčšiu kontrolu nad priebehom animácie, jej vzhľadom a máme možnosť vytvoriť vizuálne atraktívny trojrozmerný graf. Táto metóda je však náročnejšia a zdĺhavejšia.

Po exporte dát do Cinemy je nutné vytvoriť pomocnú geometriu, vďaka ktorej môžeme vytvoriť grafy, rozvrhnúť animácie a tvary pohybujúcich sa objektov. S pomocnou geometriou na mieste môžeme vytvoriť hlavnú geometriu, ako napríklad,

skrátены kľukový mechanizmus, ojnicné skrutky, grafy a ostatné dôležité prvky animácie.

Keďže Cinema 4D je program, ktorý je primárne určený pre tvorbu trojrozmerných animácií, pri vytváraní 2D animácií je potrebné využiť vstavanú funkciu X-Presso, ktorá umožňuje medzi objektami vytvárať väzby, ktoré sú riadené zvolenou funkciou a tak uľahčuje pracovnú manipuláciu s objektmi v priestore. Pracovný priestor X-Pressa je zobrazený na obr. 4-4.

Materiály a osvetlenie sú kľúčové pri vytváraní každej animácie v Cineme 4D, keďže bez nich by po renderi nebolo na animácii nič vidieť. Preto musíme každému objektu priradiť príslušný materiál a osvetlenie umiestniť čo najďalej od plochy, na ktorej prebieha animácia, aby sme predišli tvoreniu tieňov pri vytváraní 2D animácií. Ďalším dôležitým prvkom v tomto kroku je umiestnenie kamery v priestore, aby dostatočne zachytila všetky potrebné prvky danej animácie.

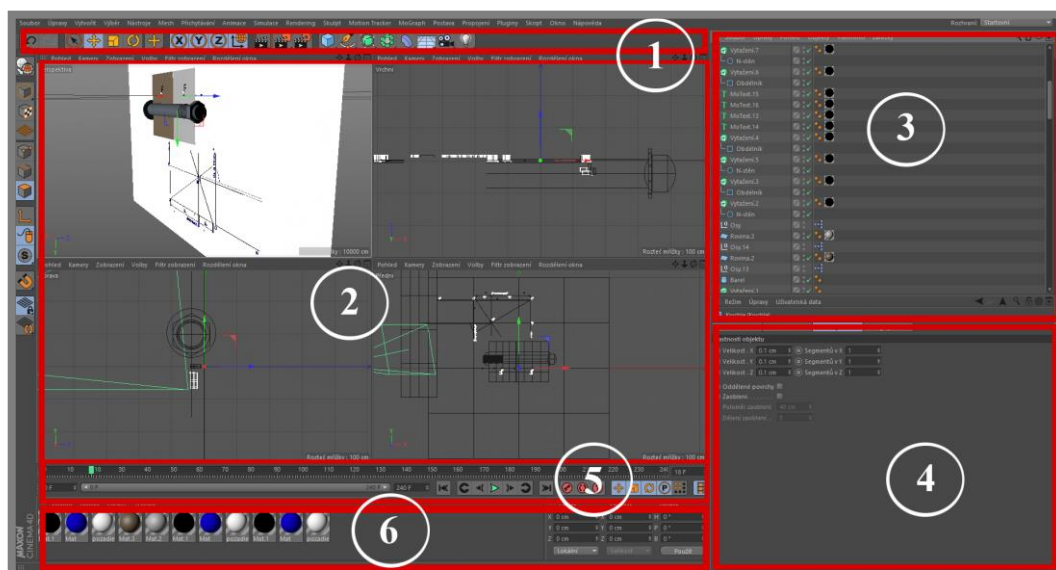
Ďalším krokom je vytváranie samotných animácií. Je viacej možností ako vytvárať animácie, ale najjednoduchším a najpoužívanejším spôsobom je využívanie kľúčových snímok, pričom v každom kľúčovom snímku zadefinujeme umiestnenie jednotlivých objektov a Cinema si už sama vytvorí animácie na snímkach medzi nimi. Najdĺhšou procesom je synchronizácia animácií. Keďže Cinema 4D je program na tvorenie trojrozmerných animácií, má vstavané funkcie pre tvorbu pohybu, ktorý vyzerá prirodzene. To však robí problém pri parametricky presných pohyboch, ktoré sú vyžadované od týchto edukačných animácií. Preto je nutné v časovej osi animácií upraviť takzvané F-krivky a zosynchronizovať tak animácie.

Po dokončení animácie je nutné nastaviť parametre rendera a následne ho spustiť. Trvanie rendera závisí od jeho nastavení, pričom doba renderu sa pohybovala v rozmedzí od pol do jednej hodiny. Na dĺžku tohto kroku má vplyv hlavne výkon zariadenia, na ktorom sa animácia renderuje.

