



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav konstruování a částí strojů**

**Návrh šrotovníku výlisků semen olejnin**

**Construction Design of the Oil Seed Press  
Cakes Shredder**

**Diplomová práce**

**2023**

**Pavel PŘÍVOZNÍK**

**Studijní program:** NDTT Dopravní a transportní technika

**Studijní obor:** N071TTTE Transportní technika

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Přívozník** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **475418**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**  
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**  
Specializace: **Transportní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh šrotovníku výlisků semen olejnin**

Název diplomové práce anglicky:

**Construction Design of the Oil Seed Press Cakes Shredder**

Pokyny pro vypracování:

1. Uveďte do problematiky šrotování výlisků semen olejnin, udělejte rešerši průmyslových strojů pro šrotování a představte metodu DEM simulace.
2. Na základě rešerše navrhnete vlastní koncepci stroje.
3. Vytvořte metodiku návrhu tohoto stroje a popište návrhové výpočty.
4. Vytvořte odpovídající 3D model ve vybraném CAD na úrovni konstrukčních detailů.
5. Připravte simulační model DEM za použití vybraného softwaru pro simulaci šrotování.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoj a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
- [2] Joseph E. Shigley: Konstruování strojních součástí. 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] FREDERICK E. GIESECKE. Technical Drawing with Engineering Graphics. 2014. Pearson New International Edition. ISBN 13: 9781292026183.
- [4] Katalogy výrobců.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

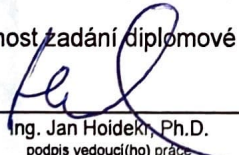
**Ing. Jan Hoidekr, Ph.D. ústav konstruování a částí strojů FS**

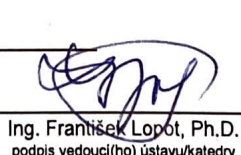
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

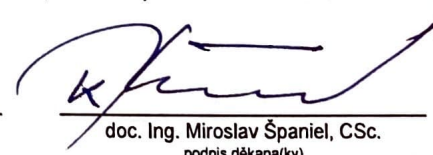
Datum zadání diplomové práce: **11.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. František Lopot, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

26. 4. 2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh šrotovníku výlisků semen olejnin“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Hoidekra, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 22. června 2023

-----  
Bc. Pavel Přívozník

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Janu Hoidekrovi, Ph.D. za ochotu, čas a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Firmě *Farmet a.s.* děkuji za umožnění spolupráce na tomto projektu a cenné rady předané při konzultacích. Své rodině děkuji za podporu a umožnění studia.

Jméno autora: Bc. Pavel PŘÍVOZNÍK  
Název DP: Návrh šrotovníku výlisků semen olejnin  
Anglický název: Construction Design of the Oil Seed Press Cakes Shredder  
Rok: 2023  
Studijní program: NDTT Dopravní a transportní technika  
Obor studia: N071TTTE Transportní technika  
Ústav: Ústav konstruování a částí strojů  
Vedoucí DP: Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.  
Konzultant: Ing. Jan Hoidekr, Ph.D.  
Bibliografické údaje: počet stran 81  
počet obrázků 52  
počet tabulek 17  
počet příloh 0

Klíčová slova: Výlisky semen olejnin, vzdušné třídění, energetická náročnost stroje, šrotovník, DEM model

Keywords: Oil Seed Press Cakes, air classifier, machine energy consumption, shredder, discrete element method model

Anotace: Práce se zabývá návrhem šrotovníku výlisků semen olejnin. V první části se práce zabývá řešením průmyslových šrotovníků. V druhé části je proveden návrh stroje a popsána metodika návrhu. Následně je vytvořen DEM model, na základě kterého jsou provedeny simulace třídění. Simulace jsou vyhodnoceny v závislosti na otáčkách třídícího koše.

Abstract: The work deals with the design of a shredder for pressed cakes of oilseeds. In the first part, the work deals with the research of industrial shredder. In the second part, the design of the machine is carried out and the design methodology is described. Subsequently, a DEM model is created on the basis of which sorting simulations are performed. The simulations are evaluated depending on the speed of the sorting basket.

## Obsah

Prohlášení.....	II
Poděkování.....	III
<b>1 Úvod.....</b>	<b>1</b>
1.1 Cíle práce.....	1
1.2 Úvod do problematiky šrotování.....	2
<b>2 Rešerše.....</b>	<b>3</b>
2.1 Průmyslová rešerše strojů pro šrotování.....	3
2.1.1 Vzduchem tříděný šrotovník.....	4
2.1.2 Kladivový mlýn.....	6
2.1.3 Kolíkový mlýn.....	7
2.1.4 Proudový mlýn.....	9
2.1.5 Kulový mlýn.....	10
2.1.6 Mlýn „tekutinové lůžko“.....	11
2.2 Nejvýznamnější dodavatele technologií šrotování.....	12
2.2.1 Alpa Powder equipment.....	12
2.2.2 Hosokawa Alpine.....	13
2.2.3 Kemutec.....	14
2.2.4 Netzsch Proven Excellence.....	15
2.2.5 Rathi engineering.....	16
2.3 Vybrané vědecké publikace zabývající se problematikou vzdušného třídění 17	
2.4 Závěry plynoucí z přehledu problematiky.....	22
<b>3 Metoda diskretních prvků (DEM).....</b>	<b>23</b>
3.1 Metoda diskretních prvků.....	24
3.2 Přehled předních softwaru pro DEM simulace.....	25
3.3 Rocky DEM.....	25
<b>4 Návrh stroje.....</b>	<b>27</b>
Zadané parametry stroje.....	27
Koncepce stroje.....	27
Shrnutí nutných návrhových výpočtů.....	28
4.1 Kinematická charakteristika pohybu šrotované hmoty.....	30
4.1.1 Návrh drtiče.....	31
4.2 Energetická náročnost stroje.....	34
4.2.1 Energie potřebná k pohybu směsi.....	34
4.2.2 Aerodynamický odpor rotujících částí.....	34
4.2.3 Energie potřebná k rozběhu stroje do pracovního režimu.....	36

4.2.4	Mechanické ztráty stroje .....	37
4.3	Celková energetická náročnost stroje .....	37
4.4	Návrh motorů šrotovníku .....	38
4.5	Návrh řemenového převodu drtiče .....	39
4.6	Návrh ložisek třídiče.....	42
4.6.1	Návrh dvouřadého kosoúhlého kuličkového ložiska 3207 A.....	44
4.6.2	Návrh radiálního kuličkového ložiska 208.....	46
4.7	Návrh ložisek drtiče.....	48
4.7.1	Návrh kuželíkového ložiska 30208 .....	49
4.8	Popis konstrukce stroje.....	52
	Spodní část stroje .....	57
	Horní část stroje .....	58
	Třídící koš (třídič) .....	59
	Drticí disk (drtič).....	60
	Stator .....	61
	Dělicí přepážka.....	62
	Ložiskové jednotky .....	63
<b>5</b>	<b>Příprava modelu pro DEM simulaci .....</b>	<b>65</b>
5.1	Vstupní parametry .....	65
	První nastavení.....	65
	Druhé nastavení.....	65
5.2	Nastavení simulace .....	65
	Ansys Fluent .....	65
	Rocky DEM .....	66
5.3	Vyhodnocení simulace .....	67
	Vyhodnocení simulace: První nastavení .....	67
	Vyhodnocení simulace: Druhé nastavení.....	69
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>71</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>73</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>76</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>78</b>
	<b>Seznam použitých symbolů a zkratk .....</b>	<b>79</b>

# 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá návrhem šrotovníku výlisků semen olejnin. Práce vznikla ve spolupráci s firmou *Farmet a. s.*, které je přední českým výrobcem zemědělské techniky a techniky pro zpracování semen olejnin.

## 1.1 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je návrh šrotovníku výlisků semen olejnin a popis principu návrhu. Návrh stroje se bude opírat o řešení konkurenčních strojů určených ke šrotování výlisků semen olejnin. Při návrhu bude také zohledněna řešení odborných článků zabývajících se daným tématem.

Pomocí CAD systému Autodesk Inventor 2022 bude vytvořen 3D model na úrovni konstrukčních detailů. S firmou *Farmet a. s.* budou konzultovány jednotlivé konstrukční celky s ohledem na výrobní možnosti firmy.

Po vytvoření 3D modelu bude připraven model pro DEM simulaci šrotování výlisků.



## 1.2 Úvod do problematiky šrotování

Mezi semena olejnin se řadí řada plodin například bavlník, sójový bob, lněné semeno, řepka olejka, podzemnice olejná, slunečnicové semeno aj. přičemž každá z nich se vyznačuje jinými vlastnostmi. Rozlišujeme je dle vzhledu, fyzikálních vlastností a také dle účelu. Semena jsou šlechtěna pro různé účely například pro krmný průmysl, potravinářský průmysl aj. Při lisování semen získáváme primárně olej a jako podružnou složku dostáváme výlisek semen. Výlisek obsahuje značné množství bílkovin, tuků a aminokyselin. Výlisek se dále zpracovává pomocí šrotovníku, který z výlisků vytváří menší částice (prášek). Tento prášek se dále využívá v zemědělském a potravinářském průmyslu pro obohacení potravy. Jeho použití má vliv na optimální rychlost výkrmu hospodářských zvířat. Obohacením krmiva práškem zvýšíme jeho nutriční hodnoty, primárně hodnotu bílkovin.

V současné době se pro šrotování výlisků semen olejnin používá široká škála výrobních strojů, jako je vzduchem tříděný šrotovník, kladivový mlýn aj. Nejpoužívanější stroj pro zpracování zemědělských plodin o nízké vlhkosti je vzduchem tříděný šrotovník. Je ideální pro kontinuální zpracování velkých objemů suroviny. Zařízení je určeno pro produkci hrubé, střední, jemné a velmi jemné velikosti sypkého materiálu. Požadované velikosti materiálu jsou závislé na dalším zpracování. Jejich rozdělení je následující:

- velmi jemné 0,1 – 25  $\mu m$ ,
- jemné 25 – 60  $\mu m$ ,
- střední 60 – 150  $\mu m$ ,
- střední 150 – 5 000  $\mu m$ .

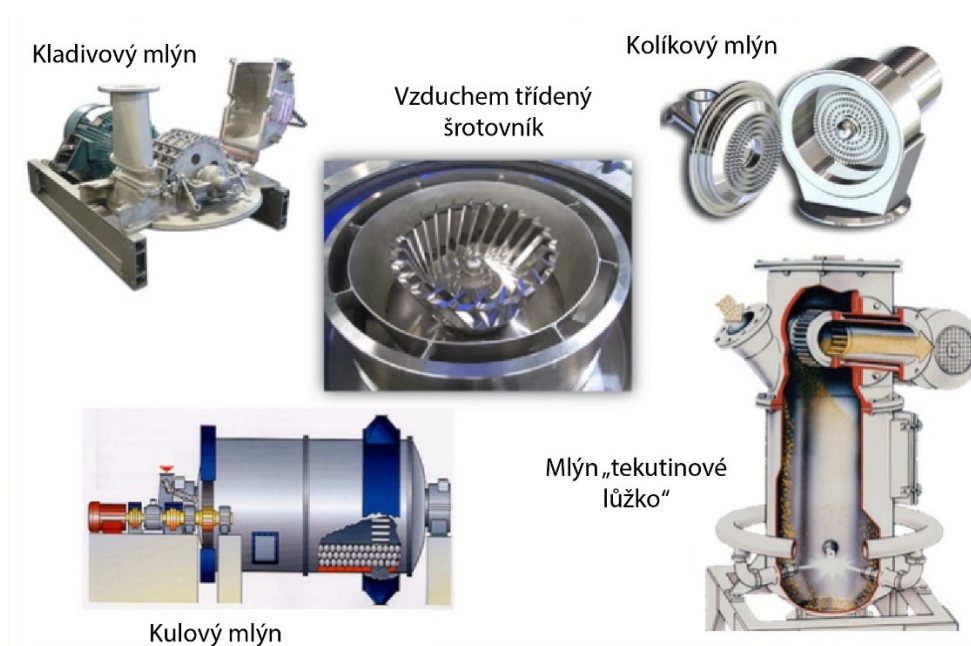
## 2 Rešerše

### 2.1 Průmyslová rešerše strojů pro šrotování

V odvětví zpracování zemědělských plodin se v současné době používá nejčastěji pět typů strojů:

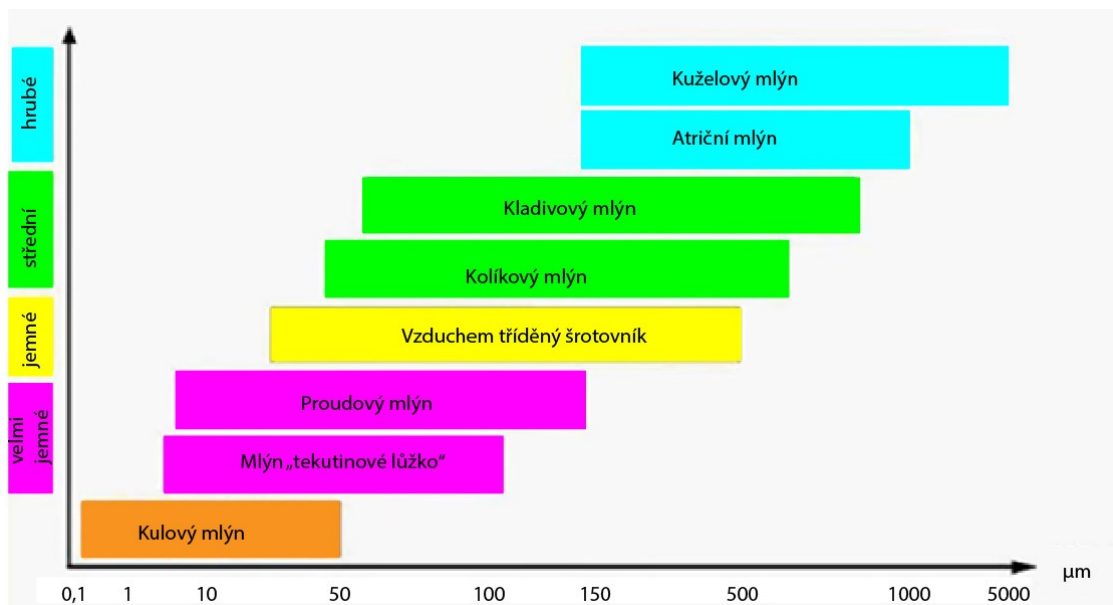
- kladivový mlýn,
- vzduchem tříděný šrotovník,
- kulový mlýn,
- kolíkový mlýn,
- mlýn „tekutinové lůžko“.

Tyto stroje jsou vyobrazeny na Obr. 1. Každý stroj je schopen šrotovat vstupní surovinu a vytvářet tak prášek v určitém rozmezí hrubosti viz Obr. 2. Vyobrazené stroje jsou určeny převážně pro šrotování suchých surovin.[1]

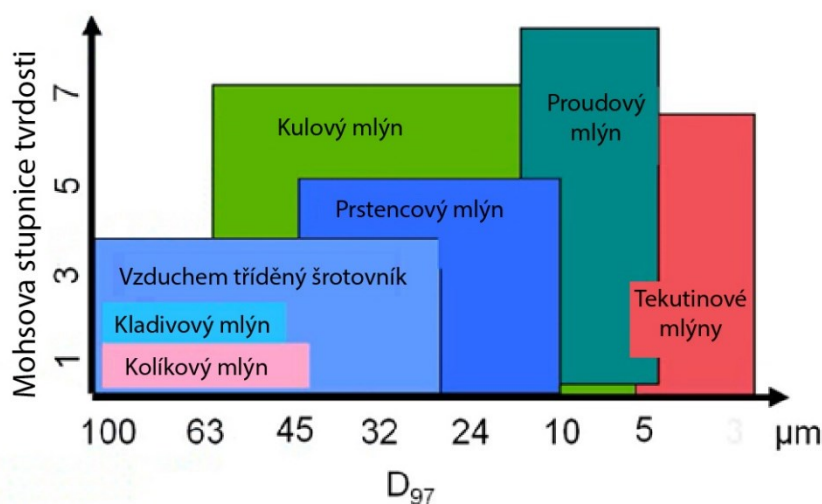


Obr. 1 Přehled mlecích strojů upraveno z [1]

Velikost výstupní suroviny lze měnit řízením vstupních parametrů (otáčky rotoru, typ nože, rychlost proudění vzduchu atd). Velký vliv na velikost výstupní suroviny má také tvrdost suroviny. Na Obr. 3 je vyobrazena vhodnost každého stroje pro určitou tvrdost v závislosti na velikosti výstupní frakce.[1]



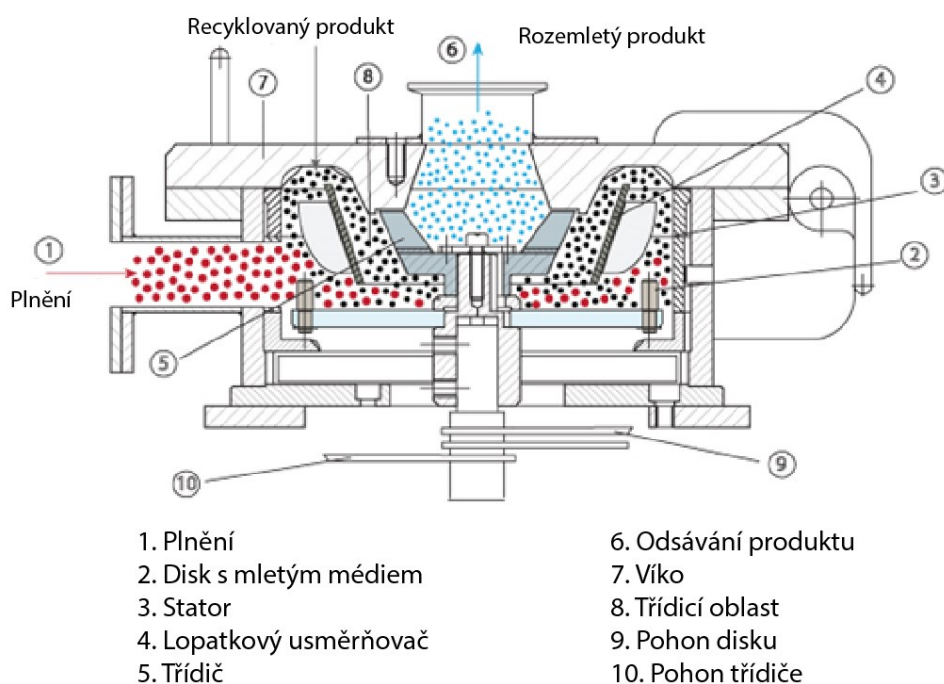
Obr. 2 Rozdělení strojů dle velikosti výstupní suroviny upraveno z [1]



Obr. 3 Rozdělení strojů dle tvrdosti vstupní suroviny upraveno z [1]

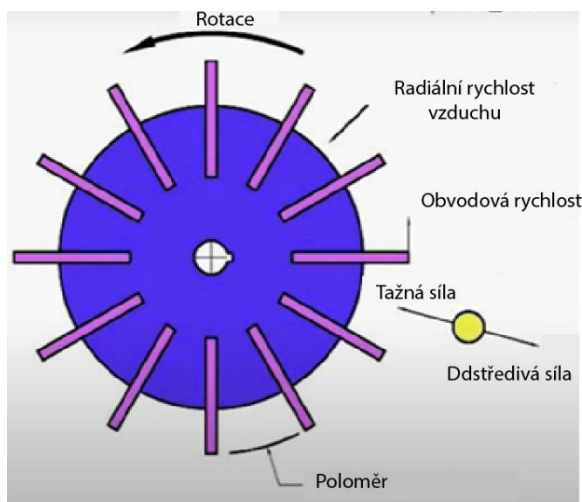
### 2.1.1 Vzduchem tříděný šrotovník

Jedná se o šrotovník, který je založený na principu dvou rotorových kol a jednoho satorového prstence viz Obr. 4 .



Obr. 4 Schéma vzduchem tříděného mlýnu upraveno z [2]

Vstupní surovinu přivádíme z boku na rotující disk (2), který si surovinu vlivem rotace odebírá a drtí ji samotným nárazem mlecího prvku do suroviny a zároveň pomocí tření mezi stěnou statorového prstence a mlecího prvku. Následně rozemletá surovina směřuje z mlecí komory do komory třídící pomocí proudu vzduchu. V této komoře se nachází třídící rotorové kolo (5), které rotuje stejným směrem jako mlecí rotor, ale s výrazně nižšími otáčkami. Skrz třídící rotor je pomocí proudu vzduchu vtahována rozemletá surovina. Proces třídění je založen na principu odstředivé síly viz Obr. 5, kdy velké kusy suroviny mají větší odstředivou sílu, než je tažná síla, kterou vytváří proud vzduchu. Z toho vyplývá, že velké kusy suroviny nejsou vtaženy dovnitř a jsou vyhozeny zpět do šrotovníku.



Obr. 5 Schéma třídícího rotoru upraveno z[1]

Řízením otáček a rychlosti proudu lze řídit velikost výstupní suroviny, která projde skrz třídící kolo. Na Obr. 6 a Obr. 7 jsou uvedeny dva nejběžnější typy třídících kol.



*Obr. 6 Třídící kolo s přímými lopatkami [3]*

Stroj je vhodný pro mletí a následné třídění surovin v rozsahu velikosti 20  $\mu\text{m}$  až 500  $\mu\text{m}$ . Mletá surovina by měla být nejvýše tvrdosti 4 dle Mohsovy stupnice. V mlýnu lze zpracovávat zemědělské plodiny a nerostné suroviny.[1][2][12]

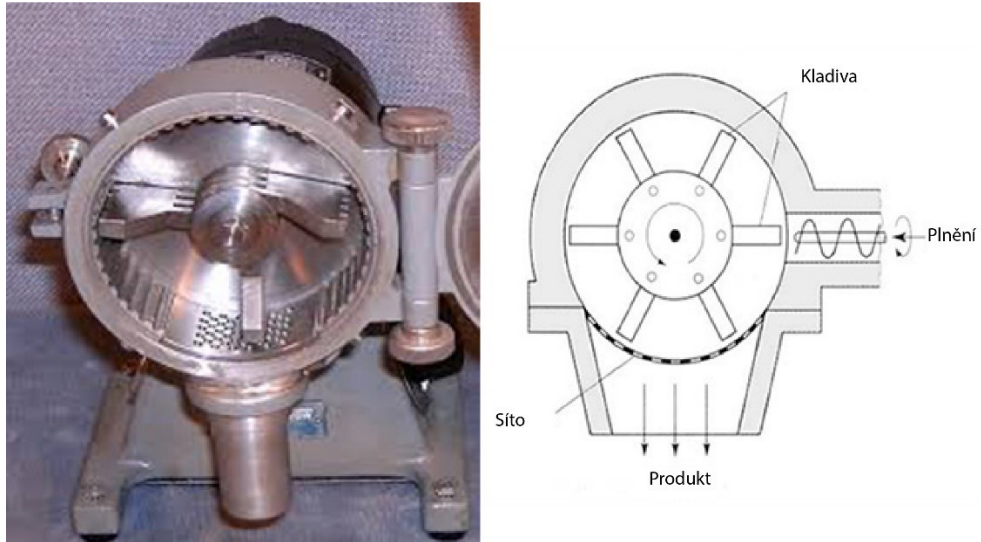


*Obr. 7 Třídící kolo s šikmými lopatkami[1]*

### 2.1.2 Kladivový mlýn

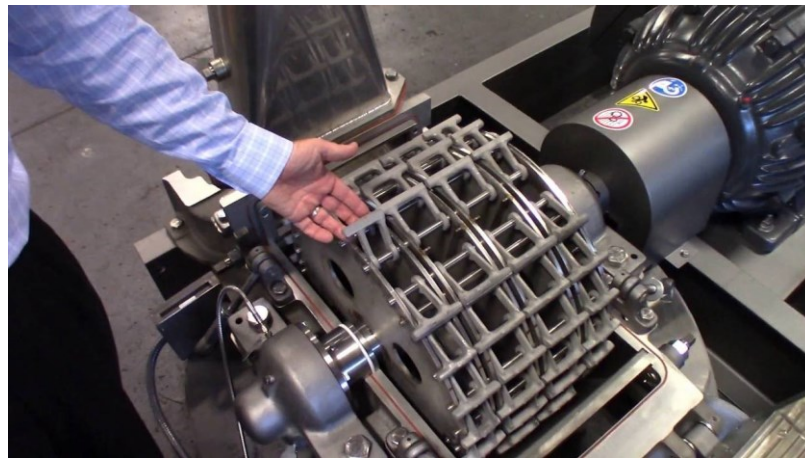
Zařízení disponující rotující klecí obsahující nože (kladiva), které melou surovinu pomocí nárazu a následným třením o stěnu zařízení. Tento typ zařízení neobsahuje integrované vzduchové třídění viz Obr. 8 . Třídění se provádí pouze za pomoci sít vkládaných do spodní části mlýna, kterými propadáva rozemletá surovina.