V tab. 4-1 sú zobrazené nastavenia rendera.

Tab. 4-1 Nastavenia animácií

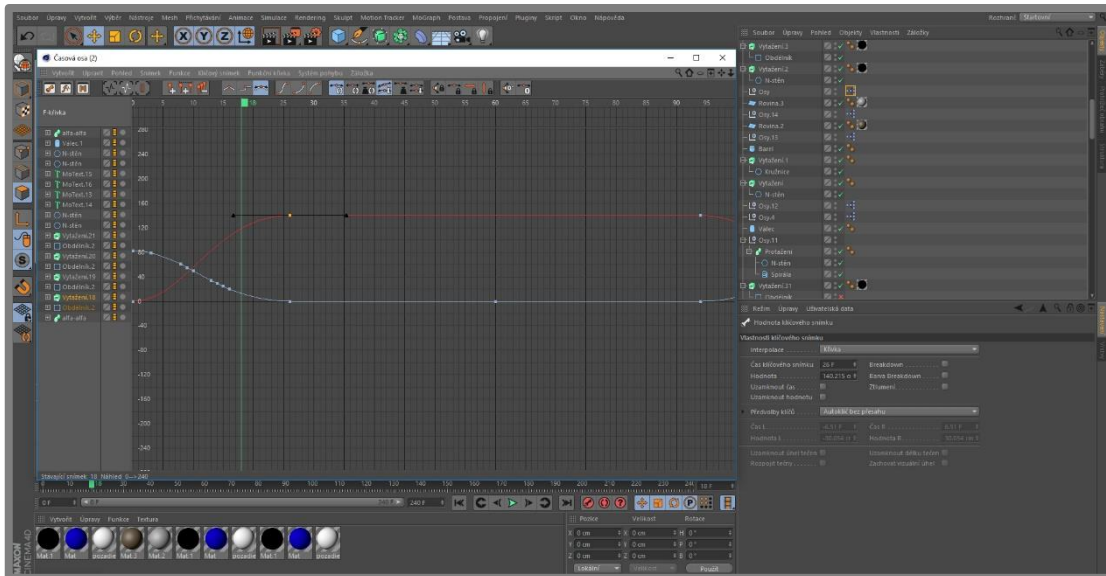
Rozlíšenie	1920x1080
Formát obrazu	16:9
Počet snímok za sekundu	30
Výstupný formát	AVI



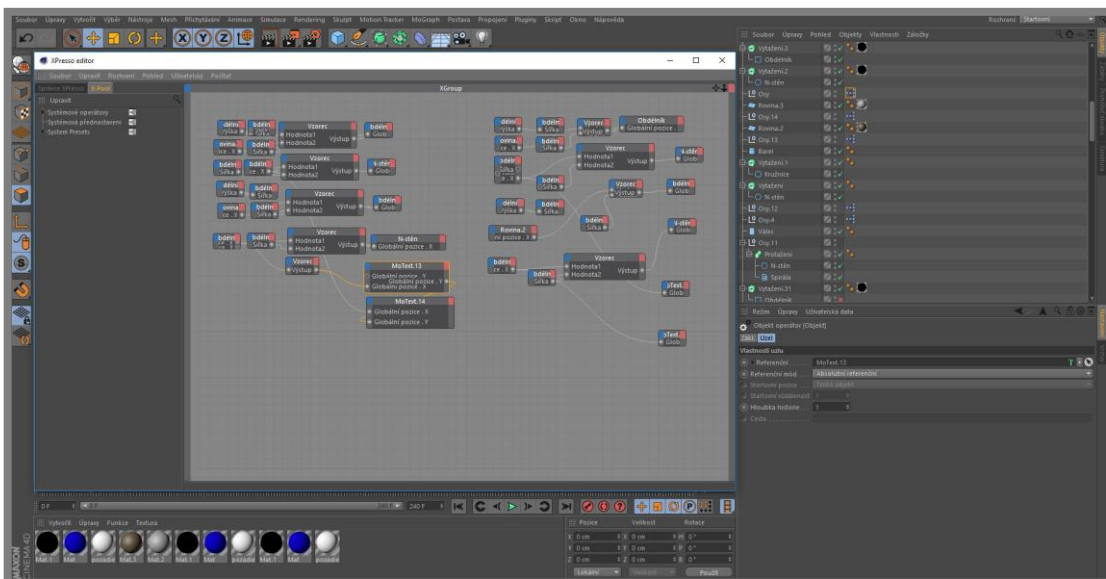
Obr. 4-2 Pracovný priestor Cinemy 4D

Na obr. 4-2 je zobrazené pracovné prostredie programu Cinema 4D. Prvá dôležitá oblasť je oblasť 1, oblasť s nástrojmi, v ktorej sa nachádza výber základných príkazov, objektov, splajnov a podobne. Oblasť 2 zobrazuje hlavný pohľad a tri vedľajšie pohľady animácie. V týchto pohľadoch je možné pracovať s objektami ťahmi myšou, čo nie je vhodné používať pre presné parametrické animácie. V oblasti 3 sa nachádza zoznam všetkých použitých objektov a ich materiálov. Je tam možné nastaviť viditeľnosť objektov, presúvať objekty do vrstiev a jednotlivé objekty zlučovať. Ďalšia dôležitá oblasť je oblasť 4, v ktorej sa nachádzajú parametre objektov, ako súradnice, veľkosť a podobne. Vlastnosti parametrov sú odlišné pre každý druh objektu. Oblasť 5 zobrazuje os všetkých snímiek, na ktorej sú vyznačené kľúčové snímky. Posledná dôležitá oblasť je oblasť 6, ktorá obsahuje zoznam použitých materiálov.

Na obr. 4-3 je zobrazené okno s časovou osou. Sú v ňom zobrazené F-krivky, ktoré znázorňujú rýchlosti priebehu animácií.



Obr. 4-3 F-krivky



Obr. 4-4 X-Presso

## 5 VÝSLEDKY

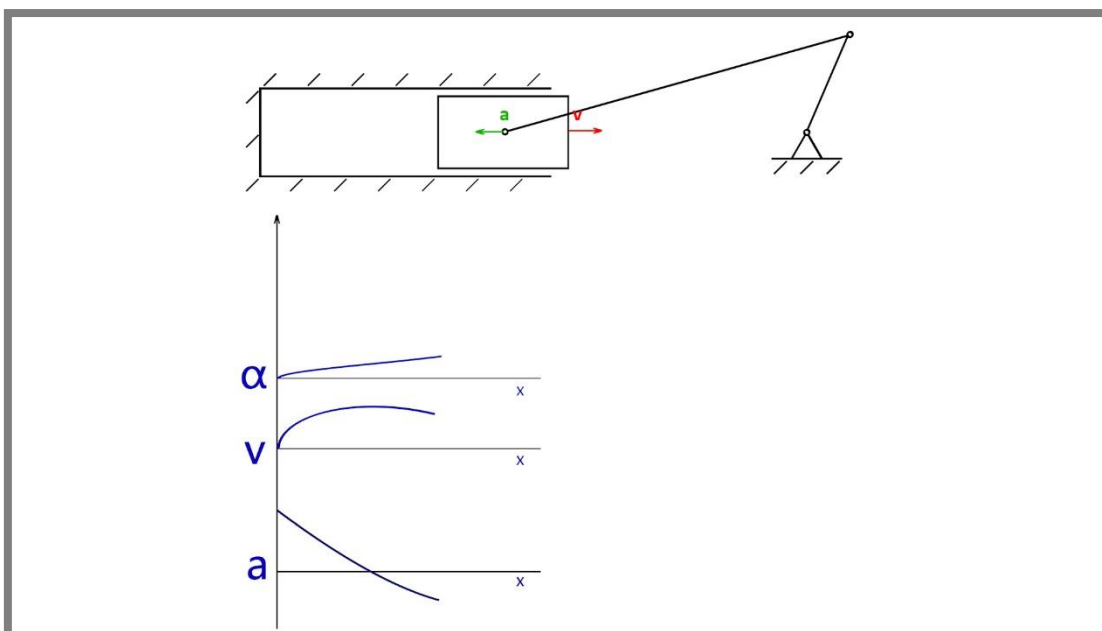
Animácie, ktoré sú uvedené v druhej kapitole boli vytvorené postupom opísaným v kapitole tretej. V tejto kapitole je stručne zapísaný obsah jednotlivých animácií.

### 5.1 Kinematika kľukového mechanizmu

V tejto animácii je zobrazený skrátenej kľukový mechanizmus, ktorého kľuka sa otočí o  $720^\circ$  a vykoná teda celý pracovný cyklus štvordobého spaľovacieho motora. Táto animácia sa zameriava hlavne na priebehy uhla natočenia kľuky, rýchlosti piesta a zrýchlenia piesta. Všetky tieto hodnoty sú potrebné pre dopočítanie síl pôsobiacich na spoj ojníčného veka.