Obr. 8 Kladivový mlýn schéma upraveno z [4]

Stroj je vhodný pro zpracování zemědělských surovin a nerostných surovin. Mlýn je vhodný pro mletí a následné třídění surovin v rozsahu velikosti 40  $\mu\text{m}$  až 800  $\mu\text{m}$ . Velikost výstupní suroviny lze ovlivnit otáčkami rotoru a různými typy nožů (kladiv) viz Obr. 8 a Obr. 9 . [1][2]



Obr. 9 Kladivový mlýn rotor I[1]

### 2.1.3 Kolíkový mlýn

Mlýn drtí surovinu pomocí rotujícího disku s kolíky a kolíky uložených pevně na rámu stroje. Princip funkce je totožný s kladivovým mlýnem, třídění probíhá opět pomocí vkládaných sít do spodní části stroje.

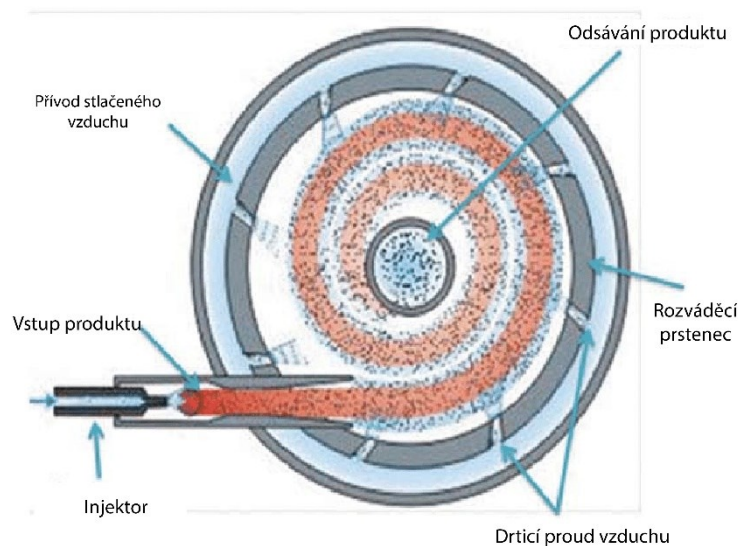


*Obr. 10 Kolikový mlýn[5]*

Stroj je vhodný pro zpracování zemědělských surovin a nerostných surovin. Mlýn je vhodný pro mletí a následné třídění surovin v rozsahu velikosti 40  $\mu\text{m}$  až 600  $\mu\text{m}$ . Velikost výstupní suroviny lze ovlivnit otáčkami rotoru a různými typy kolíků. [1][2]

### 2.1.4 Proudový mlýn

Do mlýna je tryskou vháněn proud vzduchu o velké rychlosti, do tohoto proudu je sypána směs určená k semletí viz Obr. 11. Proud vzduchu tře směs o stěnu stroje, přičemž dochází k mletí suroviny. Po obvodu stroje jsou vytvořeny trysky, které vyfukují malé kusy směsi do středu, kde dochází k odvodu těchto malých kusů pryč z mlecí komory. Regulací tlaku v těchto tryskách dokáže stroj třídít, jak velké kusy suroviny opustí mlecí komoru, je to tedy způsob třídění podle velikosti. Třídění pracuje na rovnováze sil mezi odstředivou silou se silou proudu vzduchu. Tento způsob mletí a třídění je energeticky náročný, z hlediska potřeby velkého tlaku na vstupní trysce. Výhoda této metody zpracování je, že zpracovávaná surovina je minimálně tepelně ovlivněná díky velkému proudění vzduchu, a také výstupní surovina obsahuje minimum kovových částic. Tento způsob zpracování je vhodný pro velmi jemné mletí v rozsahu 5 $\mu$ m až 15  $\mu$ m. Zpracovávaná surovina musí být před samotným mletím v proudovém mlýnu předemleta. [1]

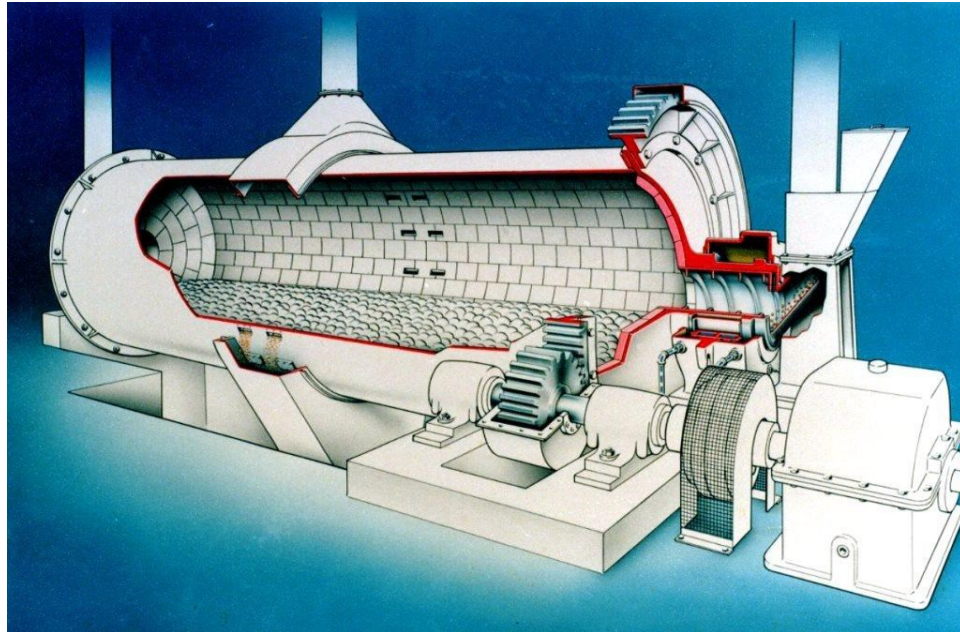


Obr. 11 Proudový mlýn schéma upraveno z [1]



### 2.1.5 Kulový mlýn

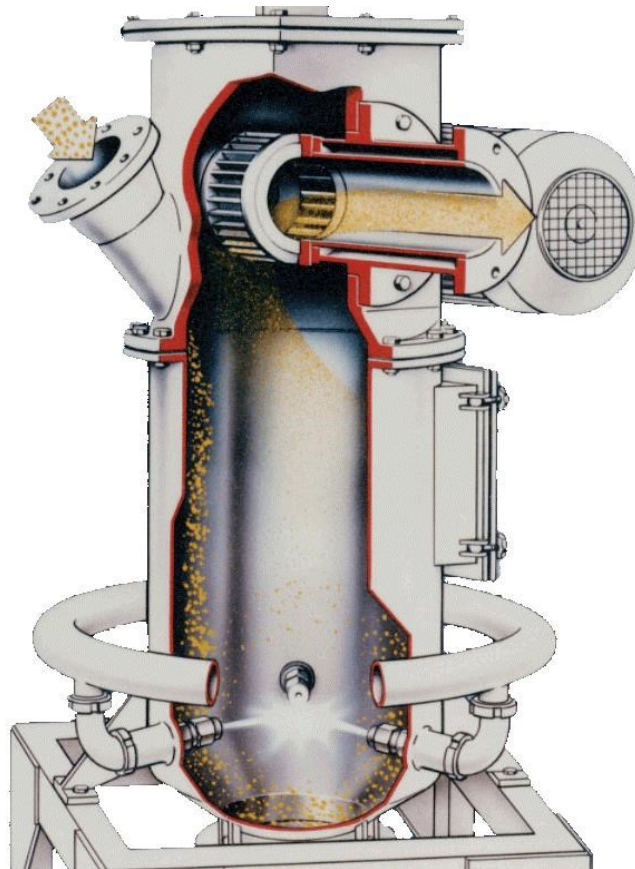
Stroj pracuje na principu převalování kulových elementů v otáčející se nádobě. Vlivem tření kulových elementů v mleté surovině vůči sobě a vůči stěně dochází k mletí. Tento způsob dosahuje výsledné jemnosti suroviny od 0,1  $\mu\text{m}$  do 50  $\mu\text{m}$ . Mlýn nedisponuje zabudovaným tříděním, ale je potřeba připojit třídící zařízení za výstup z mlýnu. Používá se v zásadě odstředivé třídění jako u vzduchem tříděného mlýnu. [1]



*Obr. 12 Kulový mlýn [1]*

### 2.1.6 Mlýn „tekutinové lůžko“

V mlýnu je surovina sypána do proudu vzduchu, který směřuje svisle vzhůru. Surovina je tímto proudem unášena do doby, kdy narazí do rotující třídící klece. Klec slouží jak k třídění velikosti výstupní suroviny, tak také k mletí suroviny vlivem nárazu do klece. Tento způsob zpracování je vhodný pro mletí v rozsahu 10 $\mu$ m až 100  $\mu$ m.



Obr. 13 Mlýn "tekutinové lůžko" [1]

## 2.2 Nejvýznamnější dodavatelé technologií šrotování

Tato část práce je zaměřena pouze na výrobce, kteří nabízejí vzduchem tříděný šrotovník. Jedná se o typ šrotovníku, který bude později navrhován.

### 2.2.1 Alpa Powder equipment

Materiál je rovnoměrně poslán do mlecí komory podávacím systémem a je silně ovlivňován vysokorychlostním rotujícím mlecím kotoučem. Současně je vystaven odstředivé síle, aby se srazil s drticím ozubeným věncem, a je vystaven různým komplexním silám, jako je stříh, tření a kolize. Materiál se mele a drcený materiál se s proudem vzduchu pohybuje do třídící oblasti. Hrubé a jemné materiály se oddělují pomocí třídícího kotouče. Produkty, které splňují požadavky na jemnost, vstupují do cyklónového sběrače a sběrače prachu s proudem vzduchu ke sběru a hrubé částice se vracejí do mlecí oblasti, aby pokračovaly v rozbití. [11]



Obr. 14 Šrotovník od značky ALPA[11]

### 2.2.2 Hosokawa Alpine

Tento šrotovník ACM byl první třídící šrotovník na trhu v roce 1962. Od té doby byl ACM neustále vyvíjen a přizpůsobován měnícím se potřebám trhu. S více než 1 000 referencemi po celém světě se používá v každém odvětví:

- Chemikálie: bisfenol, kyselina vinná, E-PVC, fungicidy, herbicidy, stearáty.
- Práškové barvy: epoxidové, polyesterové, hybridní, UV vytvrzované akryláty, polyamid
- Potraviny: cukr, kakao, škrob, rybí moučka, xanthan, guarová mouka, laktóza
- Minerály: mastek, kaolin, síran vápenatý, bauxit, vápenec. [12]



Obr. 15 Šrotovník od značky Hosokawa Alpine [12]

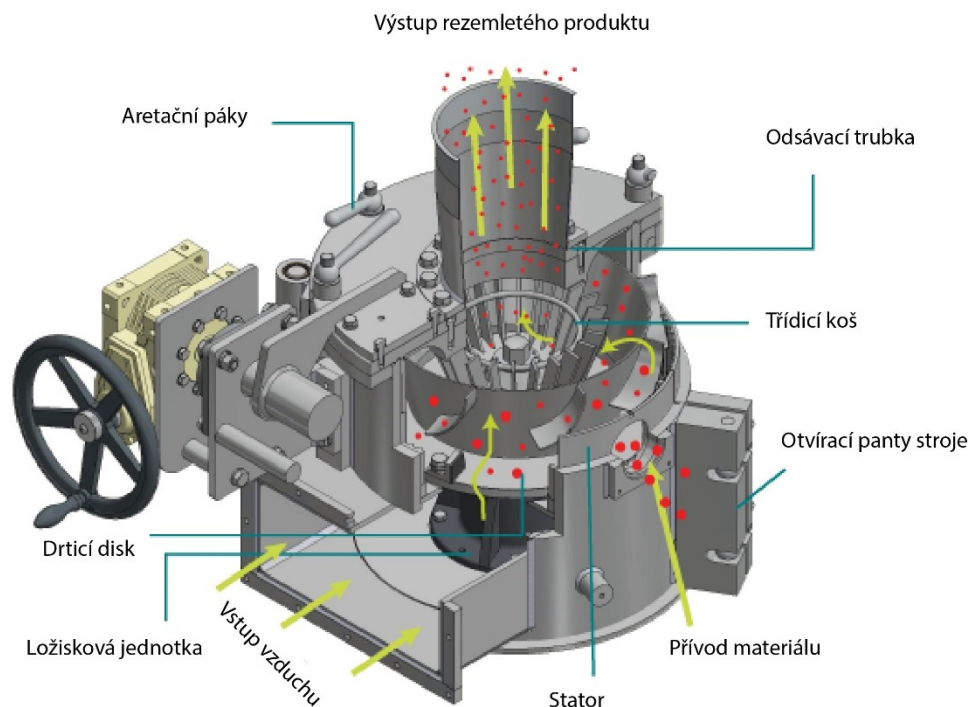
### 2.2.3 Kemutec

PPS Air Classifier Mills poskytují ultrajemné mletí s řízenou distribucí velikosti částic.

Mezi typické aplikace patří:

- potravinářský průmysl (práškový cukr 12X a 14X, lepek, ultra jemná mouka),
- chemický průmysl (prášková barviva, tonerové prášky, suché sorbentové prášky).

[13]



Obr. 16 Šrotovník od značky Kemutec upraveno z [13]

#### 2.2.4 Netzsch Proven Excellence

Třídíčový mlýn CSM je kombinovaný jemný rázový mlýn a klasifikátor zpracovávaného produktu. Třídíčový mlýn NETZSCH CSM 560 lze použít k získání jemnosti 9 um až 200 um. [14]

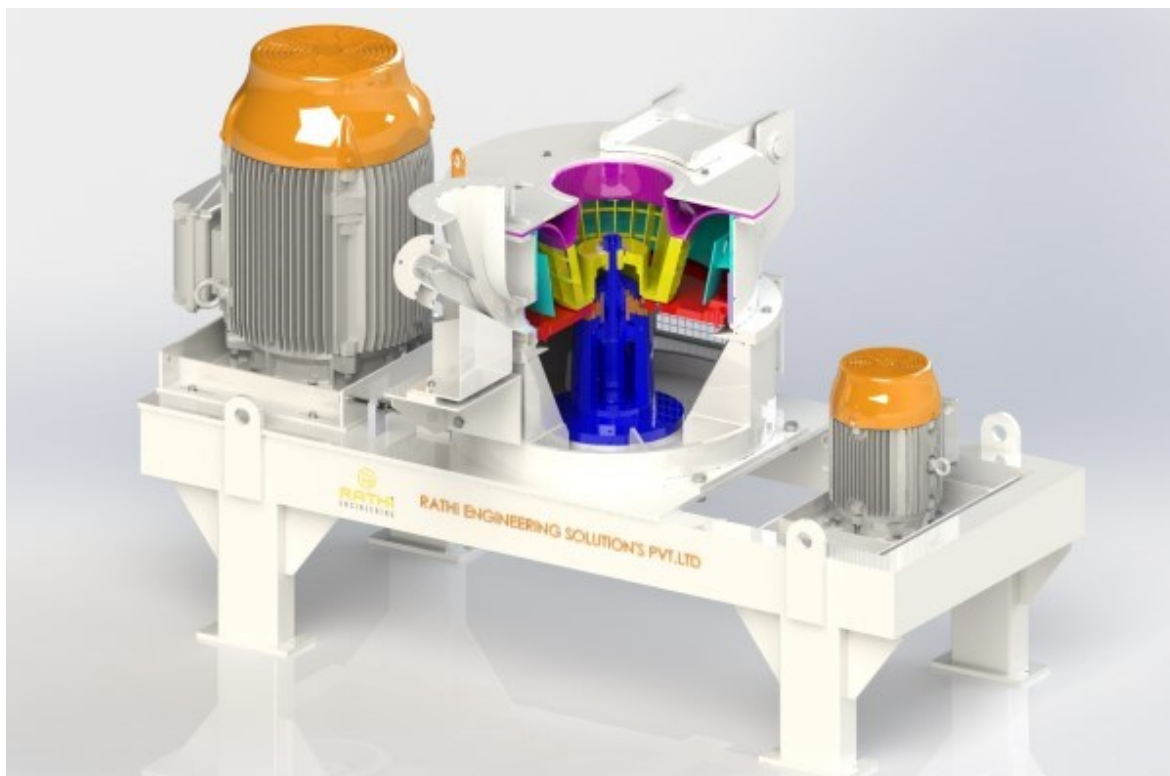


Obr. 17 Šrotovník od značky Netzsch [14]



### 2.2.5 Rathi engineering

Mlýn Rathi Air Classifying je jedním z všestranných mlýnů, který poskytuje účinné mletí, třídění a minimalizuje přemletí materiálu; tento mlýn také poskytuje maximální flexibilitu mletí s velmi dobrou distribucí velikosti částic. [15]



*Obr. 18 Šrotovník od značky Rathi engineering [15]*

## 2.3 Vybrané vědecké publikace zabývající se problematikou vzdušného třídění

Pro správnou funkci vzdušného třídění (Air classifier) za pomoci proudu vzduchu a třídícího kola, viz Obr. 4, je za potřeby správně naladit operační veličiny. To ukazují výsledky publikované v článku [6], který se zabývá predikcí velikosti suroviny při mletí. Práce zkoumala vliv rychlosti mlecího kola, třídícího kola, dávkovacího kola suroviny a proudu vzduchu na velikost výstupní veličiny. Byl použit vzdušný mlýn ACM-10 od firmy Reico. Práce se zabírala zkoumáním těchto vlastností na chloridu amonném. V Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3 a Tab. 4 jsou zaznamenány výsledky experimentu. V tabulkách je vidět, jaký vliv mají jednotlivé operační veličiny. [6]

Tab. 1 Vliv otáček mlecího kola na velikost rozemleté suroviny [6]

FRAL [min <sup>-1</sup> ]	Otevření klapky	Drtič [min <sup>-1</sup> ]	Třídíč [min <sup>-1</sup> ]	Průměrná velikost suroviny(změřena)	Průměrná velikost suroviny(vypočtena)	Rozdíl velikostí	Rozdíl velikostí
(A)	(B)	(C)	(D)	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	(%)
(a)							
5	0.75	3000	1200	49.86	45.36	4.50	9.02
5	0.75	3500	1200	43.23	39.79	3.44	7.96
5	0.75	4000	1200	38.54	35.52	3.02	7.84
5	0.75	4500	1200	34.63	32.14	2.49	7.19
5	0.75	5000	1200	30.78	29.38	1.40	4.54
(b)							
5	0.75	3000	1000	59.91	54.93	4.98	8.31
5	0.75	3500	1000	52.28	48.18	4.10	7.84
5	0.75	4000	1000	46.63	43.01	3.62	7.76
5	0.75	4500	1000	42.15	38.92	3.23	7.66
5	0.75	5000	1000	38.48	35.58	2.90	7.53

Z Tab. 1 je vidět, že s navyšováním otáček mlecího kola klesá výstupní velikost suroviny. Při nastavení (b) se snížily otáčky třídícího kola, tudíž se snížila odstředivá síla působící na rozemletou surovinu. To má za následek, že tažná síla proudu vzduchu překoná odstředivou sílu suroviny, a dovolí tak větším částicím suroviny projít přes třídící kolo. Stejný výsledek je vidět i v Tab. 2, kde se zvyšovaly otáčky třídícího kola. To má za následek zvyšování odstředivé síly, tudíž propouštění menších částic suroviny skrze třídící kolo. [6]



*Tab. 2 Vliv otáček třídícího kola na velikost rozemleté suroviny [6]*

FRAL [min <sup>-1</sup> ]	Otevření klapky	Drtič [min <sup>-1</sup> ]	Třídíč [min <sup>-1</sup> ]	Průměrná velikost suroviny(změřena)	Průměrná velikost suroviny(vypočtena)	Rozdíl velikostí	Rozdíl velikostí
(A)	(B)	(C)	(D)	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	(%)
(a)							
5	0.75	4000	700	54.25	62.55	-8.30	-15.30
5	0.75	4000	850	50.40	51.02	-0.62	-1.23
5	0.75	4000	1000	49.80	43.01	6.79	13.63
5	0.75	4000	1100	43.04	38.92	4.12	9.57
5	0.75	4000	1200	38.54	35.52	3.02	7.84
(b)							
5	0.75	5000	700	48.87	51.74	-2.87	-5.87
5	0.75	5000	850	42.35	42.20	0.15	0.35
5	0.75	5000	1000	38.48	35.58	2.89	7.53
5	0.75	5000	1100	33.31	32.19	1.12	3.36
5	0.75	5000	1200	30.78	29.38	1.40	4.55

V Tab. 3 je viditelné, že rychlost dávkování suroviny hraje také nezanedbatelnou roli při nastavování stroje. Stejně tak vliv redukce proudu vzduchu nastavováním škrťací klapky viz Tab. 4. S rostoucím otevřením klapky roste také rychlost proudu vzduchu a tím se překonává odstředivá síla na třídícím kole. To má za následek průchod větších částí skrze třídící kolo.[6]

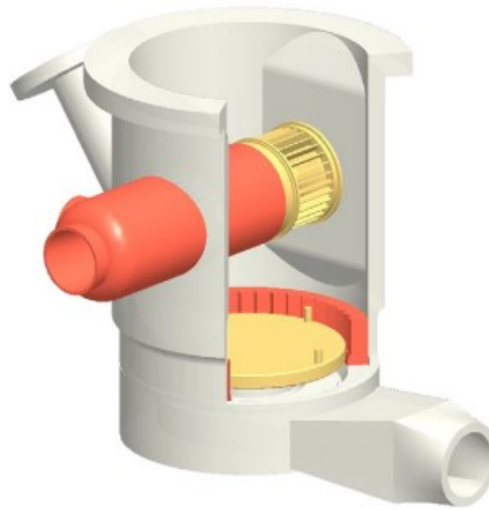
*Tab. 3 Vliv otáček dávkovače (FRAL) na velikost rozemleté suroviny [6]*

FRAL [min <sup>-1</sup> ]	Otevření klapky	Drtič [min <sup>-1</sup> ]	Třídíč [min <sup>-1</sup> ]	Průměrná velikost suroviny(změřena)	Průměrná velikost suroviny(vypočtena)	Rozdíl velikostí	Rozdíl velikostí
(A)	(B)	(C)	(D)	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	(%)
5	0.5	5000	1000	31.98	30.87	1.11	3.47
6	0.5	5000	1000	33.81	32.91	0.90	2.66
7	0.5	5000	1000	35.98	34.73	1.25	3.47
8	0.5	5000	1000	37.13	36.39	0.74	1.99
9	0.5	5000	1000	38.28	37.93	0.35	0.91

*Tab. 4 Vliv otevření klapky přívodu vzduchu do mlýna na velikost rozemleté suroviny [6]*

FRAL [min <sup>-1</sup> ]	Otevření klapky	Drtič [min <sup>-1</sup> ]	Třídíč [min <sup>-1</sup> ]	Průměrná velikost suroviny(změřena)	Průměrná velikost suroviny(vypočtena)	Rozdíl velikostí	Rozdíl velikostí
(A)	(B)	(C)	(D)	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	(%)
5	0.25	4000	700	38.09	42.58	-4.49	-11.79
5	0.50	4000	700	47.16	54.28	-7.12	-15.10
5	0.75	4000	700	54.25	62.55	-8.30	-15.30
5	1.00	4000	700	57.58	69.18	-11.60	-20.14

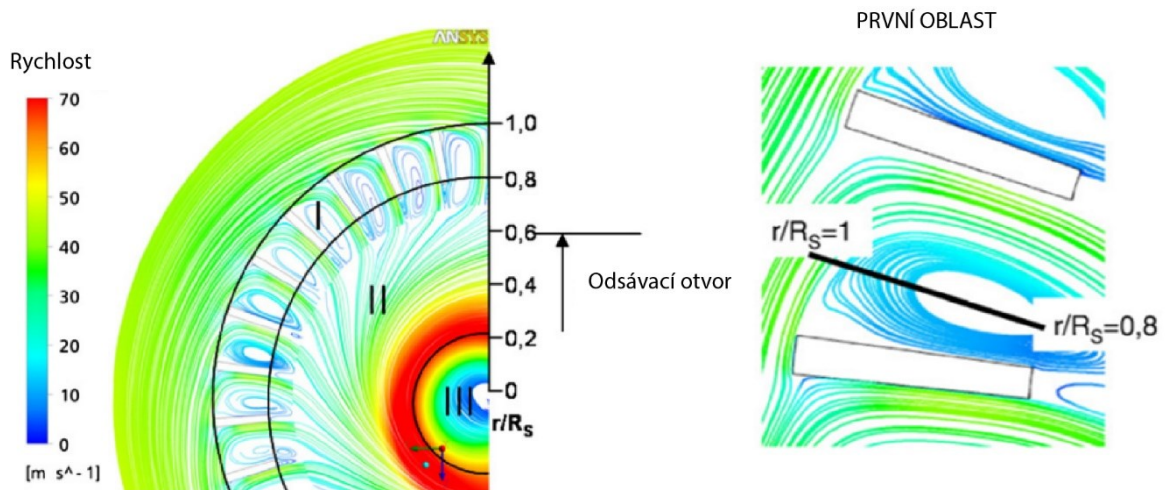
Velkou roli v procesu třídění a mletí hraje proudění vzduchu ve stroji. Článek [7] se zabývá charakterizováním jednofázového proudění ve vzdušném mlýnu viz Obr. 19.



Obr. 19 Vzdušný mlýn ZPS-100[1]

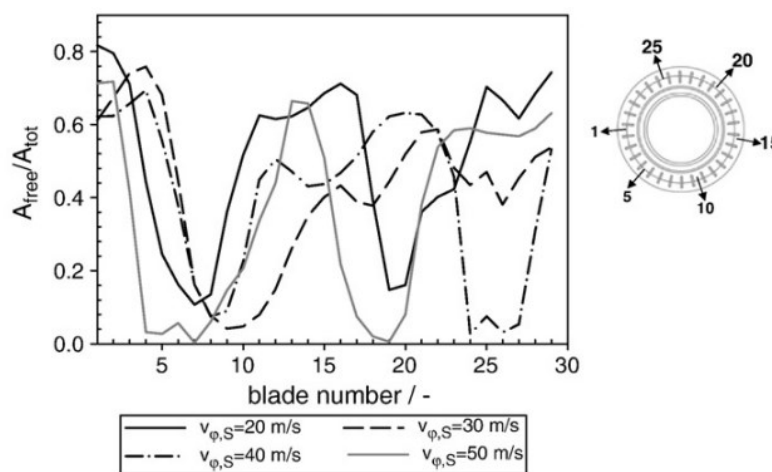
Bylo zkoumáno proudění kolem kolíku na mlecím disku. Obvodová rychlost třídícího kola byla nastavena na konstantní hodnotu  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a rychlost mlecího disku se zvyšovala z  $80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  na  $110 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Zkouška se prováděla pro válcovité kolíky a hranolovité kolíky. Výsledkem je zjištění, že rychlost proudění kolem válcovitých kolíků se příliš neliší od okolní rychlosti vzduchu. U hranolovitých kolíků je zaznamenám výrazný rozdíl v rychlostech, je to dáno vlivem větších odporů při obtékání. Z experimentu vyplývá, že maximální rychlost okolního vzduchu je o 30 % nižší než rychlost mlecího disku. [7]

Také byl zkoumán vliv obvodové rychlosti třídícího kola na proudění vzduchu kolem mlecích kolíků. V tomto případě nebyly zjištěny žádné změny v rychlostech obtékání kolíků. [7]



Obr. 20 Výpočet proudění na třídícím kole [8]

Dále bylo zkoumáno proudění skrze třídící kolo viz Obr. 20 Proudění se dá rozdělit do tří oblastí proudění (I, II, III). První oblast (I) na vstupu do třídícího kola je vidět, že vzniká nucený vír. Je patrné, že s rostoucím poloměrem víru se zvětšuje tangenciální rychlost proudění. Tento druh víru je vhodný pro účely separace, protože s klesající obvodovou rychlostí se sníží tangenciální rychlost proudu na lopatce a tím se zmenší oblast víru. Zvýšením otáček třídícího kola dojde v některých místech k úplnému ucpání mezery mezi dvěma lopatkami vzniklým vírem viz Obr. 21 detail. To má za následek zvětšení rozsahu velikosti, kterou třídící kolo propustí. Skrz lopatku může materiál procházet pouze v oblasti, kde není vír, tudíž v malé oblasti, kudy prochází proud vzduchu. [7]



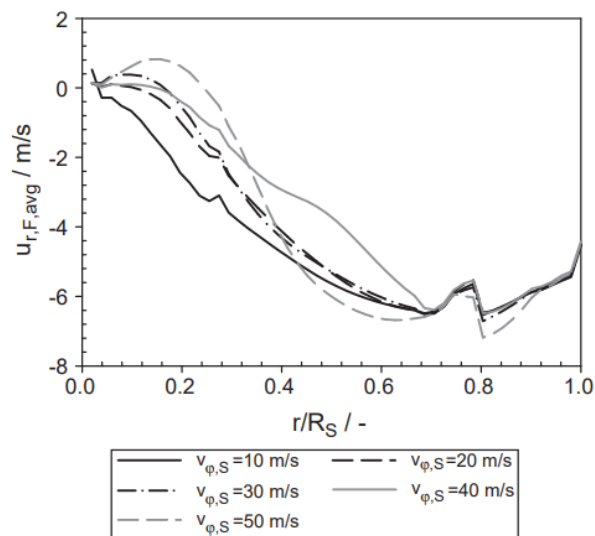
Obr. 21 Poměr velikosti prostupné plochy mezi lopatkami vůči ploše mezi lopatkami v závislosti na počtu lopatek po obvodu [7]

Oblast druhá (II) se vyznačuje nárůstem tangenciální rychlosti s klesajícím poloměrem. Jak je vidět z Obr. 20, při přechodu z oblasti první do oblasti druhé nastává pokles tangenciální rychlosti. To může mít za následek vyrovnání tažné síly od proudu vzduchu a odstředivé síly. V tomto případě se rozemletá částice zastaví a nemůže pokračovat dále do výstupu z třídiče (středu třídícího kola) a může setrávat na dané trajektorii nebo vypadne z třídícího kola. [7]

Oblast třetí (III) vykazuje vlastnosti vynuceného víru. S klesajícím poloměrem se snižuje tangenciální rychlost proudění. [7]

Pro zlepšení vlastnosti třídění je cílem minimalizovat vznikající víry na vstupu do třídícího kola. Víry vznikají, protože je velký úhlový rozdíl mezi lopatkami a nasávaným vzduchem. Minimalizaci vzniku virů zajistíme nakloněním lopatek směrem do nabírajícího proudu vzduchu (naklonění lopatek proti směru chodu hodinových ručiček). Také prodloužení lopatek blíže středu rotoru má vliv na zlepšení třídění a také zmenší tlakový

rozdíl. Na Obr. 21 je zobrazena závislost poměru prostupné plochy mezi lopatkami vůči ploše mezi lopatkami třídiče. V ideálním případě chceme dosáhnout poměru jedna, tedy kdy je aerodynamicky prostupná celá plocha mezi lopatkami. Jak je vidět, tak prostupnost v každé mezi lopatkové mezeře je jiná. To má za následek nehomogenního proudového pole vzduchu a nerovnoměrné třídění velikostí. Na Obr. 22 je zaznamenán průběh radiální rychlosti skrz třídicí kolo. Je zde vidět rapidní pokles rychlosti v oblasti 0.8, tato oblast odpovídá oblasti po průchodu lopatkami do třídiče.



Obr. 22 Průběh radiální rychlosti na třídicím kole [7]

## 2.4 Závěry plynoucí z přehledu problematiky

Z provedené rešerše je vidět, že nejčastěji se používá pět typů šrotovníků. Hlavní kritérium pro výběr správného typu šrotovníku byl požadavek zadavatele práce na třídící schopnost stroje v rozmezí 25 – 50  $\mu\text{m}$ . Ukázalo se, že tento požadavek splňuje pouze vzduchem tříděný šrotovník viz Obr. 2. Dále jsem se tedy zaměřoval pouze na vzduchem tříděný šrotovník, který bude později navrhován.

Byl proveden přehled nejvýznamnějších dodavatelů technologie šrotování, z kterého vyplývá, že stroje od různých výrobců pracují na stejném principu. Rozdíly jsou pouze v odlišné konstrukci. Jako je například poloha pohonů, základní rám a metodika otvírání stroje.

Z rešerše vybraných vědeckých publikací zabývajících se problematikou vzdušného třídění vyplývá, že nastavení parametrů, jako jsou otáčky třídícího kola, drtícího kola a rychlost vzduchu, který proudí skrze stroj, mají velký vliv na správnou funkci stroje. Zvyšování pouze otáček drtícího kola má za následek snížení velikosti výstupní suroviny. Stejný efekt má navyšování otáček třídícího kola. Nemalý vliv na funkci stroje má také proudové pole vzduchu uvnitř stroje, které unáší částice rozemleté suroviny a je potřebné pro realizaci třídění.

Proudové pole vznikající ve stroji ovlivňuje druh použitého mlecího prvku na mlecím disku (válcový kolík, kvádr). Při rotaci mlecího disku s kolíky zjišťujeme, že proudové pole kolem kolíků je skoro shodné s obvodovou rychlostí kolíku, tudíž je příznivější proti vznikaní nechtěných vírů. Naopak je tomu pro mlecí disk s kvádrovými drtícími kameny, které mají v okolí disku výrazný pokles rychlosti. To přispívá k vytváření nechtěných vírů.

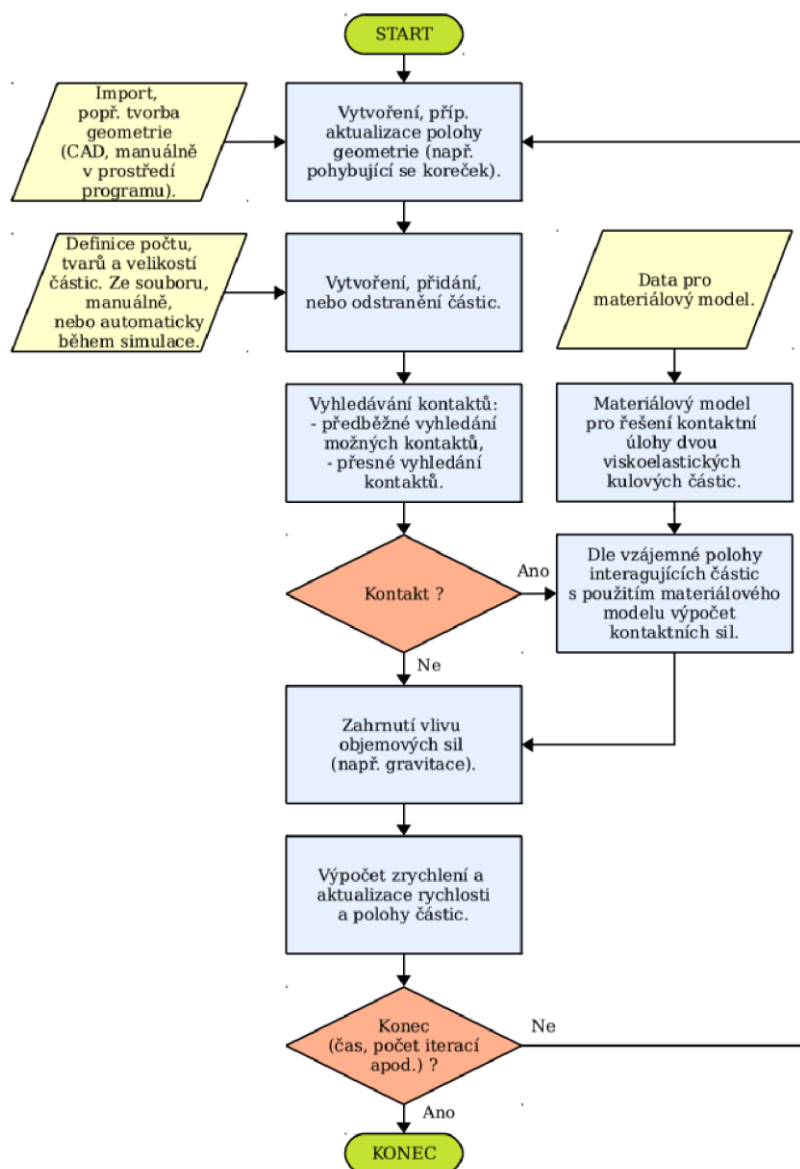
Proudění vzduchu je spojené i s třídícím kolem. Samotná konstrukce třídícího kola má vliv na funkci třídění. Při rotaci třídiče vzniká vír na straně jedné lopatky, tento vír je aerodynamicky neprostupný. Cílem je tento vír minimalizovat pro maximální prostupnost tříděného materiálu skrz třídič. Dosáhneme toho naklopením lopatek do směru nabíhajícího proudu vzduchu.

### 3 Metoda diskretních prvků (DEM)

V této kapitole se budu zabírat problematikou simulování sypkých hmot. Šrotovník pracuje se sypkým materiálem, který vůči sobě silově působí. Pro nasimulování takového chování musíme vybrat správnou numerickou metodu. Konvenční numerická metoda, jako je metoda konečných prvků (MKP), je mřížková metoda modelování, která není schopna zachytit interakci sypkých materiálů na mikro úrovni. Stejně je na tom CFD analýza proudění vzduchu, která postihuje pouze simulaci proudění vzduchu, ale nedokáže zahrnout interakce mezi částicemi. K tomu se využívá metoda diskretních prvků (DEM), která modeluje na mikromechanické úrovni a dokáže tak zachytit interakci jednotlivých částic vůči sobě. Při modelování sypkých materiálů se využívá Newtonových pohybových zákonů. [17][18]

### 3.1 Metoda diskretních prvků

Jedná se o numerickou metodu, která dokáže provádět výpočty pohybů a vzájemné interakce velkého množství částic. Metoda je založena na předpokladu, že deformace částic reálného materiálu je zanedbatelná v porovnání s deformací celé soustavy. Při výpočtu je pro každou iteraci (časový krok) řešena pohybová a kontaktní úloha.[18][17]



Obr. 23 Schéma výpočtu DEM metodou [17]

Na Obr. 23 je zobrazeno schéma výpočtu. První kroky výpočtu jsou věnovány importování geometrie do prostředí simulace a vytvoření částic společně s inicializací materiálového modelu. Následně je spuštěn výpočetní cyklus, který hledá interakce mezi



částicemi a vloženou geometrií. Pro všechny nalezené kontakty je řešena kontaktní úloha, jejímž výsledkem jsou kontaktní síly a momenty. Velikost těchto sil a momentů závisí na materiálovém modelu a geometrii kolizního kontaktu, který určuje velikost a způsob deformace jednotlivých částic při srážce.[18][17]

### 3.2 Přehled předních softwaru pro DEM simulace

Celosvětově na trhu působí několik softwarů pro simulování sypkých hmot jako jsou:

- Rocky DEM,
- Altair,
- Newton DEM.

Hlavní rozdíl v těchto programech je ve výpočtové jádru, dále pak rozhraní, ve kterém se provádí nastavení simulace a možnost přidat do simulace výstupy z jiné simulace například CFD analýzy.

Jako nejvhodnější software pro tuto práci jsem vyhodnotil software Rocky DEM, který spadá pod hlavičku značky Ansys. Volba byla provedena z důvodu snadného propojení všech simulací pomocí jedné platformy, robustnosti softwaru a dostupnosti podpory při řešení potíží.[18][19][20]

### 3.3 Rocky DEM

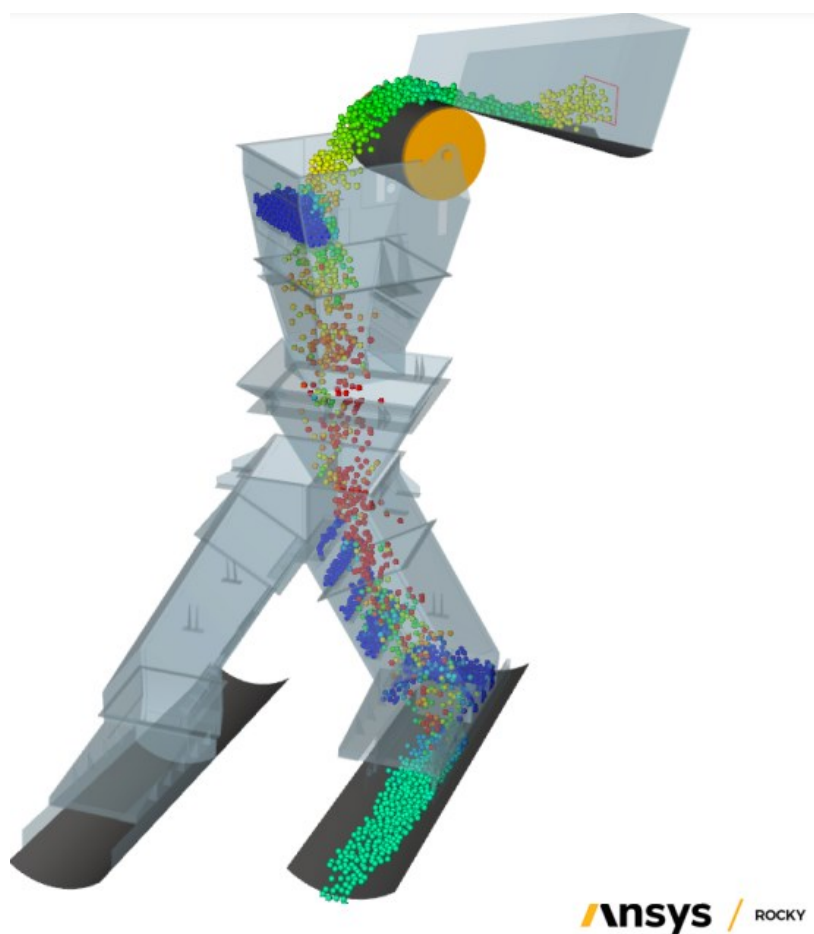
Jedná se o software, který modeluje pohyb sypkých částic za pomoci diskrétních prvků (DEM). Umožňuje nahlédnout do vnitřních procesů soustavy, a tím i zdokonalení simulovaného procesu. Software umožňuje simulovat různé tvary částic, stochastické rozložení jejich rozměrů a lze předepsat pohyb vlastního zařízení. K simulaci lze přiřadit pokročilý model porušení částic, adhezi a opotřebení zařízení.

Příklady použití:

- doprava sypkého materiálu v těžebním a zpracovatelském průmyslu viz Obr. 24,
- míchání a lisování více druhů sypkých látek,
- mletí, drcení, rozpad částic při zpracování cementu či kameniva,
- optimalizace farmaceutických procesů,
- opotřebení potrubí vlivem eroze částic,
- správné dimenzování zemědělských strojů,
- povlakování a sušení tablet,



- třídění materiálu různých tvarů a velikostí,
- pneumatická a hydraulická doprava [18]



Obr. 24 Simulace překládacího skluzu na sypké hmoty [18]

## 4 Návrh stroje

### Zadané parametry stroje

Od zadavatele této diplomové práce je zadán požadavek, aby stroj dokázal rozemlít surovinu na velikost  $25 - 50 \mu m$  a zároveň musí být schopen v tomto rozmezí třídít rozemletou surovinu. Navrhovaný stroj bude dimenzován na hmotnostní průtok suroviny  $\dot{m} = 500 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### Koncepce stroje

Na základě provedené rešerše byl proveden vlastní návrh šrotovníku viz Obr. 25. Stroj se skládá z několika hlavních celků, jako jsou:

- drticí disk,
- stator,
- třídící koš.

Ve spodní části stroje je připevněna ložisková jednotka, ve které je uložena hřídel společně s drticím diskem. Ložiskovou jednotku chrání plechový límec proti usazování prachu. Pod úrovní drticího disku je vytvořena připojovací příruba pro ventilátor, který vhání proud vzduchu do stroje. Na vnitřním obvodu spodní části stroje je usazen stator ve stejné rovině, jako je drticí disk. Na stator je vkládána přepážka oddělující drticí a třídící prostor. Z boku stroje je vytvořena příruba pro přívod vstupního materiálu.

V horní části stroje je v ložiskových jednotkách uložena hřídel společně s třídíčem. Ložisková jednotka je překryta límcem pro zlepšení obtékání vzduchu a ochranu jednotky. Z boku je vytvořena příruba pro odsávání zpracovaného materiálu. Na horní část stroje se pomocí šroubových spojů připojí držák třídícího motoru společně s motorem.

Stroj disponuje dvěma elektromotory, jeden dominantní pohání drticí disk přes řemenový převod. Druhý motor pohání pomocí zubové spojky třídící koš. Stroj bude schopen dosáhnout otáček drtiče  $n_D = 5\,000 \text{ min}^{-1}$  a otáček třídíče  $n_{mT} = 3\,000 \text{ min}^{-1}$ . Zvolení otáček vychází z provedené rešerše. Motory budou řízeny frekvenčními měniči pro možnost regulace otáček, jakožto proměnnými provozními parametry.

Pro usazení stroje je vytvořen rám, na kterém je jako celek uložena spodní a horní část stroje. Na rámu je také uložen elektromotor pohánějící drticí disk přes řemenový převod. Napínání řemenového převodu je realizováno posunutím motoru pomocí napínacího šroubu

umístěného na spodní části rámu. Pro snadné otvírání stroje je stroj vybaven plynovými vzpěrami.

Stroj pracuje na principu odstředivého drcení a třídění zpracovávané plodiny viz Obr. 25. Surovina určená ke zpracování je přiváděna na rotující drticí disk. Vlivem rotace je surovině udávána kinetická energie potřebná k rozdrčení. Drcení probíhá za pomoci samotného nárazu drticího kamenu do suroviny a následné tření o ozubený stator. Proud vzduchu jdoucí ze spodní příruby umístěné pod úrovní drticího disku prochází oblastí drcení, tedy mezerou mezi statorem a drticím diskem. Proud vzduchu při průchodu drticí oblastí strhává rozdrčenou surovinu a směřuje ji k třídícímu koši.