Animácia sa začína polohou piesta v hornej úvrati ( $0^\circ$ ). V tejto pozícii je rýchlosť nulová, keďže piest práve mení smer na opačný. Následne má rastúci priebeh až do  $74^\circ$  natočenia kľuky, táto vlastnosť závisí od parametrov kľukového mechanizmu, konkrétne od  $r$  a  $\lambda$ . Po dosiahnutí svojho maxima rýchlosť piesta klesá, až kým v dolnej úvrati ( $180^\circ$ ) nedosiahne znova nulovej hodnoty. Rýchlosť piesta začína rásť, ale v opačnom zmysle, pričom jej priebeh sa zrkadlovo opakuje až do zastavenia piesta po dosiahnutí  $360^\circ$ . Priebeh do  $720^\circ$  je zhodný s priebehom do  $360^\circ$ . Toto správanie je možné vyvodit' z derivácie rovnice (2-17) podľa uhla  $\alpha$ . Rovnako vieme odhadnúť aj správanie zrýchlenia  $a$ , ktorého maximum je v hornej úvrati. Jeho minimum sa však nenachádza v dolnej úvrati, ale niekoľko stupňov pred, respektíve za ňou. Tento jav je spojený s hodnotou pomeru  $\lambda$ , ako je vidieť na obr. 2-12.

Animáciu dopĺňajú názorné vektory rýchlosti a zrýchlenia na kľukovom mechanizme.

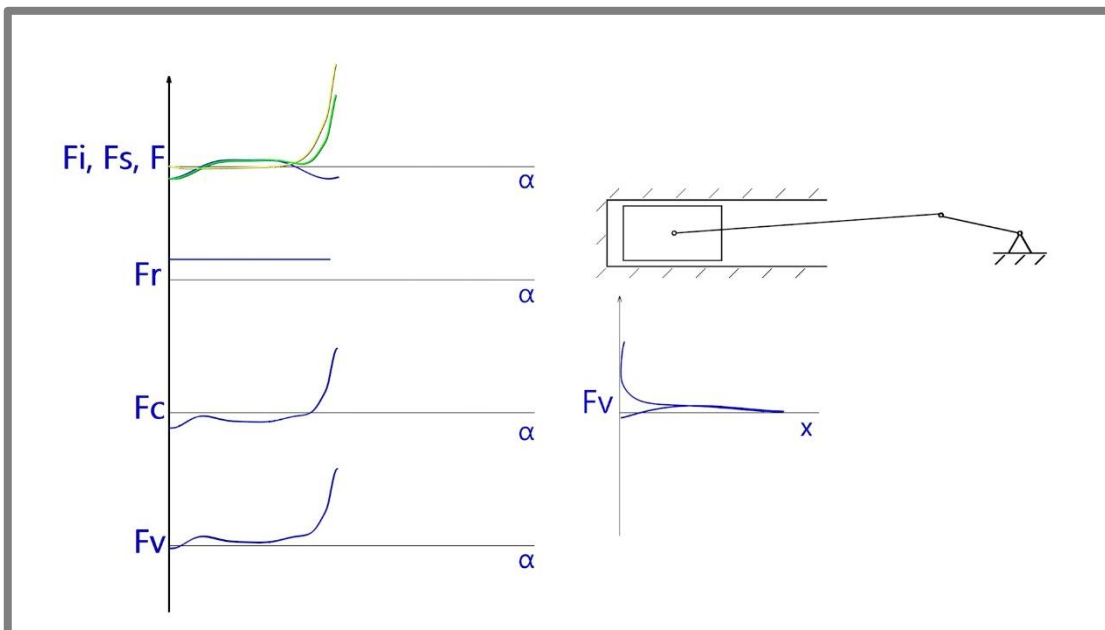


Obr. 5-1 Kinematika kľukového mechanizmu

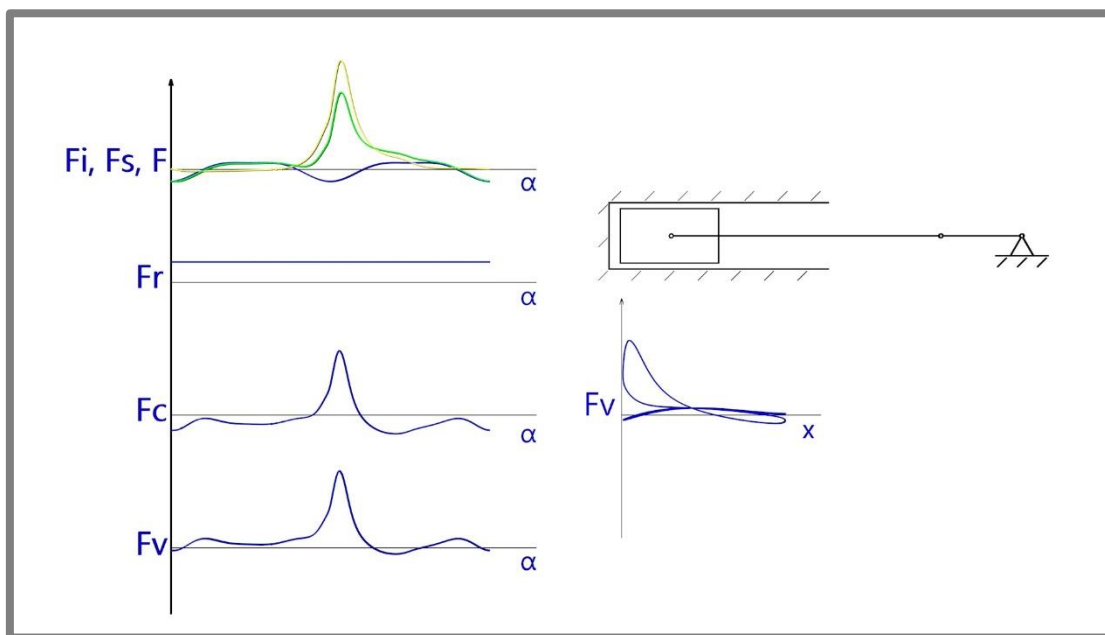
## 5.2 Silové pôsobenie v kľukovom mechanizme