Třídíč pracuje na principu rovnováhy sil. Jedná se o tažnou sílu proudu vzduchu, která unáší částici rozemleté surovin, a o odstředivou sílu, která působí na částici. Velikost odstředivé síly je závislá na hmotnosti tudíž i na velikosti částice. V závislosti na velikosti poměru odstředivé síly a tažné síly proudu vzduchu mohou nastat následující situace:

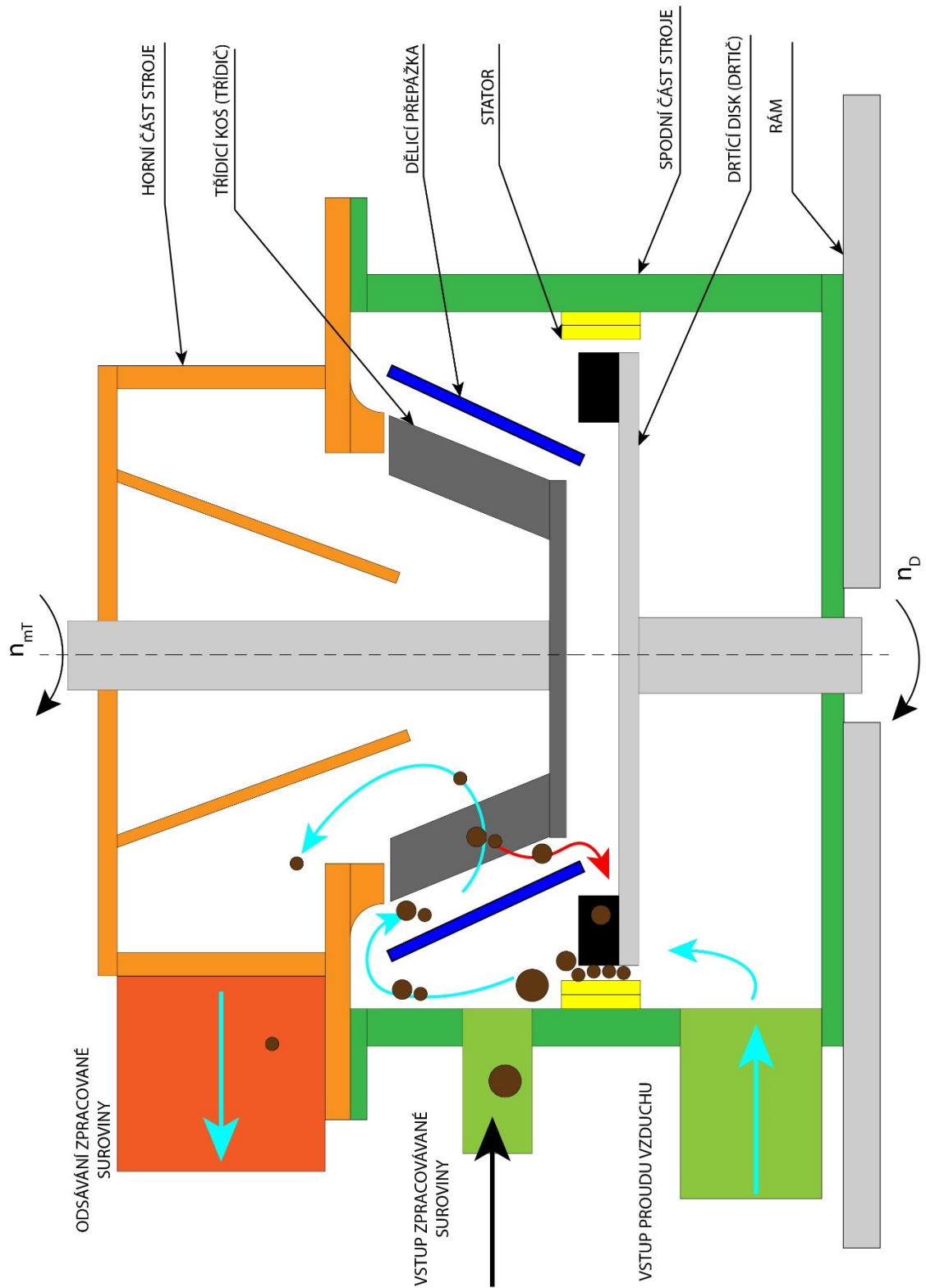
- a) tažná síla vzduchu je větší než odstředivá síla, částice projde třídíčem,
- b) tažná síla vzduchu je menší než odstředivá síla, částice neprojde třídíčem a je vhozena zpět na drticí disk.

### **Shrnutí nutných návrhových výpočtů**

Pro navrhovaný šrotovník budou provedeny následující návrhové výpočty:

- výpočet energetické náročnosti stroje,
- výpočet řemenového převodu,
- výpočet ložisek.

Na základě energetické bilance budou navrženy pohony třídícího koše a drticího disku. Ložiska určená pro třídící koš budou dimenzována na základě hmotnostního průtoku působícího na třídící koš. Ložiska určená pro drticí disk budou dimenzována na základě napínaví síly řemenového převodu.

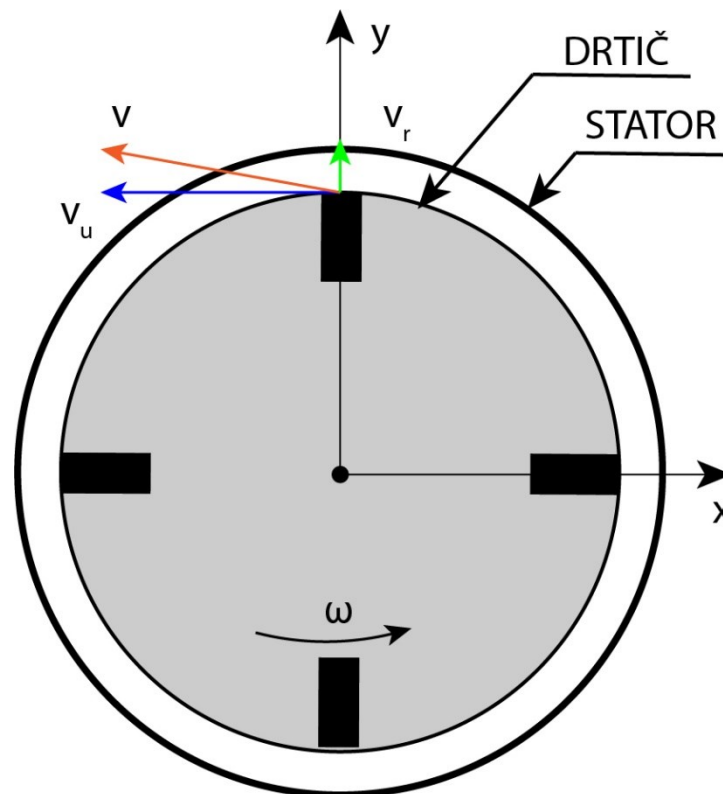


Obr. 25 Konceptní návrh šrotovníku

#### 4.1 Kinematická charakteristika pohybu šrotované hmoty

Pohyb šrotované hmoty bude řešen pro navrhovaný šrotovník, který funguje na principu odstředivého drcení a třídění hmoty. Vycházíme z předpokladu, že výlisky při přívodu na drticí disk napadají do středu disku. Zajímá nás, jakou rychlostí budou výlisky opouštět rotující drticí kameny.

Na Obr. 26 je znázorněno kinematické schéma drticího disku (schéma pro třídící koš je podobné). Výsledná obvodová rychlost  $v$  se skládá z unášivé  $v_u$  a relativní rychlosti  $v_r$ .



Obr. 26 Kinematické schéma-rychlosti po dílce kamenu

Pohyb šrotovaného materiálu vychází z teorie složených pohybů. Pohyb můžeme znázornit jako posuvný bod uložený na rotujícím prutu. Tento model platí pro materiál, který je v kontaktu s drticím kamenem. Odvození rovnic pro řešení obdobného matematického modelu je uvedeno v [26].

Odvozenou pohybovou rovnicí (4.1) řešíme jako funkci času. Rovnice byla rozdělena na homogenní a partikulární řešení. Obě rovnice byly odpovídajícím způsobem vyřešeny. Následně byla řešena Cauchyho úloha celkové pohybové rovnice a její časové derivace, pro kterou byly vypočteny neznámé  $C_1$  a  $C_2$ .

$$x(t) = C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + \frac{C}{k_2},$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{-2 \cdot \omega \cdot \mu \pm \sqrt{(2 \cdot \omega \cdot \mu)^2 - 4 \cdot (-\omega^2)}}{2}, \quad (4.1)$$

$$C = -g \cdot \mu, \quad A = r_1 - \frac{C}{k_2}, \quad C_1 = \frac{A \cdot \lambda_2 - v_1}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$C_2 = \frac{-A \cdot \lambda_1 + v_1}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

$$\dot{x}(t) = C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 t} \quad (4.2)$$

#### 4.1.1 Návrh drtiče

Pro návrh drtiče je zásadní znát dobu za jakou opustí šrotovaná hmota drticí kámen. Pro výpočet je nutné definovat počáteční podmínky. V čase  $t = 0$  s uvažujeme, že počáteční rychlost výlisku se rovná  $v_1 = 0 \frac{m}{s}$ . Také uvažujeme, že s touto rychlostí vstoupí výlisek na začátek kamenu  $r_1$ . Do (4.1) byly dosazeny následující zvolené hodnoty:

$$r_1 = 0,15 \text{ m}$$

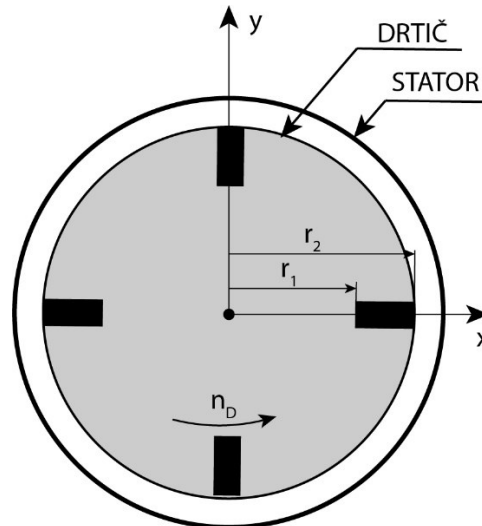
$$r_2 = 0,21 \text{ m}$$

$$\mu = 0,5 \text{ [-]}$$

$$n_D = 5 \text{ 000 min}^{-1}$$

Významný okamžik je tehdy, když výlisek opouští drticí kámen, tedy když  $x(t) = r_2$ . Po dosazení do pohybové rovnice dostaneme rovnici viz (4.3), díky které jsme schopni dopočítat čas, za který výlisek opustí drticí kámen.

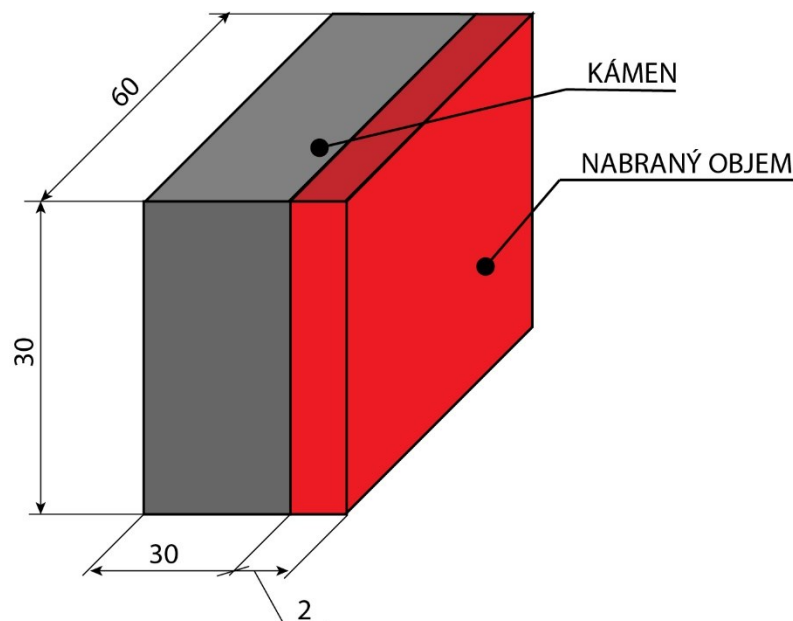
$$r_2 = C_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + \frac{C}{k_2} \quad (4.3)$$



Obr. 27 Definice potřebných geometrických poměrů drtiče pro výpočet rovnice (4.3)

Řešením Cauchyho úlohy za pomoci programu Matlab se dostáváme k času pohybu hmoty po kameni  $t_h = 0,006$  s. Tento výsledek je důležitý pro výpočet potřebného počtu kamenů na drtičím disku.

Pro výpočet počtu kamenů budeme uvažovat, že kámen při pohybu nabere materiál po celé své ploše a tloušťce dva milimetry viz Obr. 28. Nabere tedy objem  $V_n = 3\,600$  mm<sup>3</sup>.



Obr. 28 Nabíraný objem kamenem při rotaci

Na základě poskytnutého vzorku pokrutiny firmou Farmet a.s. byly změřeny rozměry sady vzorků. Následně byly vypočítány následující průměrné hodnoty. Průměrný objem výlisku  $V_v = 789,6$  mm<sup>3</sup> a průměrná hmotnost  $m_v = 0,028$  g. Na základě těchto dopočtených hodnot byla určena orientační hustota výlisků (4.4).

$$\rho_v = V_v \cdot m_v = 361,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (4.4)$$

Na základě dopočtených hodnot byl vypočítán hmotnostní průtok jedním kamenem.

$$\dot{m}_{1k} = \frac{V_n \cdot \rho_v}{t_h} = 781 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad (4.5)$$

Na základě požadavku zadavatele dimenzovat stroj na hmotnostní průtok  $\dot{m} = 500 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  je dopočítán potřebný počet kamenů.

$$i_k = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{1k}} = 0,64 [1] \quad (4.6)$$

Z rovnice (4.6) je patrné, že pro takto malý hmotnostní průtok strojem by teoreticky postačoval jeden kámen. Na základě provedené rešerše, vyvážení disku a případného navyšování hmotnostního průtoku volím minimální počet kamenů  $i_k = 4$ .



## 4.2 Energetická náročnost stroje

Energetická náročnost stroje se skládá ze čtyř hlavních skupin:

- energie potřebná k pohybu směsi,
- aerodynamický odpor rotujících částí,
- energie potřebná k rozběhu stroje do pracovního režimu,
- mechanické ztráty stroje,

Na základě prvních čtyř skupin byla provedena energetická bilance stroje, jelikož mají největší vliv na energetickou náročnost stroje.

### 4.2.1 Energie potřebná k pohybu směsi

Velká část přivedené energie je odebrána rotujícímu drtiči (třidiči) zrychlením směsi. Tato energie se ve směsi naakumuluje ve formě kinetické energie. Velká část této energie je využita k rozdrčení směsi pomocí nárazu drtícího kamenu. S tím je spojena přeměna energie z kinetické na deformační.

Ze znalosti hmotnostního průtoku strojem  $\dot{m} = 500 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  a rychlosti, jakou opouští směs drtící kameny, lze určit potřebný výkon k pokrytí této energetické ztráty (4.7).

$$P_{\text{urychlení}} = \frac{E_{k \text{ urychlení}}}{t} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_u^2 \quad (4.7)$$

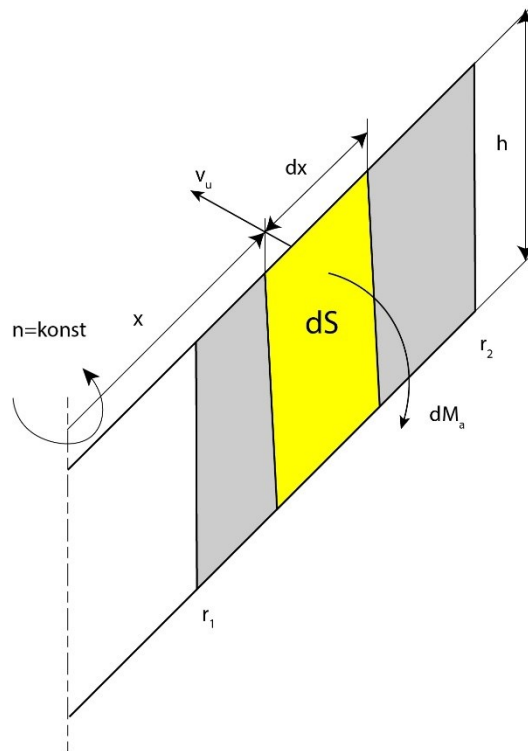
*Tab. 5 Potřebný výkon pro urychlení na požadovanou rychlost*

$P_{\text{urychlení DRTIČ}}$	1 210	[W]
$P_{\text{urychlení TŘIDIČ}}$	75	[W]

### 4.2.2 Aerodynamický odpor rotujících částí

Výpočet aerodynamického odporu byl proveden na základě Newtonova zákona (4.8).

$$F = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot S \cdot \rho \cdot v_u^2 \quad (4.8)$$



Obr. 29 Schéma odvození aerodynamického odporu

Působící odporová síla je funkcí souřadnice  $x$ , je to dáno lineárním zvětšováním rychlosti s rostoucím poloměrem. Proto byl odvozen upravený vztah, který je aplikovatelný na drtič (třídíč). Aerodynamický odpor vyjádříme ve formě krouticího momentu, který je nutno překonat při rotaci. Součinitel aerodynamického odporu pro kvádr je  $c_X = 1,05$ . [21]

$$\begin{aligned}
 \frac{dM_a}{n_k} &= dF \cdot x = \left( \frac{1}{2} \cdot c_X \cdot \rho \cdot v_u^2 \cdot dS \right) \cdot x \\
 &= \left[ \frac{1}{2} \cdot c_X \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot x \right)^2 \cdot h \cdot \rho \cdot dx \right] \cdot x
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Vyjádřením elementárního momentu jsme schopni dopočítat celkový moment působící na součást. Do rovnice zahrneme počet drtičích kamenů  $i_k = 4$ .

$$dM_a = \left[ \frac{1}{2} \cdot c_X \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2 \cdot h \cdot \rho \cdot x^3 \cdot dx \right] \cdot i_k \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned}
 M_a &= \left[ \frac{1}{2} \cdot c_X \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2 \cdot h \cdot \rho \cdot \int_{r_1}^{r_2} x^3 \right] \cdot i_k \\
 &= \left[ \frac{1}{2} \cdot c_X \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2 \cdot h \cdot \rho \cdot \left( \frac{r_2^4}{4} - \frac{r_1^4}{4} \right) \right] \cdot i_k
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Vynásobením momentu úhlovou rychlostí dostaneme potřebný výkon k překonání aerodynamických odporů (4.12).

$$P_{aero} = \omega \cdot M_a \quad (4.12)$$

*Tab. 6 Výkony potřebné pro překonání aerodynamického odporu*

$P_{aero\ DRTIČ}$	8 593	[W]
$P_{aero\ TŘÍDIČ}$	691	[W]

### 4.2.3 Energie potřebná k rozběhu stroje do pracovního režimu

Značnou část energie také vyžaduje samotné rozpořívování rotačních hmot stroje. K tomuto účelu byly zjištěny statické momenty setrvačnosti drtiče a třídiče a společně s definovanou dobou rozběhu  $t = 10$  s bylo možné vypočítat potřebný výkon pro naběhnutí stroje do pracovního režimu.

*Tab. 7 Momenty setrvačnosti drtiče a třídiče*

$J_{DRTIČ}$	0,196998	[ $kg \cdot m^{-2}$ ]
$J_{TŘÍDIČ}$	0,014304	[ $kg \cdot m^{-2}$ ]

Na základě úhlové rychlosti a doby rozběhu bylo dopočítáno potřebné úhlové zrychlení součásti.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (4.13)$$

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (4.14)$$

Po dosazení do (4.15) byl vypočítán potřebný výkon pro naběhnutí stroje do pracovního režimu.

$$P_{rozběh} = J \cdot \alpha \cdot \omega \quad (4.15)$$

*Tab. 8 Výkon potřebný pro naběhnutí stroje do pracovního režimu*

$P_{\text{rozběh DRTIČ}}$	5 409	[W]
$P_{\text{rozběh TŘÍDIČ}}$	141	[W]

#### 4.2.4 Mechanické ztráty stroje

Ve stroji dochází k výkonovým ztrátám. Skládají se primárně z účinnosti řemenového převodu, třením těsnicích kroužků ložisek a třením hřídelových těsnění o rotující hřídel. Účinnost řemenového převodu je určena na  $\eta_{\text{ř}} = 0,95$ . [22]

### 4.3 Celková energetická náročnost stroje

Celkovou náročnost stroje lze vyjádřit jako součet všech potřebných výkonů pro funkci stroje (4.16). Třidič není určen k dalšímu drcení směsi, ale pouze k jejímu třídění.

$$P_t = P_{aero} + P_{urychlení} + P_{rozběh} \quad (4.16)$$

Dle (4.17) byla vypočítána energetická náročnost stroje se zahrnutím účinnosti řemenového převodu pro motor drtiče.

$$P_{tDRTIČ EF} = \frac{P_{tDRTIČ}}{\eta_{\text{ř}}} = \frac{14\,812}{0,95} = 15\,591\,W \quad (4.17)$$

*Tab. 9 Celková výkonová náročnost drtiče a třidiče*

$P_{tDRTIČ EF}$	15 591	[W]
$P_t \text{ TŘÍDIČ}$	907	[W]

#### 4.4 Návrh motorů šrotovníku

Motory byly zvoleny dle Tab. 9. Pohon drtiče je realizován asynchronním třífázovým dvoupólovým motorem společně s řemenovým převodem. Pohon třídiče je realizován též za pomoci asynchronního třífázového dvoupólového motoru, který je přímo spojen s hřídelí třídiče pomocí zubové spojky. Zvolené motory jsou od značky Siemens a mají následující parametry:

*Tab. 10 Parametry zvolených motorů značky Siemens*

	Typ	Nominální otáčky $n_m [min^{-1}]$	Výkon $P_m [kW]$	Krouticí moment $M_m [Nm]$
Drtič	1AV2164A	2 955	18,5	60
Třídič	0AV3090A	2 900	1,5	4,9

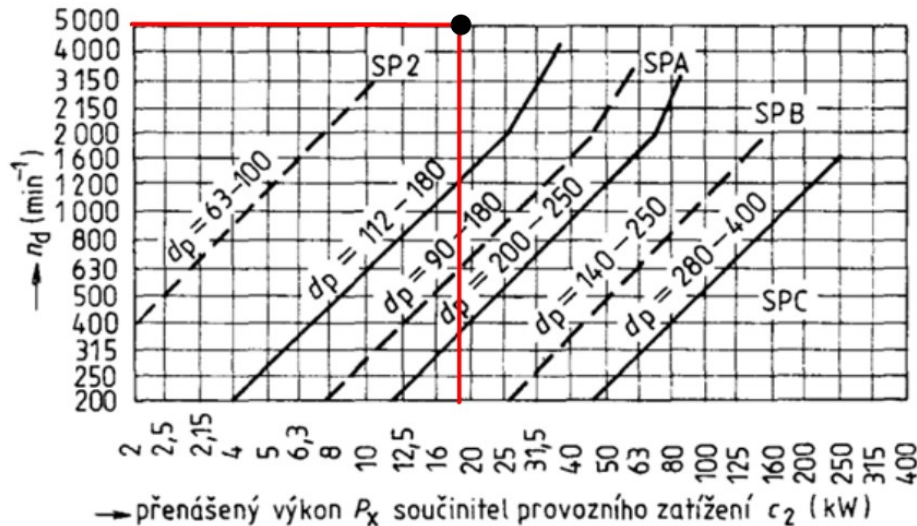
## 4.5 Návrh řemenového převodu drtiče

Řemenový převod spojuje výstupní hřídel motoru a hřídel, na které je připevněn drtič.

Vstupní parametry návrhu tohoto převodu jsou následující:

- otáčky motoru  $n_{mD} = 2\,955 \text{ min}^{-1}$ ,
- otáčky drtiče  $n_D = 5\,000 \text{ min}^{-1}$ .

Jako první byl určen profil řemenu na základě přenášeného výkonu dle Obr. 30.



Obr. 30 Graf volby druhu řemenu [23]

Na základě Obr. 30 byl zvolen vhodný profil řemenu SPZ. Dále byl určen potřebný převodový poměr.

$$i_{1,2} = \frac{n_{mD}}{n_D} = \frac{2\,955}{5\,000} = 0,591 \quad (4.18)$$

Na základě průměru hřídele drtiče volím průměr hnací řemenice  $D_{m1} = 160 \text{ mm}$ . dle katalogu TYMA.

Pomocí průměru hnací řemenice a převodového poměru byl dopočítán průměr hnané řemenice.

$$D_{mv2} = i_{1,2} \cdot D_{m1} = 0,591 \cdot 160 = 94,5 \text{ mm} \quad (4.19)$$

Dle výpočtu (4.19) volím nejbližší katalogový průměr řemenice  $D_{m2} = 95 \text{ mm}$ . Dále byla vypočítána osová vzdálenost řemenic dle (4.19).

$$0,7 \cdot (D_{m1} + D_{m2}) \leq a \leq 2 \cdot (D_{m1} + D_{m2}) \quad (4.20)$$

$$0,7 \cdot (160 + 95) \leq a \leq 2 \cdot (160 + 95)$$

$$178,5 \leq a \leq 510$$

$$\text{volím } a = 510 \text{ mm}$$

Následuje výpočet délky řemenu dle (4.21).

$$\begin{aligned} L_w &= 2 \cdot a + \frac{\pi}{2} (D_{m1} + D_{m2}) + \frac{(D_{m1} + D_{m2})^2}{4 \cdot a} \\ &= 2 \cdot 510 + \frac{\pi}{2} (160 + 95) + \frac{(160 + 95)^2}{4 \cdot 510} = 1422,6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.21)$$

Byly vypočítány koeficienty úhlu opásání  $c_1$  (4.23), provozu  $c_2$ . a délky řemenu  $c_3$ . Z katalogu pro návrh řemenových převodů od firmy Continental byl z tabulky odečten úhel opásání malé řemenice na základě (4.22). [24]

$$\frac{D_{m1} - D_{m2}}{a} = \frac{160 - 95}{510} = 0,12 \text{ [1]}$$

$$\beta \text{ dle Tab. 11} = 174^\circ$$

Tab. 11 Součinitel úhlu opásání [24] (4.22)

$\frac{d_{b1} - d_{b2}}{a}$	Arc of contact $\beta$ ° (degrees)	Arc of contact factor $c_1$
0	180	1.00
0.05	177	0.99
0.10	174	0.99
0.15	171	0.98

$$c_1 = \frac{1}{4} \left[ 1 - 5 \left( -\frac{\beta}{180^\circ} \right) \right] = \frac{1}{4} \left[ 1 - 5 \left( -\frac{174^\circ}{180^\circ} \right) \right] = 0,99 \quad (4.23)$$

Koeficient provozu  $c_2$  byl zvolen pro extra těžké prostředí pro maximálně desetihodinový provoz. Do této kategorie spadají mlýny na výlisky semen olejnin. Volba  $c_2 = 1,3$ . Koeficient délky řemenu  $c_3$  byl zvolen pro klínový řemen SPZ  $c_3 = 0,98$ .

Dále byl vypočítán potřebný počet řemenů pro efektivní přenos výkonu dle (4.24). Bylo nutné dle tabulky výrobce určit pro otáčky motoru  $n_{mD} = 2\,995 \text{ min}^{-1}$  a průměru řemenice  $D_{m1} = 160 \text{ mm}$  výkon přenášený jedním řemenem  $P_r = 8,7 \text{ kW}$ .

$$z = \frac{P_m \cdot c_2}{P_r \cdot c_1 \cdot c_3} = \frac{18,5 \cdot 1,3}{8,7 \cdot 0,99 \cdot 0,98} = 2,83 \quad (4.24)$$

*volím 3 řemeny*

Následovalo dopočítání obvodové rychlosti řemenu dle (4.25).

$$v = \frac{\pi \cdot D_{m1} \cdot n_{mD}}{60 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 160 \cdot 2\,995}{60 \cdot 10^3} = 24,75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.25)$$

Dále byla dopočítána obvodová síla v řemenu dle (4.26) a potřebná napínací síla dle (4.27).

$$F_{\check{r}} = \frac{102 \cdot P_m \cdot 9,81}{v} = \frac{102 \cdot 18,5 \cdot 9,81}{24,75} = 748 \text{ N} \quad (4.26)$$

$$F_N = 2 \cdot F = 2 \cdot 748 = 1\,495 \text{ N} \quad (4.27)$$

V Tab. 12 je udán souhrn zvolených součástí dle výše uvedených výpočtů.

*Tab. 12 Tabulka zvolených dílů řemenového převodu*

	Typ	Kusů [1]
Hnací řemenice	SPZ 160-03 STAND	1
Hnaná řemenice	SPZ 95-03 STAND	1
Klínový řemen	SPZ-L <sub>w</sub> =1 420	3



## 4.6 Návrh ložisek třídiče

Pro návrh ložisek bylo vycházeno z hmotnostního průtoku materiálu strojem a vlastní hmotnosti hřídele a třídiče ( $G_h$ ). V reálném provozu je třídič rovnoměrně zatěžován po celém obvodu, pouze pro kontrolu ložisek předpokládám nejméně příznivou variantu zatížení. Jedná se o nerovnoměrné zatížení třídiče, a to jen z jedné strany. Na výpočet bylo nahlíženo z energetického hlediska.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_u^2 \quad (4.28)$$

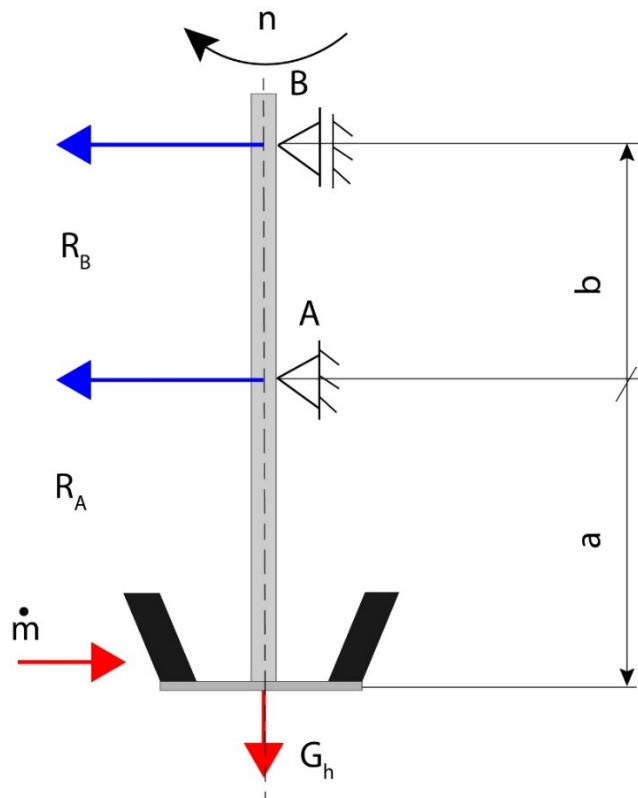
$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_u^2 \quad (4.29)$$

$$P = F_m \cdot v_u \quad (4.30)$$

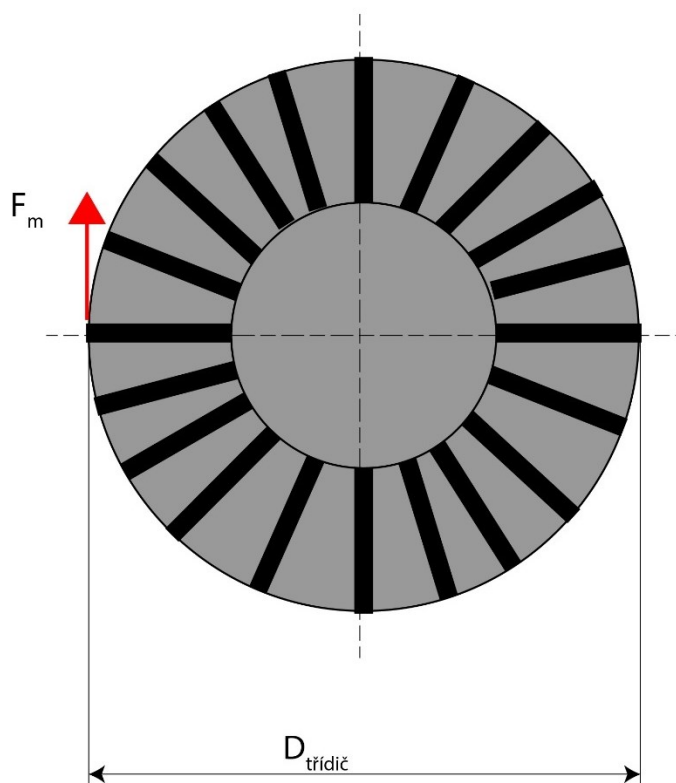
$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_u^2 = F_m \cdot v_u$$

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot \pi \cdot D_{\text{třídíč}} \cdot \frac{n_{mD}}{60} = 554,4 \text{ N} \quad (4.31)$$

Dle Obr. 31 byly dopočítány reakce na hřídeli, které jsou přenášeny do ložisek.



Obr. 31 Schéma zatížení hřídele třídiče



Obr. 32 Schéma zatížení hřídele třídiče pohled ze spodu na třídič

Tab. 13 Zatěžovací síly působící na hřídel třídiče

$F_m$	554,4	[N]
$G_h$	81	[N]

Reakce byly dopočítány dle silové a momentové rovnováhy.

$$\sum F_{iy} = 0 \quad (4.32)$$

$$-F_m + R_a + R_b = 0 \quad (4.33)$$

$$\sum M_{iA} = 0 \quad (4.34)$$

$$F_m \cdot a + R_b \cdot b = 0 \quad (4.35)$$

$$R_b = -\frac{F_m \cdot a}{b} = -\frac{554,4 \cdot 165}{100} = -914 \text{ N} \quad (4.36)$$

$$R_a = F_m - R_b = 554,4 - (-914) = 1468,4 \text{ N} \quad (4.37)$$

Pro bod B bylo zvoleno dvouřadé kosoúhlé kuličkové ložisko 3207 A a pro bod A bylo zvoleno radiální kuličkové ložisko 208. Jejich detailní výpočet bude uveden v následujících kapitolách.

#### 4.6.1 Návrh dvouřadého kosoúhlého kuličkového ložiska 3207 A

Návrh velikosti ložiska byl proveden dle katalogu výrobce SKF [16]. Jako první bylo vypočítáno minimální doporučené zatížení. Z katalogu byly odečteny požadované údaje viz Tab. 14.

Tab. 14 Data pro výpočet ložiska 3207 A [16]

$k_r$	0,06	[1]
$v$	96	$[mm^2 \cdot s^{-1}]$
$d$	35	$[mm]$
$D$	72	$[mm]$
$Y$	0,78	[1]
$L_{10h}$	20 000	$[h]$
$C$	40 500	$[N]$

$$\begin{aligned} F_{B \min} &= k_r \cdot \left(\frac{v \cdot n_{mT}}{1\,000}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{d_m}{100}\right)^2 \\ &= 0,06 \cdot \left(\frac{96 \cdot 2\,900}{1\,000}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{53,5}{100}\right)^2 \\ &= 0,74 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$d_m = 0,5 \cdot (d + D) = 0,5 \cdot (35 + 72) = 53,5 \text{ mm} \quad (4.39)$$

Dle poměru axiálního a radiálního zatížení byl zvolen výpočet ekvivalentního dynamického zatížení.

$$\frac{F_{aB}}{F_{rB}} = \frac{G_h}{|R_B|} = \frac{81}{914} = 0,088 \leq 0,8 \quad (4.40)$$

$$P_B = F_{rB} + Y \cdot F_{aB} = 914 + 0,78 \cdot 81 = 977 \text{ N} \quad (4.41)$$

Bylo vypočítána základní dynamická únosnost pro 20 000 hod.

$$\begin{aligned} C_{10B} &= P_B \cdot \sqrt[3]{\frac{L_{10h} \cdot n_{mT} \cdot 60}{10^6}} \\ &= 977 \cdot \sqrt[3]{\frac{20\,000 \cdot 2\,900 \cdot 60}{10^6}} \\ &= 14\,805 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.42)$$

Z porovnání vypočítané minimální požadované dynamické únosnosti s dynamickou únosností ložiska vyplývá, že ložisko splňuje požadavky na provoz.

$$\begin{aligned} C_{10B} &\leq C \\ 14\,805 \text{ N} &\leq 40\,500 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.43)$$

#### 4.6.2 Návrh radiálního kuličkového ložiska 208

Návrh velikosti ložiska byl proveden dle katalogu výrobce SKF. Jako první bylo vypočítáno minimální doporučené zatížení. Z katalogu byly odečteny požadované údaje viz Tab. 15.

Tab. 15 Data pro výpočet ložiska 208[16]

$k_r$	0,06	[1]
$\nu$	96	$[mm^2 \cdot s^{-1}]$
$d$	40	$[mm]$
$D$	80	$[mm]$
$L_{10h}$	20 000	$[h]$
$C$	33 600	$[N]$

$$\begin{aligned}
 F_{A \min} &= k_r \cdot \left( \frac{\nu \cdot n_{mT}}{1\,000} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{d_m}{100} \right)^2 \\
 &= 0,06 \cdot \left( \frac{96 \cdot 2\,900}{1\,000} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{53,5}{100} \right)^2 \\
 &= 0,74 \text{ kN}
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

$$d_m = 0,5 \cdot (d + D) = 0,5 \cdot (40 + 80) = 60 \text{ mm} \tag{4.45}$$

Byl proveden výpočet ekvivalentního dynamického zatížení.

$$P_A = F_{rA} = R_A = 1\,468 \text{ N} \tag{4.46}$$

Bylo vypočítána základní dynamická únosnost pro 20 000 hod.

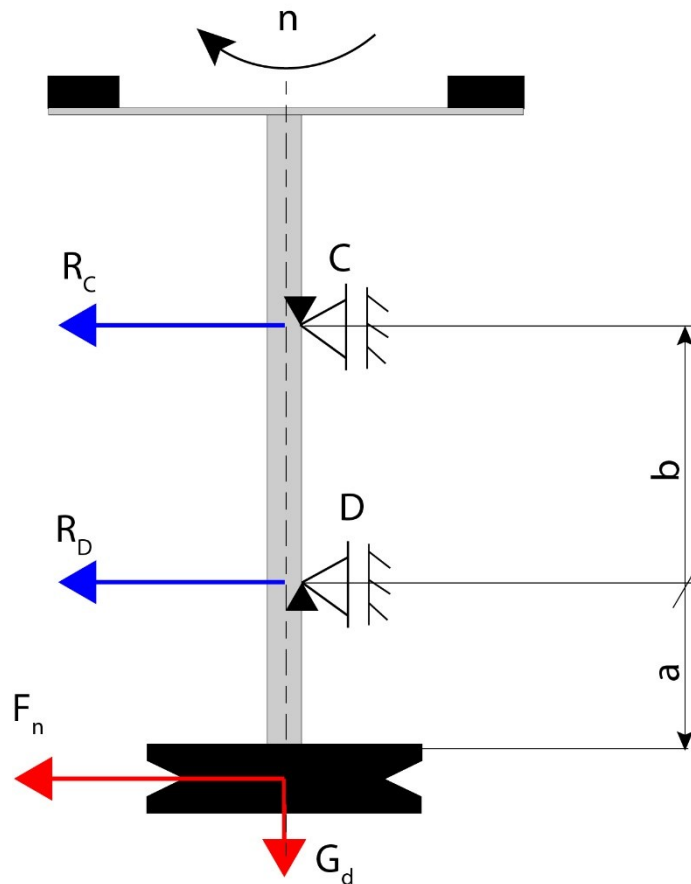
$$\begin{aligned}
 C_{10A} &= P_A \cdot \sqrt[3]{\frac{L_{10h} \cdot n_{mT} \cdot 60}{10^6}} \\
 &= 1\,468 \cdot \sqrt[3]{\frac{20\,000 \cdot 2\,900 \cdot 60}{10^6}} \\
 &= 22\,246 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{4.47}$$

Z porovnání vypočítané minimální požadované dynamické únosnosti s dynamickou únosností ložiska vyplývá, že ložisko splňuje požadavky na provoz.

$$C_{10A} \leq C$$
$$22\,246\, N \leq 33\,600\, N \quad (4.48)$$

#### 4.7 Návrh ložisek drtiče

Pro návrh ložisek bylo vycházeno z napínací síly řemenů a vlastní hmotnosti hřídele a drtiče ( $G_d$ ). Dle Obr. 33 byly dopočítány reakce na hřídeli, které jsou přenášeny do ložisek.



Obr. 33 Schéma zatížení hřídele drtiče

Tab. 16 Zatěžovací síly působící na hřídel drtiče

$F_n$	1 494	[N]
$G_n$	216	[N]

Reakce byly dopočítány dle silové a momentové rovnováhy.

$$\sum F_{iy} = 0 \quad (4.49)$$

$$F_n + R_c + R_d = 0 \quad (4.50)$$

$$\sum M_{iD} = 0 \quad (4.51)$$

$$-F_n \cdot d + R_c \cdot c = 0 \quad (4.52)$$

$$R_c = \frac{F_n \cdot d}{c} = \frac{1\,495 \cdot 65}{120} = 810 \text{ N} \quad (4.53)$$

$$R_d = -F_n - R_b = -1\,494 - 810 = -2\,304 \text{ N} \quad (4.54)$$

Pro bod C a D byla zvolena kuželíková ložiska 30208. Volba těchto ložisek vycházela ze zatížení a velikosti hřídele.

#### 4.7.1 Návrh kuželíkového ložiska 30208

Návrh velikosti ložiska byl proveden dle katalogu výrobce SKF. Jako první bylo vypočítáno minimální doporučené zatížení. Z katalogu byly odečteny požadované údaje.

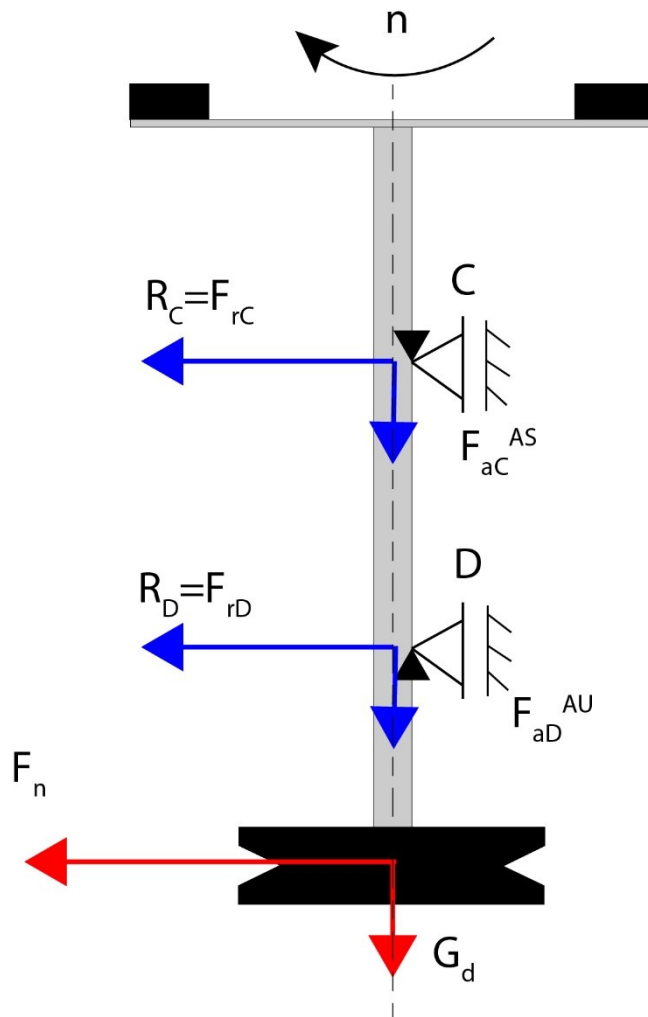
Tab. 17 Data pro výpočet ložiska 30208 [16]

$Y$	1,6	[1]
$D$	80	[mm]
$L_{10h}$	20 000	[h]
$C$	75 800	[N]

$$F_{min} = 0,02 \cdot C = 0,02 \cdot 75\,800 = 1\,516 \text{ N} \quad (4.55)$$

Bylo určeno axiálně uvolněné (bod D) a sevřené (bod C) ložisko podle Obr. 34 a byly vypočítány axiální síly působící na ložiska.





Obr. 34 Síly působící na kuželiková ložiska

$$F_{aD}^{AU} = \frac{F_{rD}}{2 \cdot Y} = \frac{|R_D|}{2 \cdot Y} = \frac{2\,304}{2 \cdot 1,6} = 720 \text{ N} \quad (4.56)$$

$$F_{aC}^{AS} = F_{aD}^{AU} + G_d = 720 + 216 = 936 \text{ N} \quad (4.57)$$

Dle poměru axiální síly na jednotlivá ložiska byl určen způsob výpočtu ekvivalentního dynamického zatížení ložiska.

$$\frac{F_{aD}^{AU}}{F_{rD}} \leq e$$

$$\frac{720}{2\,304} \leq 0,37 \quad (4.58)$$

$$0,31 \leq 0,37$$

$$P_D = F_{rD} + Y \cdot F_{aD}^{AU} = 2\,304 + 1,6 \cdot 720 = 3\,456 \text{ N} \quad (4.59)$$

$$\frac{F_{ac}^{AS}}{F_{rc}} \geq e$$

$$\frac{936}{810} \geq 0,37 \quad (4.60)$$

$$1,15 \geq 0,37$$

$$P_C = 0,67 \cdot F_{rc} + Y \cdot F_{ac}^{AS} = 0,67 \cdot 810 + 1,6 \cdot 936$$

$$= 2\,040\,N \quad (4.61)$$

Byla vypočítána základní dynamická únosnost pro 20 000 hod.

$$C_{10D} = P_D \cdot \sqrt[10]{\frac{L_{10h} \cdot n_{mD} \cdot 60}{10^6}}$$

$$= 3\,456 \cdot \sqrt[10]{\frac{20\,000 \cdot 5\,000 \cdot 60}{10^6}} \quad (4.62)$$

$$= 46\,992\,N$$

$$C_{10C} = P_C \cdot \sqrt[10]{\frac{L_{10h} \cdot n_{mD} \cdot 60}{10^6}}$$

$$= 2\,040 \cdot \sqrt[10]{\frac{20\,000 \cdot 5\,000 \cdot 60}{10^6}} \quad (4.63)$$

$$= 27\,738\,N$$

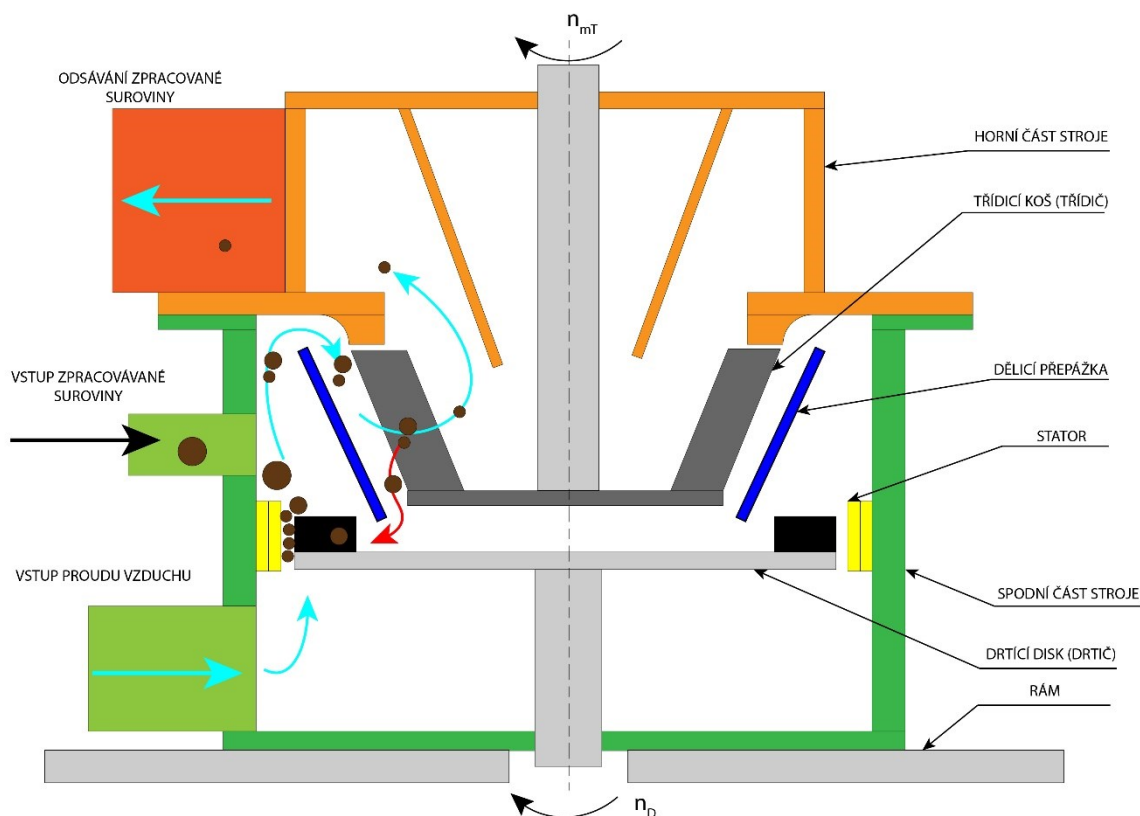
Z porovnání vypočítaných minimálních požadovaných dynamických únosností s dynamickou únosností ložiska vyplývá, že ložiska splňují požadavky na provoz.