Táto animácia vysvetľuje vzťah medzi silovými účinkami vznikajúcimi v kľukovom mechanizme a silou pôsobiacou na spoj ojníčného veka s ojnicou pomocou ojníčných skrutiek. V animácii je znázornený kľukový mechanizmus a sily ovplyvňujúce spoj v závislosti od uhla natočenia kľuky.

Veľkosť sily  $F_i$  závisí od pracovného cyklu motora a preto, že tento cyklus začína saním, čiže vo valci je podtlak, bude aj hodnota tejto sily z počiatku záporná. Až keď sa piest dostane do dolnej úvrate začne sila  $F_i$  prudko narastať, až kým neprebehne zážih a svojho maxima dosiahne len zopár stupňov za hornou úvratou. Následne nastáva prudký pokles jej veľkosti. Ďalšia sila zobrazená v animácii, je zotrvačná sila posuvných častí mechanizmu  $F_s$ . Táto sila je lineárne závislá od zrýchlenia piesta, ktorého priebeh bol vykreslený v prvej animácii. Keďže obe tieto sily pôsobia v rovnakej osi, tak na to aby sme získali výslednú silu na piest je nutné sčítať ich vektorovo. Na ojníčný spoj pôsobí však len radiálna zložka tejto sily,  $F_r$ , ktorá je vykreslená na druhom grafe. Jej priebeh je značne nepravidelný. Po sčítaní tejto sily so zotrvačnými silami rotačných hmôt dostávame výsledné silové pôsobenie na ojníčný spoj. Keďže zotrvačné sily rotačných hmôt sa v čase nemenia, jediné zmeny sú spôsobené nedokonalosťami zotrvačníka, je možné tieto sily sčítať. Po sčítaní má výsledná sila priebeh podobný sile miznúcej.