$$(C_{10D}; C_{10C}) \leq C$$

$$(46\,992\,N; 27\,738\,N) \leq 75\,800\,N \quad (4.64)$$

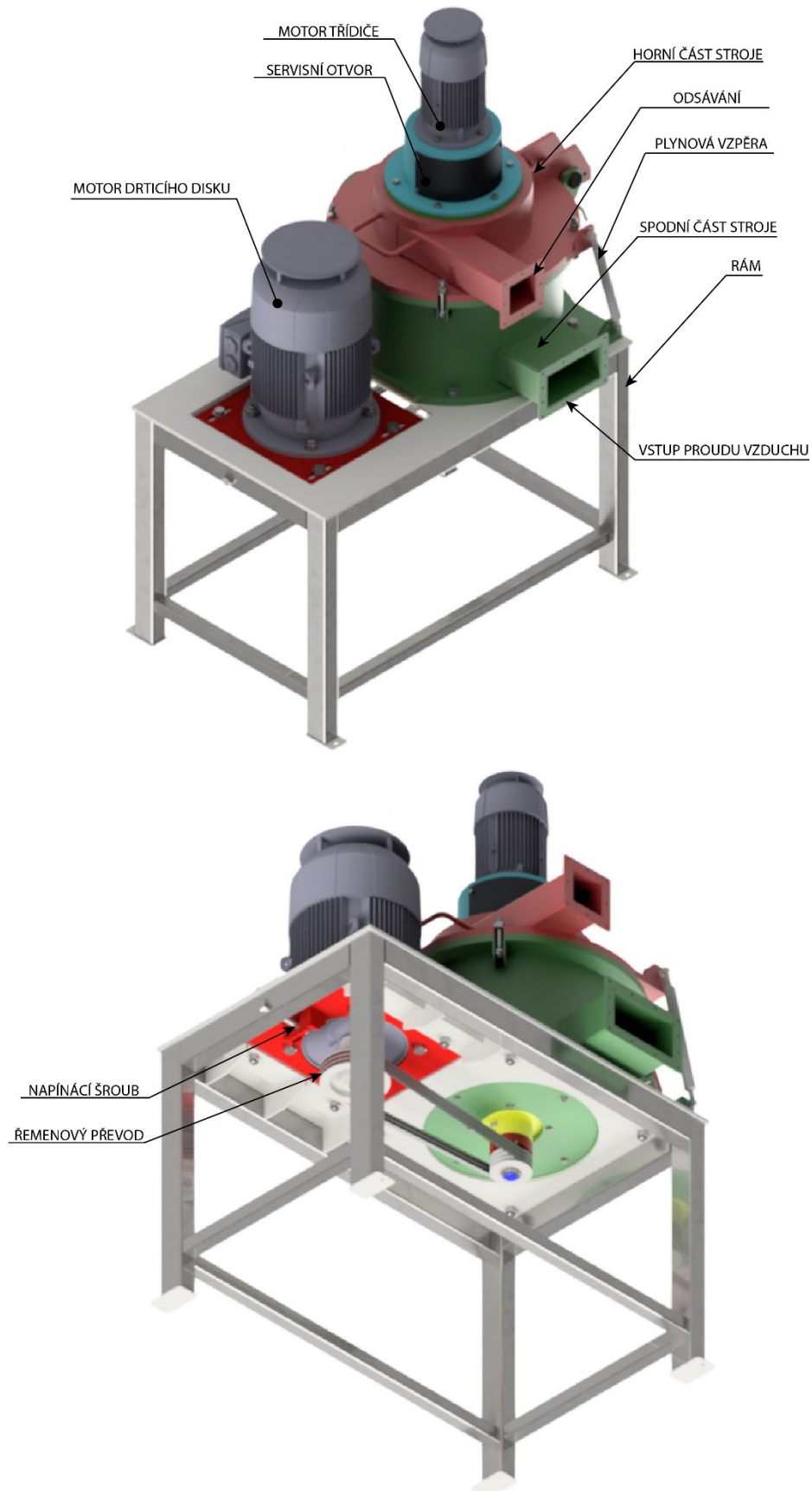
## 4.8 Popis konstrukce stroje

Konstrukce je navržena z velké části z plechových dílců určených ke svaření. Materiál použitý pro výrobu stroje je ořezavzdorný plech Hardox 400. Tento materiál je použit tam, kde dochází ke kontaktu s abrazivním zpracovávaným materiálem. Materiál je svařitelný a disponuje mezí kluzu  $Re=1\ 100$  MPa. Konstrukce je rozdělena na několik svařenců vytvořených za použití technologie svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře. Svařence jsou následně dle potřeby obrobny. Svařence jsou osazeny potřebnými komponenty, jako jsou například ložiska a hřídelová těsnění. Následně jsou sešroubovány do finální podoby dle návrhu. Na stroji jsou použity šrouby pevnostní třídy 8.8, které disponují následujícími mechanickými vlastnostmi, mez kluzu  $Re = 640$  MPa a mez v tahu  $Rm = 800$  MPa.

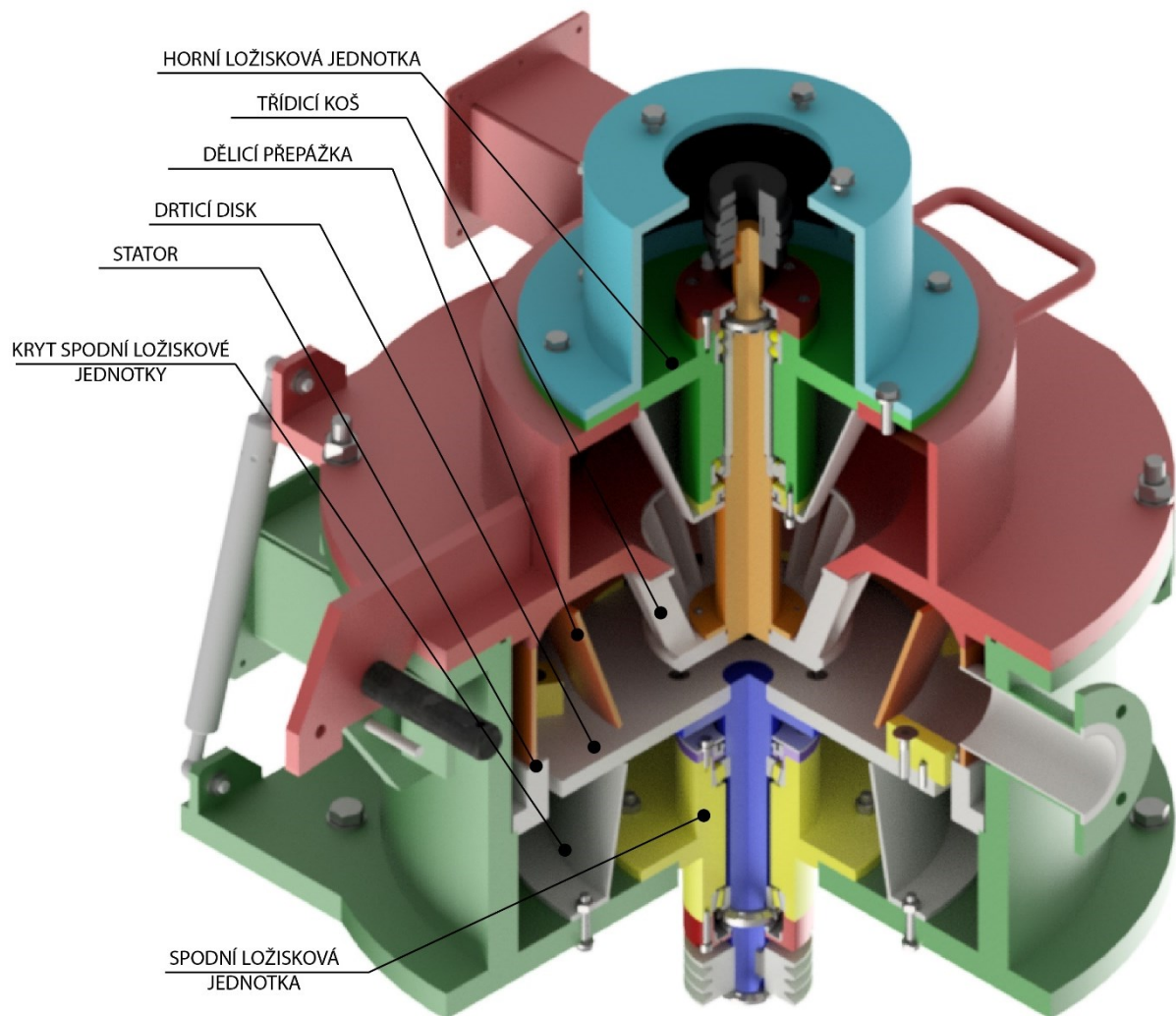


Obr. 35 Koncepční návrh šrotovníku

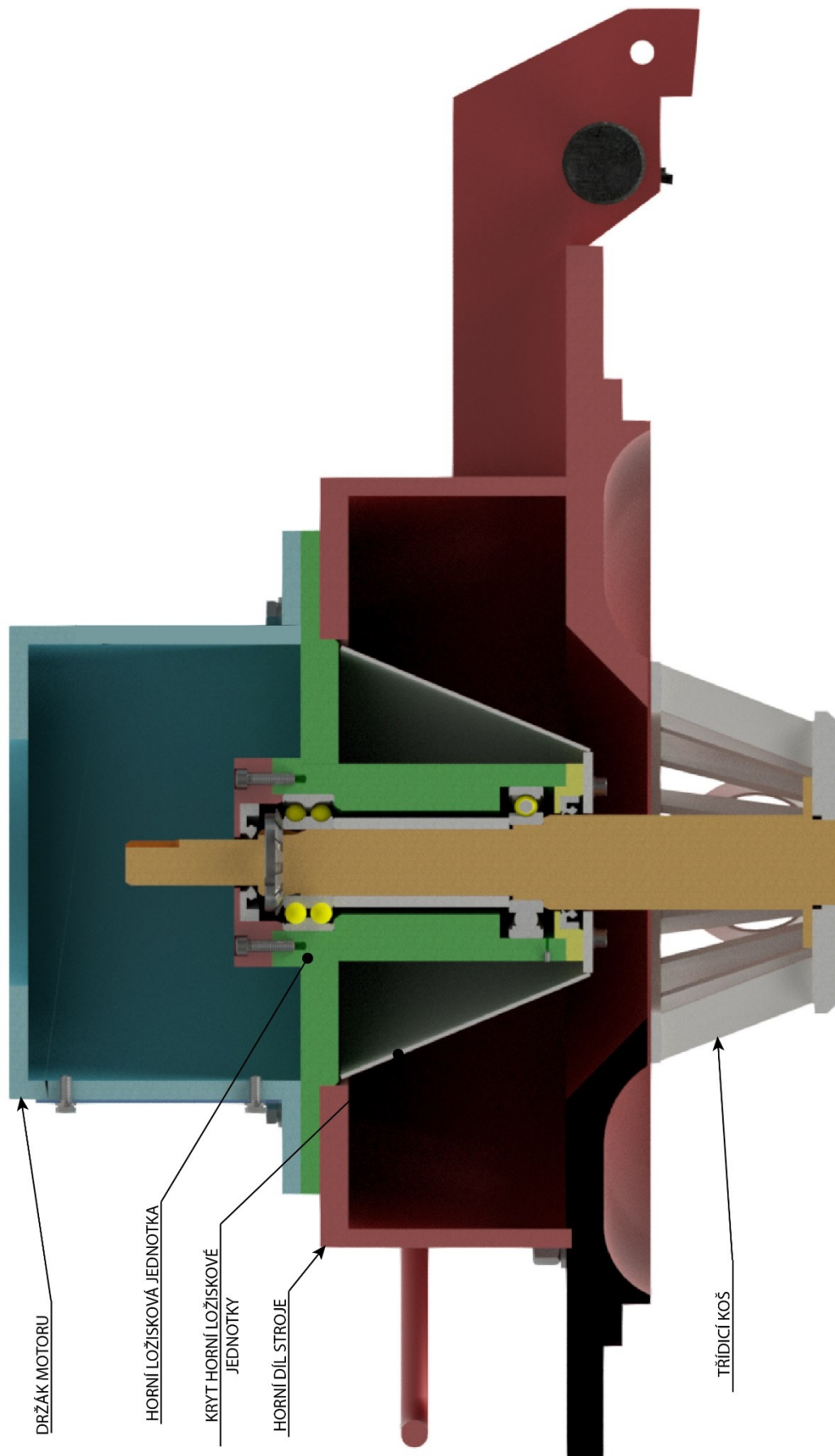
Na Obr. 36 je vyobrazena celková sestava stroje, kde je vidět napínání řemenového převodu pomocí metrického šroubu a matice. Dále pak na Obr. 38 a Obr. 39 je detailněji vyobrazeno osazení horní a spodní části stroje.



Obr. 36 Iso pohledy šrotovníku

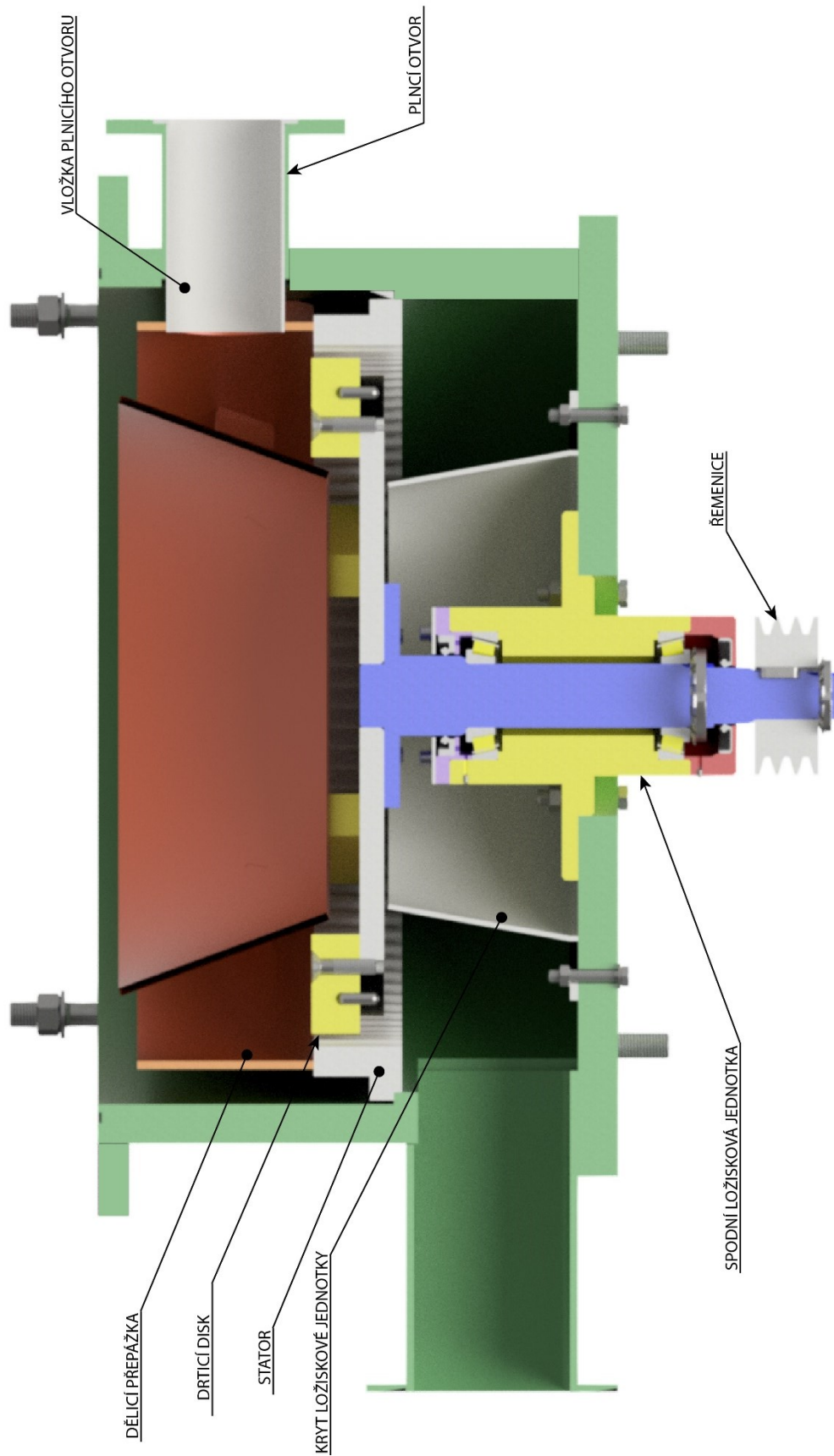


Obr. 37 Řez šrotovníkem



Obr. 38 Osazení horní části stroje



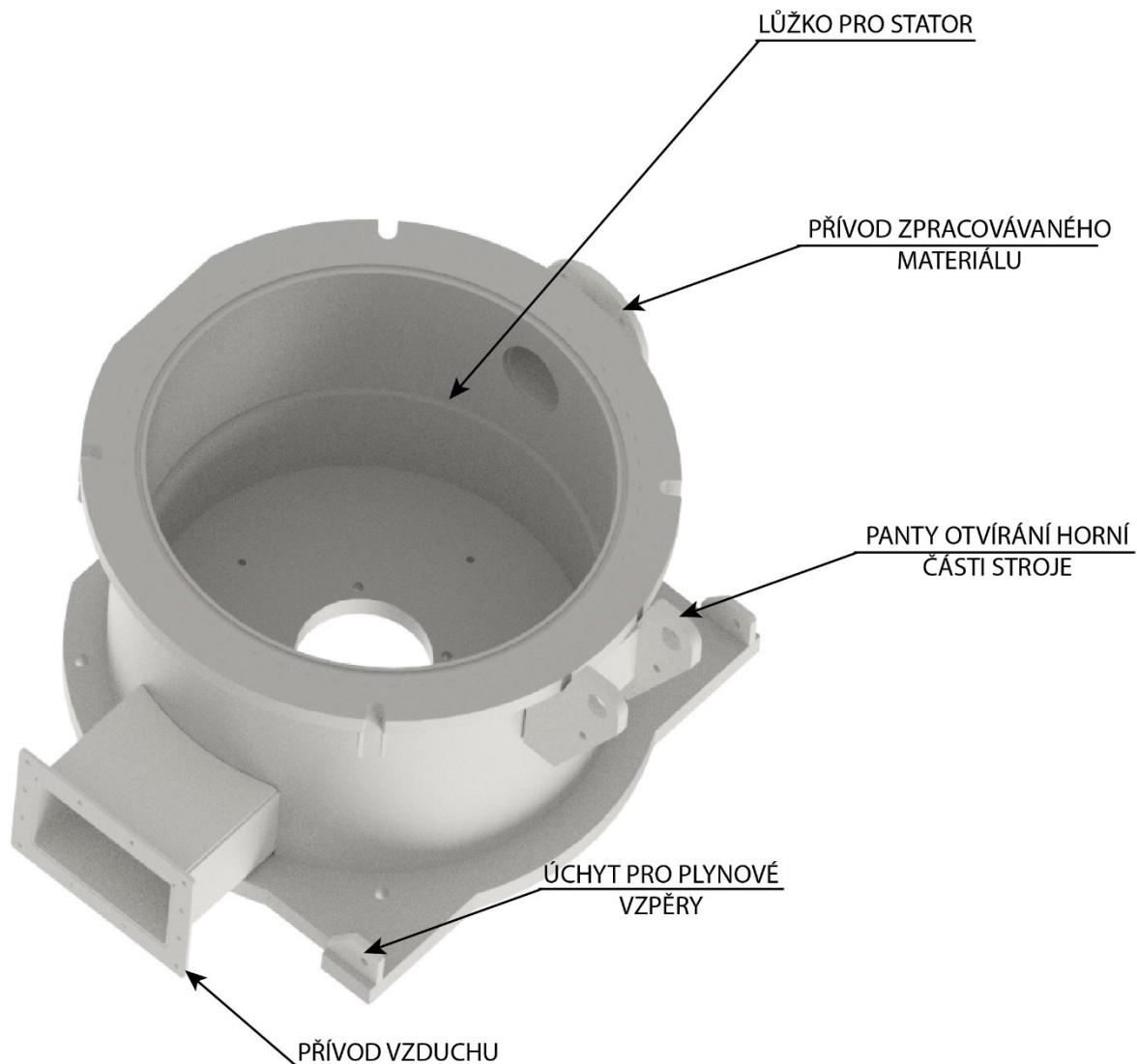


Obr. 39 Osazení spodní části stroje



## Spodní část stroje

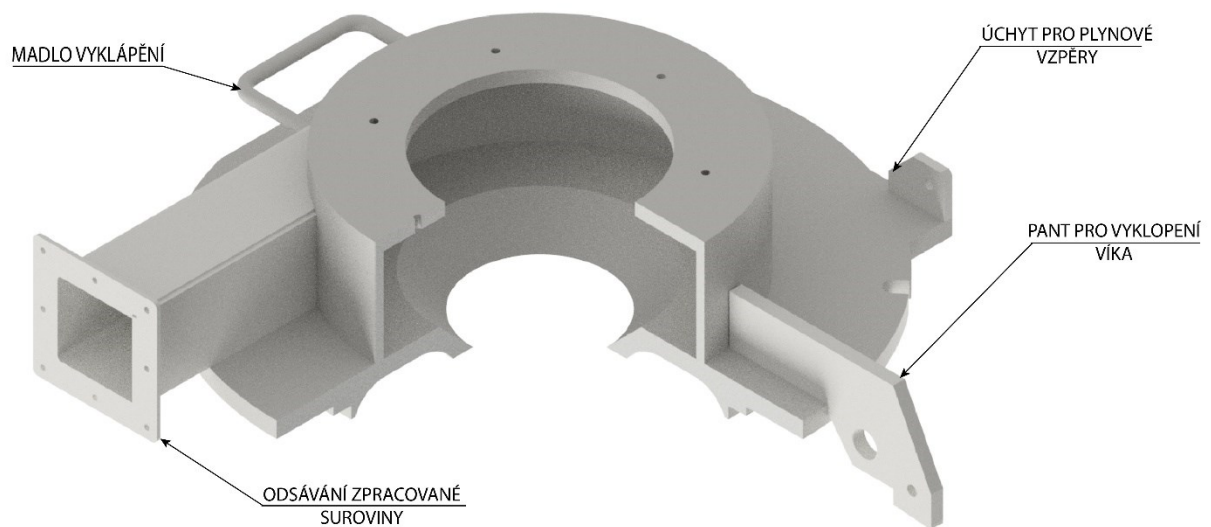
Spodní část stroje je zobrazena na Obr. 40. Jedná se o svařenec z plechových výpalků a trubky CHS 559x31, který je po svaření obroben. Na dně jsou vyvrtány díry pro upevnění ložiskové jednotky drtiče a ochranného límce. Z boků jsou navařeny 2 vstupy, jeden vstup pro přívod vzduchu a druhý pro přívod zpracovávaného materiálu. Na obvodu jsou navařeny dva výpalky s dírou pro čep a pojistný kolík. Tyto výpalky slouží pro možnost vyklopení horní části stroje v případě čištění a servisování. Pro lepší manipulaci víka je stroj vybaven plynovými vzpěrami. Dno je navrženo z plechu o tloušťce dvacet pět milimetrů. Zesílením plechu se minimalizuje prohýbání dna vlivem napínacích sil od řemenů. Na horní ploše, kde se spojuje horní a spodní část stroje, je vytvořena drážka pro těsnění a drážky pro sešroubování horní a spodní části stroje.



Obr. 40 Spodní část stroje

## Horní část stroje

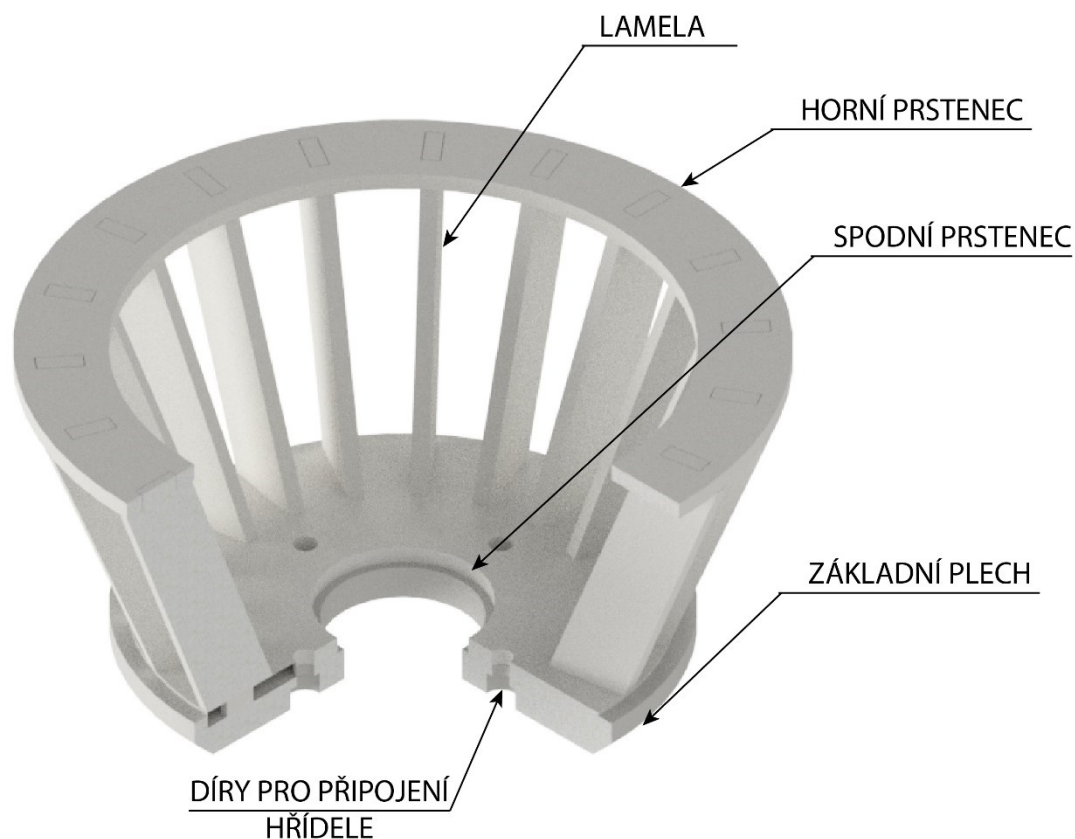
Horní část stroje je zobrazena na Obr. 41. Jedná se o svařenec z plechových výpalků trubky CHS 406,4x10. Na obvodu jsou vytvořené drážky pro sešroubování horní a spodní části stroje. Z horní části je vyvedeno odsávání zpracovávané suroviny. Na bocích jsou přivařeny úchyty pro plynové vzpěry. Horní část je opatřena panty pro vyklopení. Na vrchu horní části jsou vytvořeny závitové díry pro upevnění držáku třídícího motoru.



*Obr. 41 Horní část stroje*

## Třídící koš (třídíč)

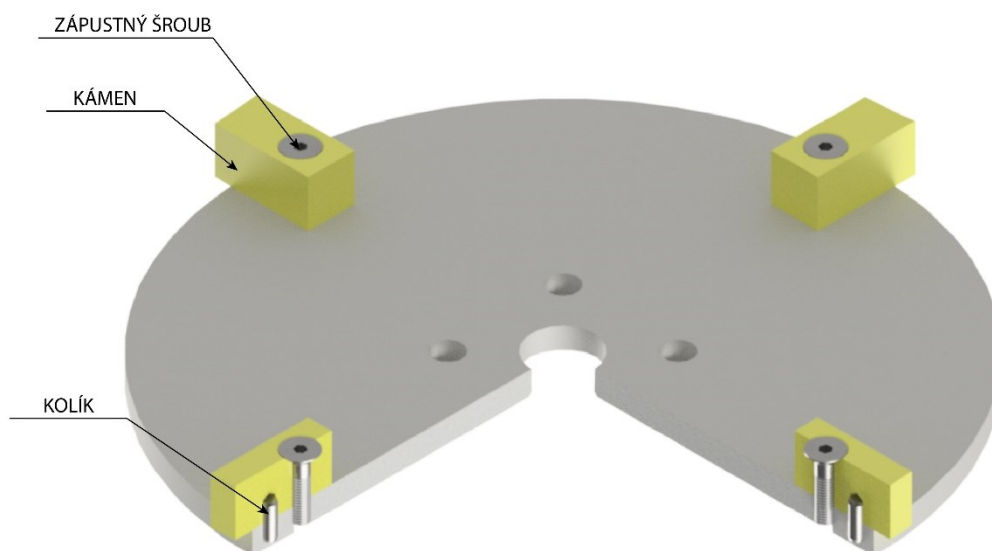
Třídící koš je vyobrazen na Obr. 42. Jedná se o sestavu svařence (lamel a prstenců) a obrobeného základního plechu. Na dně třídíče jsou vytvořeny díry se zahloubením, které umožňují spojení sestaveného třídíče a hnací hřídele třídíče. Lamely třídíče jsou vsazeny do zámků horního a spodního prstence, které zajišťují přesné usazení. Celý třídíč je potřeba vyvážit, aby nevznikaly boční síly vzniklé nevyvážením. Tyto síly by měly špatný vliv na životnost ložisek.



Obr. 42 Třídící koš

## Drticí disk (drtič)

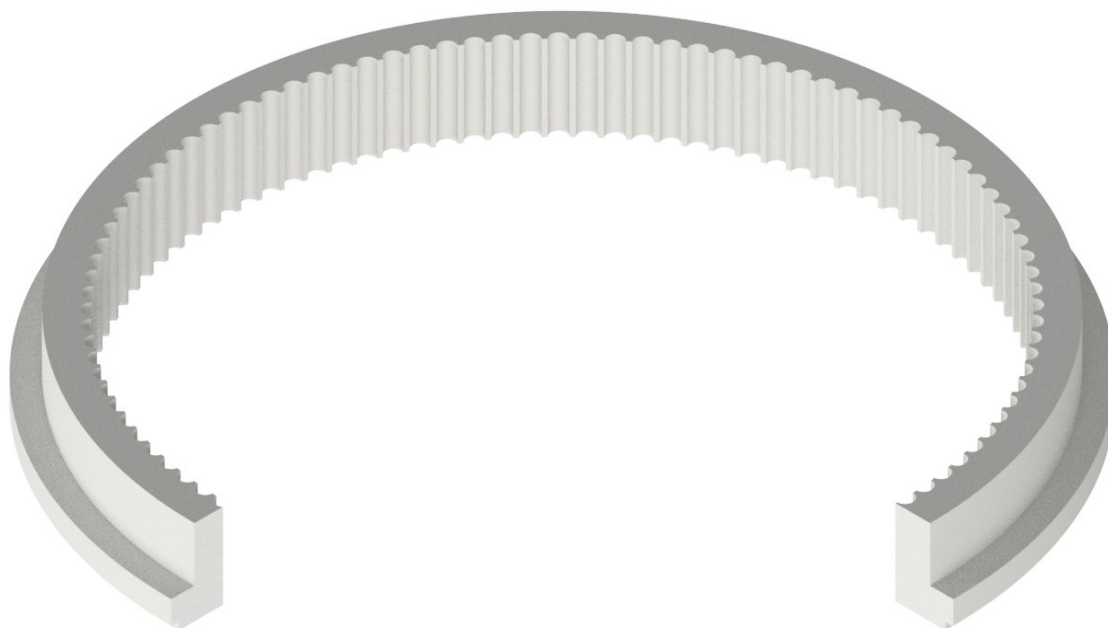
Drticí disk je vyobrazen na Obr. 43. Jedná se o sestavu obráběných dílů. Disk je osazen čtyřmi kameny, které zajišťují společně se statorem drcení materiálu. Kameny jsou připevněny šrouby a kolíky, které zabraňují posuvu kamenů vlivem odstředivé síly. Celý drticí disk je potřeba vyvážit ze stejných důvodů jako třídící koš.



*Obr. 43 Drticí disk*

## Stator

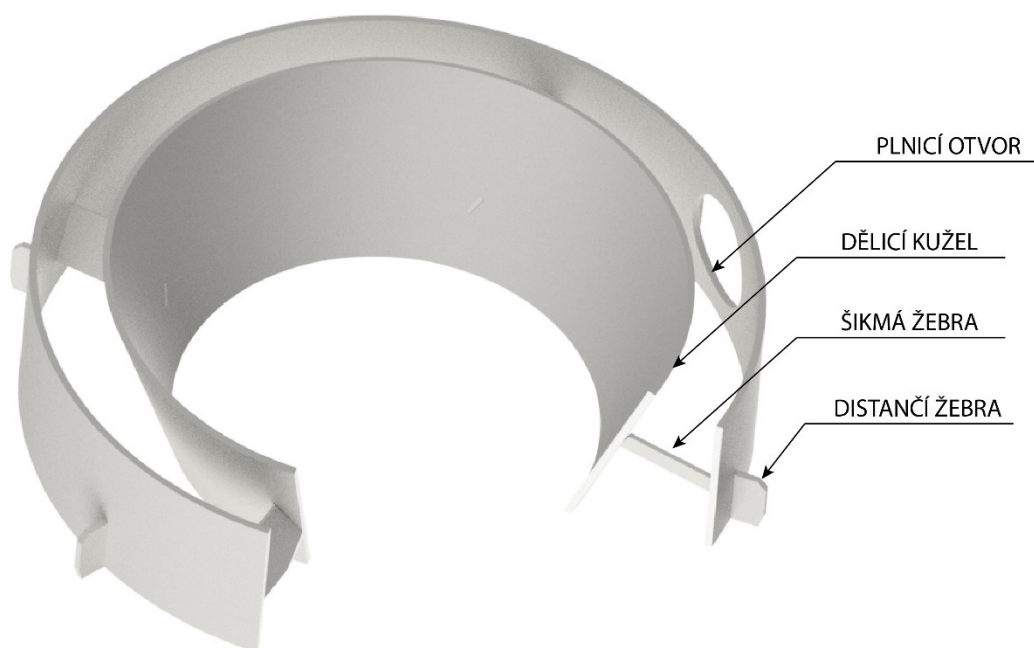
Stator je zobrazen na Obr. 44. Jedná se o vypálené mezikruží z plechu o tloušťce padesát milimetrů. Stator je vyroben metodou řezání vodním paprskem, který je následně obroben. Na vnitřním obvodu jsou vytvořeny válcové zářezy pro lepší drcení materiálu. Díl je navrhnut z ořezavzdorné oceli Hardox 400 pro delší životnost dílu.



*Obr. 44 Stator šrotovníku určený k drcení zpracovávané suroviny*

## Dělicí přepážka

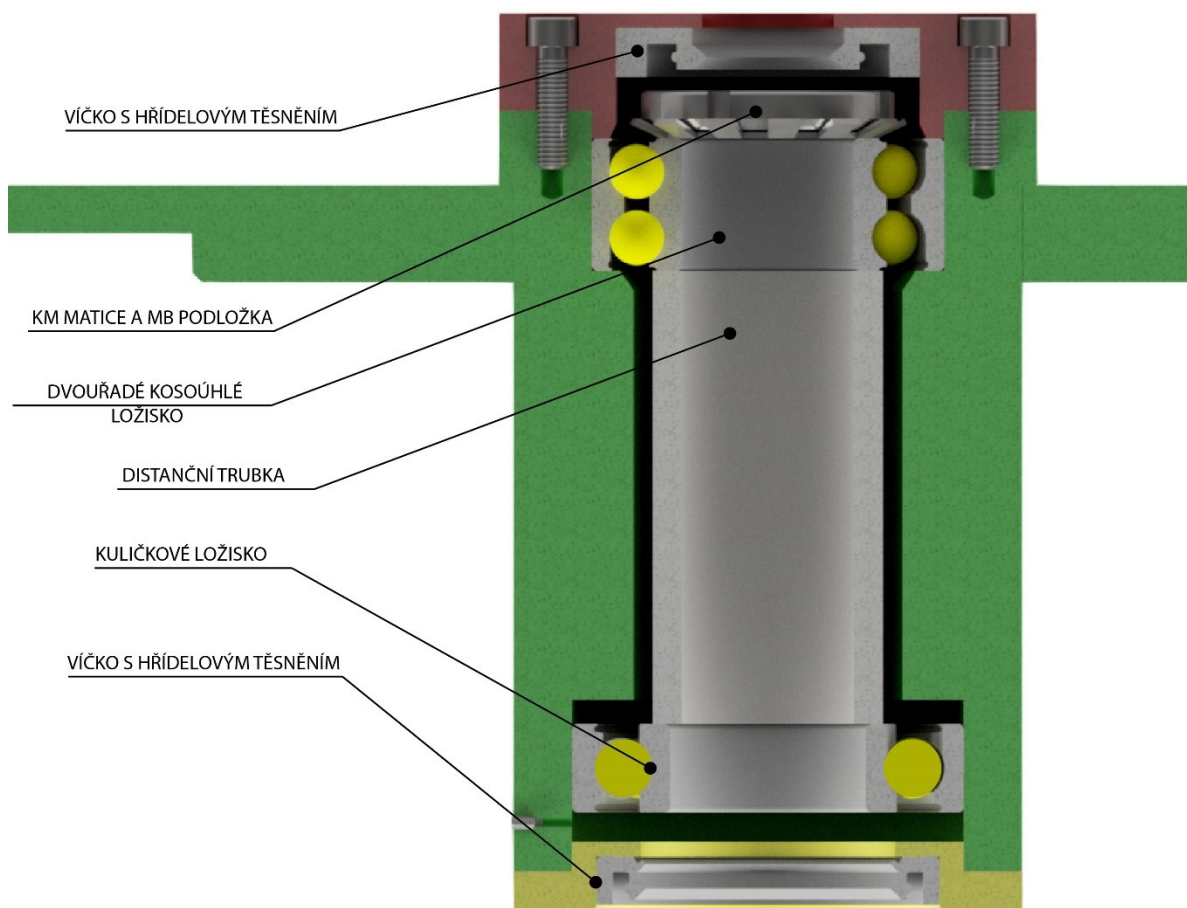
Dělicí přepážka je na Obr. 45. Jedná se o svařenec plechových výpalků. Hlavní část tvoří vnitřní dělicí kužel, který odděluje oblast drcení a třídění. Je spojen pomocí postranních šikmých žebra s obvodovým válcem. Šikmá žebra jsou nakloněna pro lepší odvod rozdrčené suroviny do třídící oblasti. V obvodovém válci je vytvořena díra, a to z důvodu přívodu zpracovávané suroviny do drtící oblasti. Na obvodovém válci jsou navařena distanční žebra pro přesné usazení celého svařence při kompletaci stroje.



*Obr. 45 Dělicí přepážka*

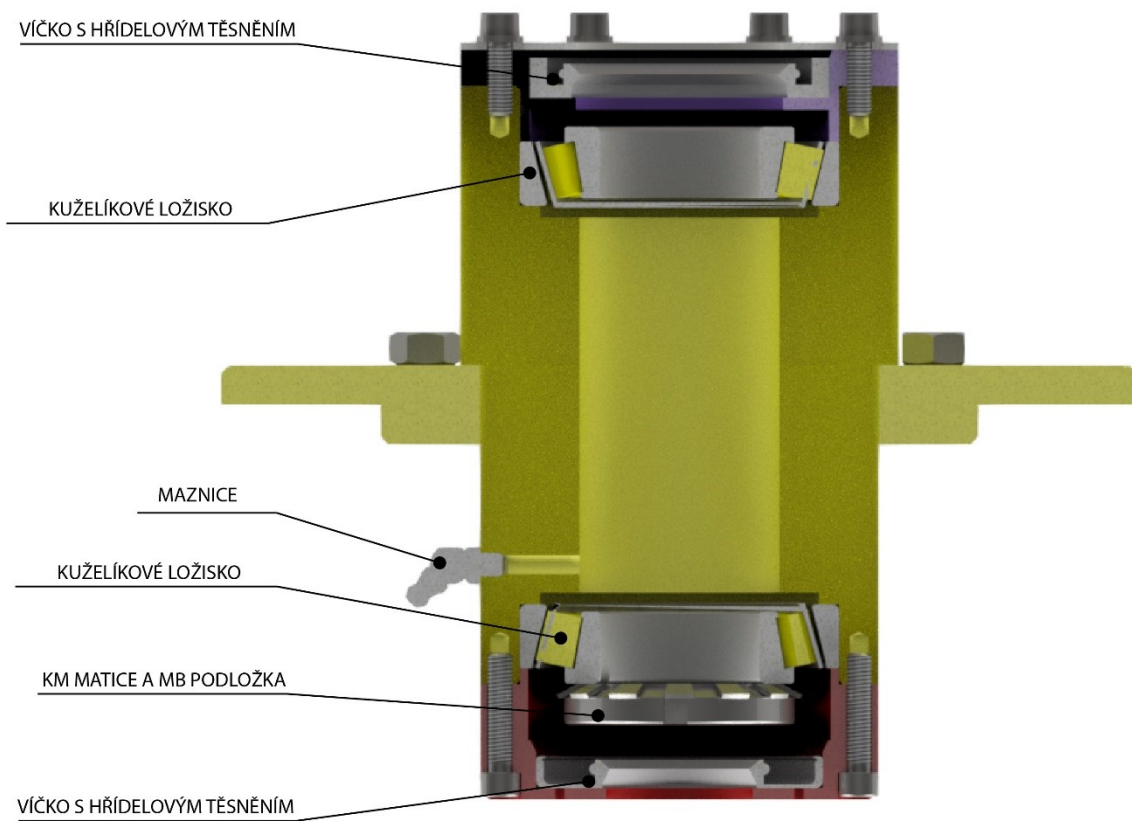
## Ložiskové jednotky

Ložiskové jednotky jsou svařence, ve kterých jsou uloženy hřídele třídícího koše a drticího disku. V jednotkách jsou vytvořeny kanálky pro doplňování maziva LGLT2. Mazivo bylo vybráno dle katalogu SKF pro provozní podmínky jednotek. Jednotky jsou vybaveny hřídelovými těsněními. Těsnění zabraňují unikání maziva a vnikání prachových částic, které by snížily životnost ložisek.



Obr. 46 Popis horní ložiskové jednotky





*Obr. 47 Popis spodní ložiskové jednotky*

## 5 Příprava modelu pro DEM simulaci

Tato kapitola se bude zabývat přípravou modelu pro DEM analýzu. Cílem analýzy je nasimulovat proces třídění v závislosti na otáčkách třídícího koše. Příprava simulace byla provedena v simulačním prostředí Ansys 2021R. Do DEM analýzy bude zahrnuta CFD analýza vytvořená v modulu Ansys Fluent.

### 5.1 Vstupní parametry

Pro vytvoření rychlostního pole bylo nutné definovat vstupní rychlost vzduchu pod drticím diskem a výstupní tlak na odsávání produktu. Simulace bude prováděna pro dvě nastavení. Hodnoty byly zvoleny dle výrobce ventilátorů [25].

#### První nastavení

Hodnota rychlosti vstupního vzduchu  $v_v = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a hodnota výstupního tlaku  $p_o = 2\,500 \text{ Pa}$ . Těchto parametrů dle výrobce dosáhne vysokotlaký ventilátor RVI 315.

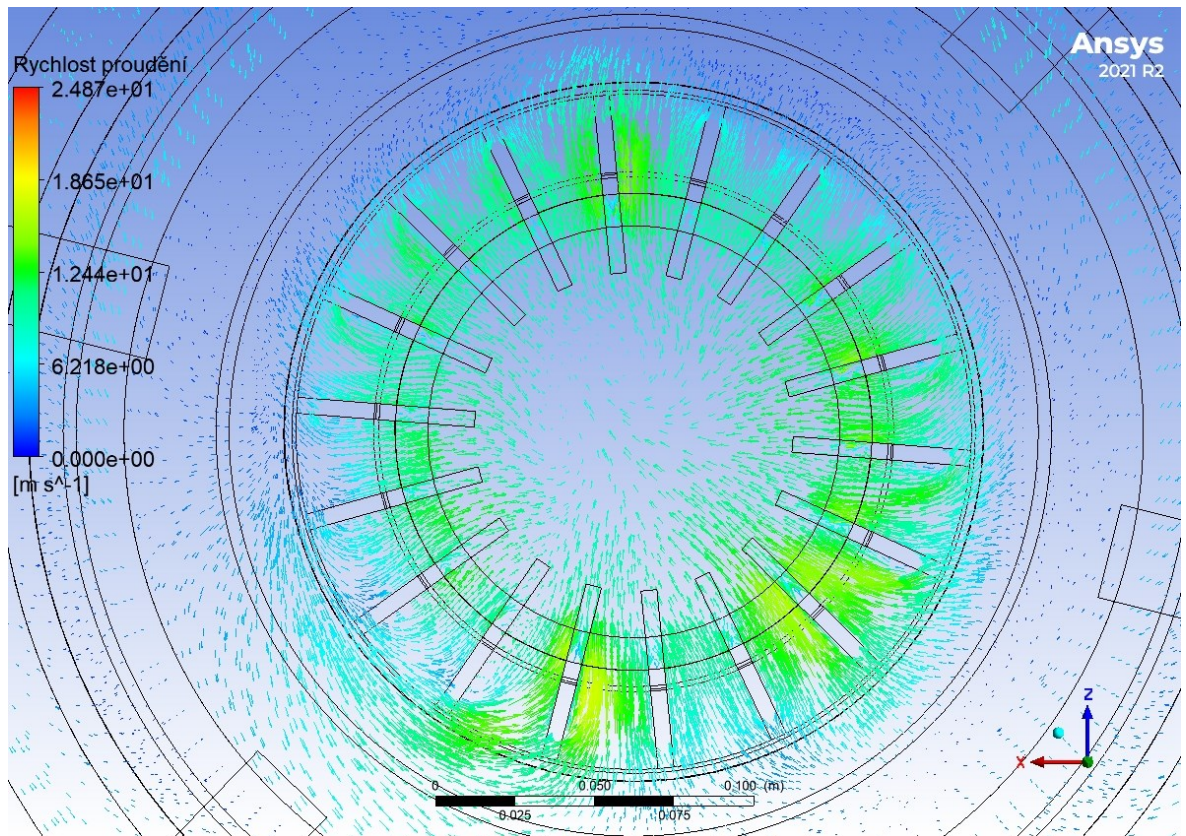
#### Druhé nastavení

Hodnota rychlosti vstupního vzduchu  $v_v = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a hodnota výstupního tlaku  $p_o = 1\,500 \text{ Pa}$ . Těchto parametrů dle výrobce dosáhne vysokotlaký ventilátor RVI 315.

### 5.2 Nastavení simulace

#### Ansys Fluent

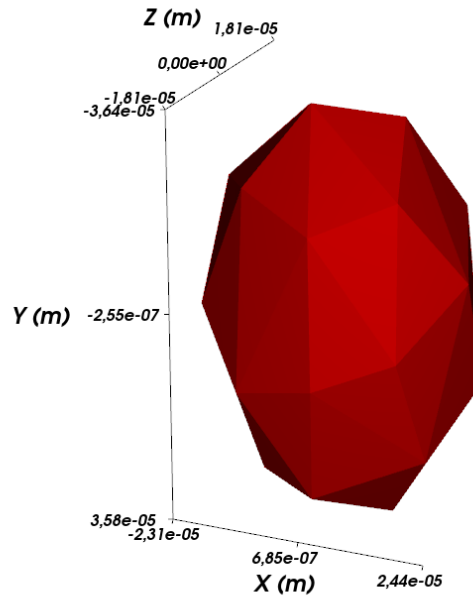
Z vytvořeného CAD modelu byla vyexportována geometrie reprezentující vnitřní rozložení stroje společně s geometrií třídiče a drtiče. Po vytvoření zjednodušeného modelu bylo za pomoci modulu Ansys Fluent vytvořeno rychlostní pole proudícího vzduchu viz Obr. 48 Ukázka proudového pole z CFD analýzy prostupující skrze třídič pro druhé nastavení. Pole je tvořené vstupní rychlostí vzduchu od ventilátoru a výstupním tlakem odsávání. Takto vytvořené pole nezohledňuje vznikající víry vlivem rotujícího drtiče a třídiče. Simulace představuje odhad chování materiálu při třídění. Pro věrohodnější výsledky bychom museli zahrnout rotace drtiče a třídiče. Samotná DEM simulace byla provedena v modulu Rocky DEM.



Obr. 48 Ukázka proudového pole z CFD analýzy prostupující skrze třídič pro druhé nastavení

### Rocky DEM

V prostředí modulu Rocky DEM bylo nastaveno jednosměrné propojení s vytvořeným rychlostním polem. Tento druh propojení využívá konstantní pole rychlosti proudění vzduchu. Není tedy ovlivněno šrotovaným materiálem. Následovalo nastavení tíhového zrychlení a importování zjednodušené geometrie stroje. Rotujícím částem byl definován rotační pohyb dle požadovaných hodnot. Do prostoru pro přívod materiálu byl definován kontinuální přísun materiálu. Pro dosažení přesnější simulace byly nastaveny materiálové parametry odpovídající slunečnicovým semenům.[27] Pro definici šrotovaného materiálu byl zvolen tvar mnohostěnu viz Obr. 49.