Obr. 5-2 Maximálna záťaž



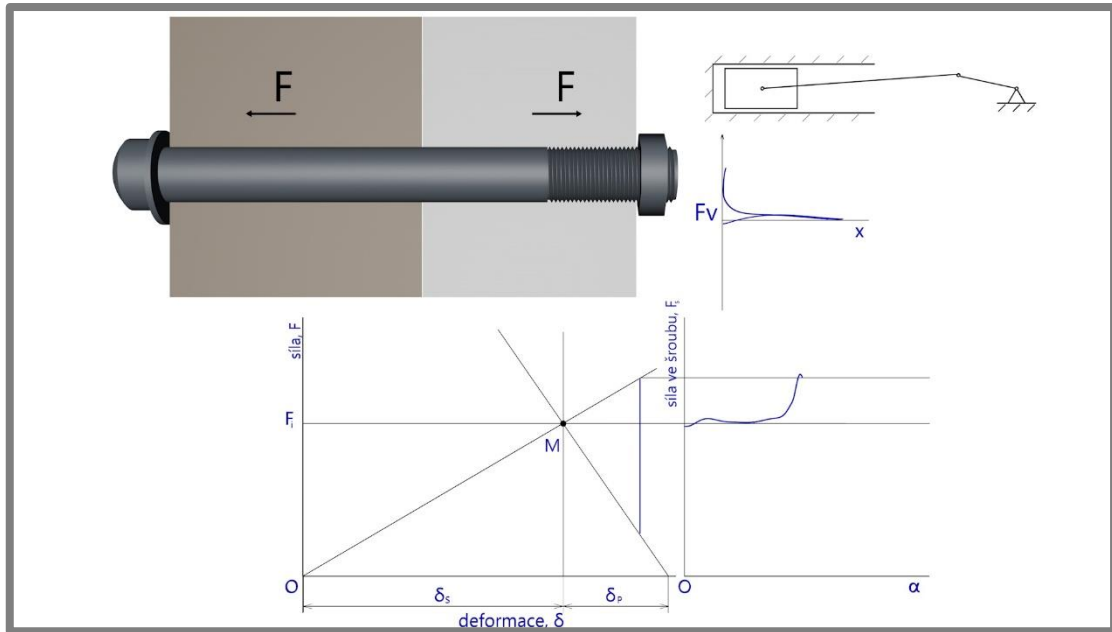
Obr. 5-3 Priebeh zaťažujúcich síl

### 5.3 Konštrukcia montážneho diagramu a zaťaženia striedavou silou

5.3

Táto animácia zachytáva súvislosť medzi silou pôsobiacou na ojníčné skrutky a deformáciou, ktorú v nich vyvoláva. Animácia vykresľuje nesúmerný cyklus, ktorý má črty miznúceho cyklu, nie však dokonale. Následkom toho sa skrutka cyklicky predlžuje a skracuje. Táto deformácia sa je zobrazená pomocou modelu skrutky a montážnym diagramom. Pre lepšiu názornosť a popritom je doplnená klukovým mechanizmom.

Vďaka tejto animácii je možné sledovať priebeh silovo deformačného správania ojníčných skrutiek v závislosti od časti cyklu motora. Z animácie je vidieť, že skrutky sú najviac namáhané v oblasti krátko za prvým návratom do hornej úvrate. V tomto momente totiž na piest pôsobí najvyšší tlak.



Obr. 5-4 Silovo deformačné chovanie spoja

## 6 DISKUSIA

Názorné videá sa v školstve využívali od čias vynájdenia televízie. Pomáhali študentom lepšie porozumieť a rýchlejšie sa učivo naučiť. Vďaka modernej technológii je stále jednoduchšie vytvárať animácie a to nám umožňuje vytvárať animácie tam, kde videá už nestačia. Používanie písanej literatúry k štúdiu môže byť pre študenta ťažké na pochopenie a nezáživné. Úlohou edukačných animácií je zaujať študenta a názorne mu objasniť daný princíp za relatívne krátky čas. Takto vytvorené animácie však nie sú náhradou výuky. Bez dodatočného výkladu môžu aj takéto animácie byť máťúce. A preto je najlepšie používať takéto animácie ako doplnok výuky.

V tejto bakalárskej práci som sa venoval objasneniu silovo deformačného chovania ojnicných skrutiek štvordobého zážihového motora. Prvá animácia znázorňuje kinematiku kľukového mechanizmu. Jej úlohou je ozrejmiť divákovi akú rýchlosť a zrýchlenie má piest v danej časti pracovného cyklu motora prostredníctvom grafov a názorného kľukového mechanizmu. Tieto hodnoty však nie sú úplne presné, pretože pri odvodzovaní vzťahu pre polohu piesta sa uvažovali len prvé tri členy nekonečného radu a ostatné sa zanedbávali. Kinematické predpoklady spomenuté v prvej kapitole taktiež vyžadujú ideálne podmienky, ktoré nie sú reálne dosiahnuteľné.

V druhej animácii sú znázornené silové pôsobenia, ktoré vplyvajú na spoj ojnice. Sily sú vypočítané na základe nameraného  $p-a$  diagramu. Úlohou tejto animácie je objasniť dynamické zaťažovanie spoja ojnice. Taktiež názorne ukazuje, ktoré zložky síl sa na ňom podieľajú. Výpočtom sme zistili, že výsledná sila zaťažujúca ojnicné skrutky je nepravidelný, takmer miznúci cyklus. V tejto časti sa pri výpočtoch zanedbával vplyv kompenzačného momentu a kompenzačnej hmotnosti, čo mohlo spôsobiť chybu do 5%. Ďalším výpočtovým nedostatkom je posúvanie zotrvačných síl ojnice do piestneho čapu, ktorý však nemá veľký vplyv na celkový výpočet.

Posledná animácia bola zameraná na demonštráciu deformačných účinkov na ojnicnú skrutku. Využíva k tomu montážny diagram predpätých skrutkových spojov, kľukového mechanizmu pre zlepšenie predstavy a neobsahuje zbytočné prvky, ktoré nie sú pre ozrejmienie problematiky potrebné.

Ako už bolo v tejto kapitole spomenuté, animácie určené pre edukačné účely sú výbornou pomôckou. Dokážu za krátky čas objasniť zložité princípy. Vytváraním ďalších podobných animácií umožníme študentom porozumieť zložitým mechanizmom. Mohlo by sa napríklad jednať o animáciu momentových priebehov viacvalcových motorov.

## **7 ZÁVER**

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvorenie animácií, ktoré objasňujú silovo deformačné chovanie predpätých ojnicných skrutiek. Dôraz bol kladený hlavne na prehľadnosť, názornosť a dôveryhodnosť dejov prebiehajúcich v mechanizme. Prvá kapitola obsahuje súbor teoretických znalostí potrebných pre vytvorenie animácií. Objasňuje dynamiku kľukového mechanizmu a správanie sa predpätých skrutiek zaťažených prevádzkovou silou. V druhej kapitole sú stanovené ciele jednotlivých animácií, prvky, ktoré obsahujú a ktoré situácie majú objasňovať. Nasledujúca kapitola objasňuje postup, akým boli dané animácie vytvorené. V kapitole výsledky sú jednotlivé animácie popísané. Je v nej popísaný ich priebeh a dôležité úseky. V diskusii sú všetky animácie zhodnotené a vysvetlené, prečo boli jednotlivé prvky použité v daných animáciách. Cieľ bakalárskej práce môžeme považovať za splnený a vytvorené animácie môžu byť použité pre znázornenie dôsledkov zaťaženia predpätých skrutiek reálnym cyklom.

**8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV**

- [1] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno : VUTUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-269-0.
- [2] KEMKA, Vladislav, BARTÁK, Jiří, MILČÁK, Petr, ŽITEK, Pavel. *Stavba a provoz strojů. Stroje a zařízení*. 1. vyd. Praha : INFORMATORIUM, 2009, 281 s. ISBN 978-80-7333-075-0.
- [3] GSCHEIDLE, Rolf a kolektiv. *Příručka pro automechanika*. 3. vyd. Praha : Europa-Sobotáles cz, 2007, 685 s. ISBN 987-90-86706-17-7.
- [4] RICHTER, Antonín. *Konstrukce spalovacích motorů I. díl. Klikový mechanismus*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1961, 401 s.
- [5] SÝKORA, Jan a Zdeněk SLÁDEK. *Části strojů IV: klikový mechanismus*. 2. vyd. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1974, 189 s.
- [6] KŘÍŽ, Rudolf, WEIGNER, Karel a Jaroslav SVOBODA. *Stavba a provoz strojů III. Mechanismy*. 1. vyd. Praha : SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1979, 168 s.
- [7] KŘÍŽ, Rudolf a kolektiv. *Stavba a provoz strojů I. Části strojů*. 1. vyd. Praha : SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1977, 226 s..
- [8] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. Vyd. 5., preprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha : SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 80-030-0046-7.
- [9] Klikový mechanismus motoru. *Autoopravy.eu* [online]. [cit. 2017-05-15]. dostupné z : <http://www.autoopravy.eu/index.php?akce=2&id=68/>
- [10] CINEMA-4D-training-tutorials *Lynda.com* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z : <https://www.lynda.com/CINEMA-4D-training-tutorials/173-0.html>
- [11] Tutoriály – Cinema4D. *Tutoriarts* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z : <http://www.tutoriarts.cz/tutorialy/cinema4d-57>

## 9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

$F_i$	[N]	-tlaková sila
$D$	[m]	-priemer piestu
$p$	[Pa]	-tak vo valci
$M_k$	[N.m]	-krútiaci moment
$S$	[N]	-sila v ojnici
$r'$	[m]	-rameno síl v ojnici
$r$	[m]	-rameno kľukového hriadeľa
$\alpha$	[°]	-uhol kľuky
$\beta$	[°]	-uhol ojnice
$M_{kl}$	[N.m]	-klopny moment
$N$	[N]	-tangenciálna sila
$b$	[m]	-vzdialenosť piestneho čapu od osi
$F$	[N]	-výsledná sila na piest
$F_s$	[N]	-zotrvačná sila posuvných hmôt
$m_p$	[kg]	-hmotnosť piestnej skupiny
$g$	[m.s <sup>-2</sup> ]	-ťažové zrýchlenie
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	-uhlová rýchlosť
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	-otáčky
$s$	[m]	-poloha
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	-rýchlosť
$a$	[m.s <sup>-2</sup> ]	-zrýchlenie
$l$	[m]	-dĺžka ojnice
$\lambda$	[m]	-dĺžkový pomer dĺžky ojnice
$m_C$	[kg]	-hmota rotujúcich častí
$m_i$	[kg]	-hmotnosti častí zalomenia kľuky
$r_i$	[m]	-polomery ťažísk zalomení
$F_C$	[N]	-zotrvačná sila rotujúcich hmôt
$m_s$	[kg]	-hmotnosť posuvných hmôt
$m_t$	[kg]	-hmotnosť piestnej tyče
$m_k$	[kg]	-hmotnosť križiaka
$m_{os}$	[kg]	-hmotnosť posúvajúcej sa časti ojnice
$m_A, m_B, m_k$	[kg]	-redukované hmotnosti
$a, b, k$	[m]	-vzdialenosti redukovaných hmôt
$J_S$	[kg.m <sup>2</sup> ]	-moment zotrvačnosti
$J_S'$	[kg.m <sup>2</sup> ]	-teoretický moment zotrvačnosti
$i$	[m]	-polomer zotrvačnosti
$\Delta J_S$	[kg.m <sup>2</sup> ]	-rozdiel momentov zotrvačnosti
$\Delta m$	[kg]	-kompenzačná hmota ojnice
$\varepsilon_o$	[s <sup>-2</sup> ]	-uhlové zrýchlenie
$\Delta M$	[N.m]	-kompenzačný moment
$F_n$	[N]	-výsledná normálová sila
$F_o$	[N]	-výsledná sila v ojnici
$F_r$	[N]	-výsledná radiálna sila

---

$F_t$	[N]	-tangenciálna sila na kľuke
$F_a$	[N]	-sila v ojničnom veku
$k_p$	[N. m <sup>-1</sup> ]	-celková tuhosť spojovaných súčastí
$k_1, k_2, k_i$	[N. m <sup>-1</sup> ]	-tuhosti spojovaných súčastí
$E$	[Pa]	-Youngov modul
$d$	[m]	-priemer skrutky
$D_k$	[m]	-priemer zovretej oblasti
$t_k$	[m]	-výška zrezaného kužela
$k_S$	[N. m <sup>-1</sup> ]	-tuhosť spájacích súčastí
$S_d$	[m <sup>2</sup> ]	-valcová plocha skrutky
$A_S$	[m <sup>2</sup> ]	-výpočtový prierez
$l_b$	[m]	-dĺžka zovretého závit
$l_g$	[m]	-dĺžka valcovej časti
$\delta$	[m]	-deformácia
$F_S$	[N]	-celková sila v skrutkách
$F_p$	[N]	-celková sila v spájaných súčastiach
$\Delta F_S$	[N]	-prevádzková sila v skrutkách
$\Delta F_p$	[N]	-prevádzková sila v spájaných súčastiach
$C$	[-]	-tuhostná konštanta spoja
$M_U$	[N.m]	-uťahovací moment
$K$	[-]	-súčiniteľ uťahovacieho momentu

**10 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV A GRAFOV**

<b>Obr. 2-1</b> Konštrukcia zážihového motora [3]	14
<b>Obr. 2-2</b> Sanie [3]	15
<b>Obr. 2-3</b> Kompresia [3]	16
<b>Obr. 2-4</b> Expanzia [3]	16
<b>Obr. 2-5</b> Výfuk [3]	17
<b>Obr. 2-6</b> p-V diagram	17
<b>Obr. 2-7</b> Rozloženie akčných síl [4]	19
<b>Obr. 2-8</b> Výsledná sila na piest [6]	20
<b>Obr. 2-9</b> Priebeh výslednej sily na piest	21
<b>Obr. 2-10</b> Dráha piestu	23
<b>Obr. 2-11</b> Rýchlosť piestu	23
<b>Obr. 2-12</b> zrýchlenia piestu	24
<b>Obr. 2-13</b> Náhrada ojnice dvomi bodmi [5]	26
<b>Obr. 2-14</b> Priebehy $F_o$ , $F_r$ a $F_t$	28
<b>Obr. 2-15</b> Zloženie ojnice [3]	29
<b>Obr. 2-16</b> Možnosti zaistenia veka ojnice [4]	29
<b>Obr. 2-17</b> Sila pôsobiaca na veko ojnice [5]	30
<b>Obr. 2-18</b> Predĺženie skrutky [7]	31
<b>Obr. 2-19</b> Skrutkový spoj zaťažený ťahom [1]	31
<b>Obr. 2-20</b> zrezaný dvojkužel [1]	32
<b>Obr. 2-21</b> Montážny diagram predpätého spoja [1]	33
<b>Obr. 4-1</b> Metódy	37
<b>Obr. 4-2</b> Pracovný priestor Cinemy 4D	39
<b>Obr. 4-3</b> F-krivky	40
<b>Obr. 4-4</b> X-Presso	40
<b>Obr. 5-1</b> Kinematika kľukového mechanizmu	41
<b>Obr. 5-2</b> Maximálna záťaž	42
<b>Obr. 5-3</b> Priebeh zaťažujúcich síl	43
<b>Obr. 5-4</b> Silovo deformačné chovanie spoja	44

**11 ZOZNAM TABULIEK**

**11**

**Tab. 4-1** Nastavenia animácií

38