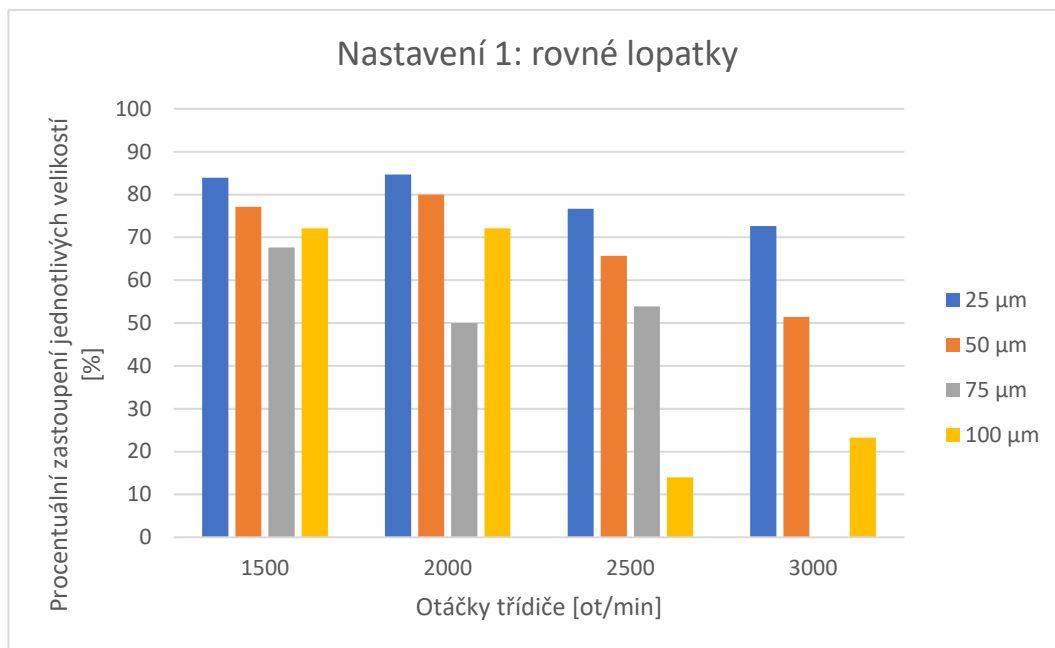
Obr. 49 Mnohostěn reprezentující částici o velikosti  $50 \mu m$

Pro simulaci byly použity čtyři velikosti částic  $25 \mu m$ ,  $50 \mu m$ ,  $75 \mu m$  a  $100 \mu m$ . Při pokusu simulovat přísun materiálu dle zadání  $500 \frac{kg}{h}$  se při těchto velikostech částic jedná o miliony částic. Simulaci o takovéto náročnosti nebylo možné provést s ohledem na dostupnou výpočetní techniku. Byl tedy zvolen výrazně menší přísun materiálu, a to konkrétně  $0,00001 \frac{g}{s}$ . Výstupem simulace je graf ukazující počet prošlých částic skrz třídič v závislosti na otáčkách třídícího koše. Simulace bude představovat 1 s reálného času. Simulace byla prováděna pro otáčky třídiče od  $1500 \text{ min}^{-1}$  do  $3000 \text{ min}^{-1}$  s krokem  $500 \text{ min}^{-1}$ .

### 5.3 Vyhodnocení simulace

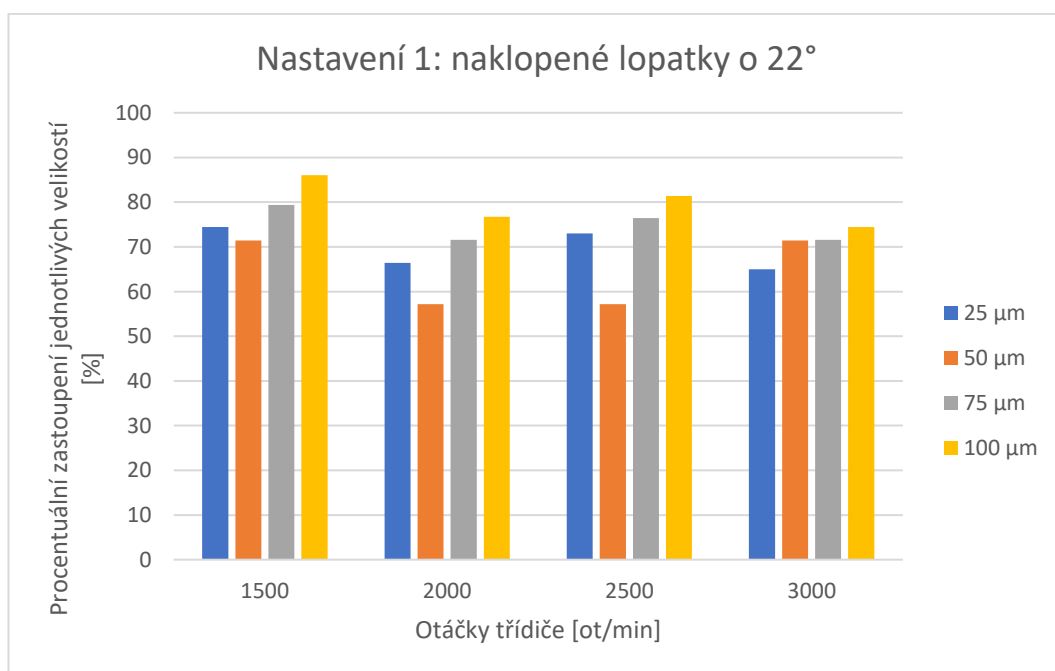
#### Vyhodnocení simulace: První nastavení

Výstupem ze simulace je graf ukazující procentuální zastoupení jednotlivých velikostí. Z Obr. 50 je patrná klesající tendence propustnosti třídiče s rostoucími otáčkami. V ideálním případě bychom chtěli při nejvyšších otáčkách dosáhnout propustnosti pouze částic o velikosti  $25 \mu m$ . Na Obr. 50 je vidět, že při otáčkách  $3000 \text{ min}^{-1}$  prochází třídičem poměrně velké zastoupení velikosti částic  $50 \mu m$  a  $100 \mu m$ .



Obr. 50 Graf zobrazující procentuální zastoupení velikostí částic prošlé třídíčem v závislosti na otáčkách třídíče pro nastavení 1: rovné lopatky

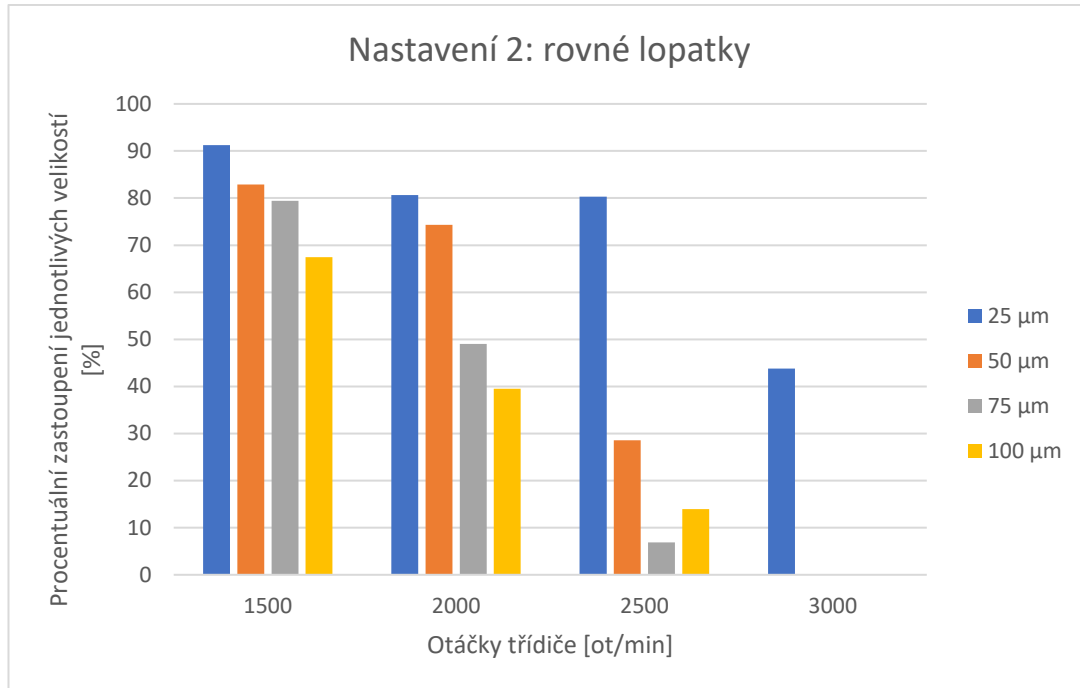
Byla vytvořena simulace pro třídíče s nakloněnými lopatkami o  $22^\circ$  ve směru rotace třídíče viz Obr. 51. Výsledek této simulace ukazuje na negativní vliv naklonění lopatek na schopnost třídění. Pro dosažení efektivního třídění by se musely zvýšit otáčky třídíče. Na základě těchto výsledků byly provedeny simulace s druhým nastavením, které by měly zlepšit funkci třídění.



Obr. 51 Graf zobrazující procentuální zastoupení velikostí částic prošlé třídíčem v závislosti na otáčkách třídíče pro nastavení 1: naklonené lopatky o  $22^\circ$

### Vyhodnocení simulace: Druhé nastavení

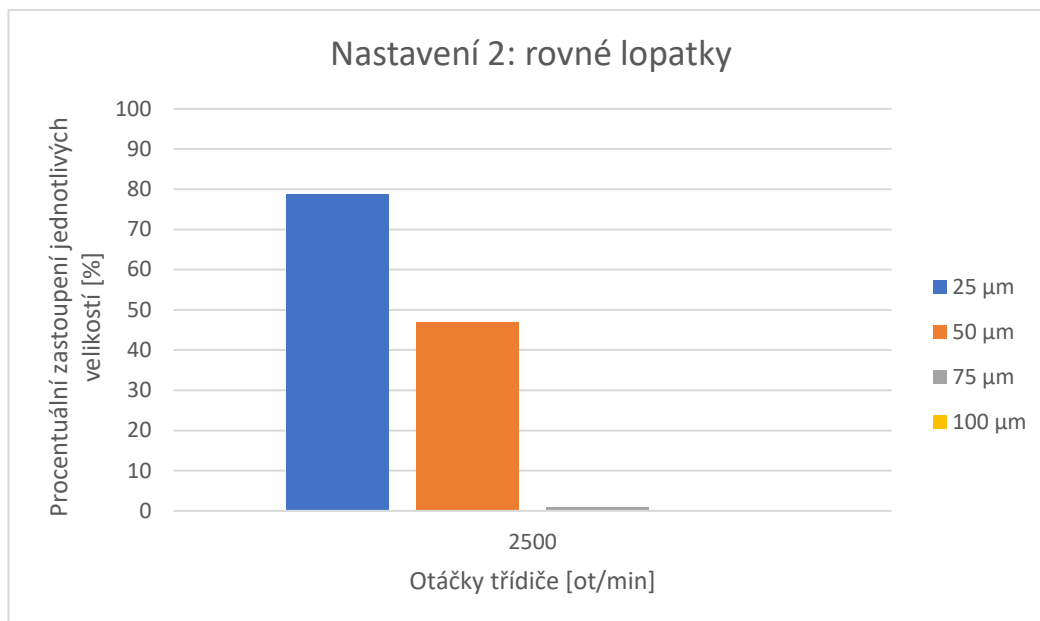
Druhé nastavení vykazuje lepší schopnost třídícího koše separovat různé velikosti. Na Obr. 52 vidíme, že s rostoucími otáčkami se výrazně zmenšuje zastoupení velkých frakcí. Oproti prvnímu nastavení je tento pokles strmější.



Obr. 52 Graf zobrazující procentuální zastoupení velikostí částic prošlé třídícím v závislosti na otáčkách třídíče pro nastavení 2: rovné lopatky

Z grafu vyplývá, že pro požadovanou výstupní surovinu o velikosti  $25 \mu\text{m}$  jsou optimální otáčky třídícího koše  $2\,500 \text{ min}^{-1}$ . Při těchto otáčkách se propouští 80 % požadované výstupní velikosti a malé množství velkých částic. Pro otáčky  $3\,000 \text{ min}^{-1}$  je vidět, že třídíč nepropouští žádné velké částice, ale také propouští pouze 50 % požadované výstupní velikosti. To může mít za následek zahlcení stroje. Z toho usuzují, že pracovní otáčky třídícího koše se budou pohybovat mezi  $2\,500 \text{ min}^{-1}$  a  $3\,000 \text{ min}^{-1}$ .





Obr. 53 Graf zobrazující procentuální zastoupení velikostí částic prošlé třídíčem v závislosti na nastavených otáčkách třídíče  $2\,500\text{ min}^{-1}$ , pro nastavení 2: rovné lopatky

Ve snaze o zpřesnění výsledků byla provedena simulace pro otáčky třídícího kola  $2\,500\text{ min}^{-1}$  v rozsahu 9,5 s. viz Obr. 53. Oproti předchozímu grafu v oblasti pro otáčky  $2\,500\text{ min}^{-1}$  třídíč nepropouští částice o velikosti  $75\ \mu\text{m}$  a  $100\ \mu\text{m}$ . Tento rozdíl může být dán ustálením simulace a náhodnou distribucí vstupního materiálu při simulaci. Graf nám tedy ukazuje, že pokud bychom chtěli stroj nastavit na výstupní velikost produktu  $50\ \mu\text{m}$  a nižší, můžeme použít otáčky třídíče  $2\,500\text{ min}^{-1}$ .

## 6 Závěr

V diplomové práci byla provedena průmyslová rešerše strojů pro šrotování. Z této části vyplývá, že pro šrotování se využívá nejčastěji pět typů šrotovníků. Z požadavků zadavatele práce vyplynul jeden šrotovník, který je schopen třídit frakce v rozmezí  $25 - 50 \mu\text{m}$ , a to vzduchem tříděný šrotovník.

Byla provedena rešerše nejvýznamnějších dodavatelů technologií šrotování nabízejících vzduchem tříděný šrotovník. Stroj pracuje ve všech případech na stejném principu. Jediné rozdíly jsou v odlišné poloze motorů a konstrukci stroje.

Dále byla provedena rešerše vybraných vědeckých publikací zabývajících se problematikou vzdušného třídění. Z této části vyplývá, že pro nastavení velikosti výstupní suroviny mají velký vliv otáčky třídícího kola, otáčky drticího kola a rychlost vzduchu proudící skrze stroj. Rychlostní pole vzduchu ovlivňuje druh použitého mlecího prvku (válcový kolík, kvádr). Zároveň samotná konstrukce třídiče má vliv na schopnost třídění.

V další části byla navržena vlastní koncepce stroje pracující na principu odstředivého drcení materiálu a následného vzdušného třídění. Z požadavku na hmotnostní průtok strojem  $\dot{m} = 500 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  byl proveden návrh počtu potřebných drticích kamenů. Počet byl zvolen na čtyři drticí kameny. Byla vytvořena energetická bilance, která se skládá z energie potřebné pro rozpohybování suroviny, překonání aerodynamických odporů a naběhnutí stroje do pracovních otáček. Na základě této bilance byly zvoleny asynchronní třífázové dvoupólové motory viz Tab. 10. Následně byl proveden výpočet řemenového převodu, který přenáší výkon z motoru na drticí disk pomocí tří řemenů typu SPZ. Byla provedena kontrola ložisek použitých pro uložení hřídel třídícího koše a drticího disku. Následovalo vytvoření CAD modelu šrotovníku. Šrotovník byl navržen jako sestava jednotlivých obrobených svařenců, s ohledem na jednoduchost výroby. Model byl průběžně konzultován s firmou *Farmet a.s.* ohledně vyrobitelnosti jednotlivých strojních celků.

Jako poslední byl vytvořen DEM model šrotovníku, který simuluje proces třídění v rozsahu jedné sekundy reálného času. Výstupem ze simulací jsou grafy ukazující procentuální zastoupení prošlých částic skrze třídič o určité velikosti v závislosti na otáčkách třídiče. Simulace byla provedena pro dvě nastavení vstupních parametrů a otáčkovém rozsahu  $2\,000 \text{ min}^{-1} - 3\,000 \text{ min}^{-1}$ . U prvního nastavení je vidět, že se zvyšujícími otáčkami se zastoupení velkých částic jen mírně snižuje. Z tohoto důvodu byla vytvořena simulace pro druhé nastavení. Výsledek této simulace nám ukazuje výraznější pokles



zastoupení velkých částic. Je patrné, že pro požadovanou výstupní velikost produktu  $25 \mu m$  bude mít stroj pracovní otáčky třídíče mezi  $2\,500 \text{ min}^{-1}$  a  $3\,000 \text{ min}^{-1}$ .

Byla provedena simulace v rozsahu devět sekund pro druhé nastavení a otáčkách třídíče  $2\,500 \text{ min}^{-1}$ . Ze simulace se tyto pracovní otáčky ukázaly jako vhodné pro nastavení velikosti výstupního produktu o velikosti  $50 \mu m$  a nižší.

## Seznam použité literatury

- [1] Hosokawa Micron Powder Systems. In: Hosokawa Micron Powder Systems [online]. New York: Hosokawa Micron Powder Systems, 2021 [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://www.hmicronpowder.com/>
- [2] Kemutec [online]. Bristol: Kemutec Group Inc., 2021 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.kemutecusa.com/news/how-does-a-pps-air-classifier-mill-work/>
- [3] *Exportersindia* [online]. New Delhi: Exportersindia, 2021 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.exportersindia.com/product-detail/air-classifier-mills-3610131.htm>
- [4] *Pharmapproach* [online]. Pharmapproach, 2021 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.pharmapproach.com/hammer-mill/>
- [5] *Lessine* [online]. Péruwelz: Lessine, 2021 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.lessine.com/en/solutions/milling/pin-mill>
- [6] Prediction of Particle Size of Ammonium Perchlorate during Pulverisation. *Defence Science Journal* [online]. 2006, **56**(3), 423-431 [cit. 2021-12-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267236163\\_Prediction\\_of\\_Particle\\_Size\\_of\\_Ammonium\\_Perchlorate\\_during\\_Pulverisation/stats](https://www.researchgate.net/publication/267236163_Prediction_of_Particle_Size_of_Ammonium_Perchlorate_during_Pulverisation/stats)
- [7] Modeling of Continuous Self-Classifying Spiral Jet Mills Part 1: Model Structure and Validation Using Mill Experiments. *AIChE Journal* [online]. 2014, **60**(2) [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/266398910\\_Modeling\\_of\\_Continuous\\_Self-Classifying\\_Spiral\\_Jet\\_Mills\\_Part\\_1\\_Model\\_Structure\\_and\\_Validation\\_Using\\_Mill\\_Experiments](https://www.researchgate.net/publication/266398910_Modeling_of_Continuous_Self-Classifying_Spiral_Jet_Mills_Part_1_Model_Structure_and_Validation_Using_Mill_Experiments)
- [8] Grinding in an air classifier mill — Part I: Characterisation of the one-phase flow. *Powder Technology* [online]. 2011, **201**(1), 19-27 [cit. 2021-12-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591011001124>
- [9] STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF SUNFLOWER SEEDS. *ELECTRONIC JOURNAL OF POLISH AGRICULTURAL UNIVERSITIES* [online]. 2011, 2011(14), 1-11 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/234082430\\_STUDY\\_ON\\_MECHANICAL\\_PROPERTIES\\_OF\\_SUNFLOWER\\_SEEDS](https://www.researchgate.net/publication/234082430_STUDY_ON_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_SUNFLOWER_SEEDS)

- [10] Valivá ložiska [online]. 2019, 1-1151 [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings--17000\\_1-CS\\_tcm\\_54-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings--17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf)
- [11] Air Classifying Mill [online]. Shandong: Shandong ALPA Powder Technology, 2021 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.alpapowder.com/machines/air-classifying-mill/?upage=2>
- [12] ACM [online]. Augsburg: Hosokawa Alpine, 2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/classifier-mills/acm/>
- [13] PPS AIR CLASSIFIER MILLS [online]. Bristol: Kemutec Group, 2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.kemutecusa.com/products/kek-mills-grinders/pps-air-classifier-mills/>
- [14] CSM Classifier Mill [online]. Germany: NETZSCH, 2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://grinding.netzsch.com/en/products-and-solutions/dry-grinding/csm-classifier-mill>
- [15] Rathi Air Classifying Mill (ACM) [online]. India: Rathi Engineering Solutions Pvt., 2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://rathiengineering.com/products/rathi-air-classifying-mill-acm/>
- [16] Valivá ložiska [online]. USA: SKF Group, 2019 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: [https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000\\_1-CS\\_tcm\\_54-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf)
- [17] OPTIMALIZACE KONSTRUKCE KOREČKOVÝCH DOPRAVNÍKŮ. Brno, 2018. Disertační práce. VUT v Brně.
- [18] Ansys Rocky [online]. USA: ANSYS, 2023 [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-rocky>
- [19] Altair [online]. USA: Altair Engineering, 2023 [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <https://altair.com/edem>
- [20] Newton [online]. USA: AC-TEK, 2015 [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <https://www.demsoftware.net/software/>
- [21] ONLINE WIND TUNNEL LABORATORY. American Society for Engineering Education [online]. 2008, 1-20 [cit. 2023-06-08]. Dostupné z:

- [https://www.researchgate.net/publication/273771608\\_Online\\_Wind\\_Tunnel\\_Laboratory](https://www.researchgate.net/publication/273771608_Online_Wind_Tunnel_Laboratory)
- [22] Tyma [online]. Trmice: Tyma, 2023 [cit. 2023-06-08]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/technicke-informace/caste-dotazy/ucinnost-remenu/#:~:text=%C3%9A%C4%8Dinnost%20%C5%99emenov%C3%BDch%20se%20pohybuje%20v,p%C5%99ednosti%20%C5%99emenov%C3%BDch%20p%C5%99evod%C5%AF%20zcela%20jednozna%C4%8Dn%C3%A9>.
- [23] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 5. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 9788073610814.
- [24] Conti V belts [online]. Hannover: Conti Tech, 2002 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: [http://www.powerparts.it/contitech\\_pdf/CONTITECH\\_CinghieTrapezie.pdf](http://www.powerparts.it/contitech_pdf/CONTITECH_CinghieTrapezie.pdf)
- [25] Ventilátory RVI [online]. Strážov: Kovodružstvo Strážov, 2023 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: <http://www.kovostrazov.cz/rvi.html>
- [26] HOIDEKR, Jan. Analýza loupání slunečnicových semen. Praha, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [27] Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method. Computers and Electronics in Agriculture [online]. 2022, 2022(198), 1-16 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169922003295>

## Seznam obrázků

Obr. 1 Přehled mlecích strojů upraveno z [1] .....	3
Obr. 2 Rozdělení strojů dle velikosti výstupní suroviny upraveno z [1] .....	4
Obr. 3 Rozdělení strojů dle tvrdosti vstupní suroviny upraveno z [1] .....	4
Obr. 4 Schéma vzduchem tříděného mlýnu upraveno z [2] .....	5
Obr. 5 Schéma třídícího rotoru upraveno z [1] .....	5
Obr. 6 Třídící kolo s přímými lopatkami [3] .....	6
Obr. 7 Třídící kolo s šikmými lopatkami [1] .....	6
Obr. 8 Kladivový mlýn schéma upraveno z [4] .....	7
Obr. 9 Kladivový mlýn rotor I [1] .....	7
Obr. 10 Kolíkový mlýn [5] .....	8
Obr. 11 Proudový mlýn schéma upraveno z [1] .....	9
Obr. 12 Kulový mlýn [1] .....	10
Obr. 13 Mlýn "tekutinové lůžko" [1] .....	11
Obr. 14 Šrotovník od značky ALPA [11] .....	12
Obr. 15 Šrotovník od značky Hosokawa Alpine [12] .....	13
Obr. 16 Šrotovník od značky Kemutec upraveno z [13] .....	14
Obr. 17 Šrotovník od značky Netzsch [14] .....	15
Obr. 18 Šrotovník od značky Rathi engineering [15] .....	16
Obr. 19 Vzdušný mlýn ZPS-100 [1] .....	19
Obr. 20 Výpočet proudění na třídícím kole [8] .....	19
Obr. 21 Poměr velikosti prostupné plochy mezi lopatkami vůči ploše mezi lopatkami v závislosti napočtu lopatek po obvodu [7] .....	20
Obr. 22 Průběh radiální rychlosti na třídícím kole .....	21
Obr. 23 Schéma výpočtu DEM metodou [17] .....	24
Obr. 24 Simulace překládacího skluzu na sypké hmoty [18] .....	26
Obr. 25 Schéma stroje .....	29
Obr. 26 Kinematické schéma-rychlosti po dílce kamenu .....	30
Obr. 27 Definice potřebných geometrických poměrů drtiče pro výpočet rovnice (4.3) .....	32
Obr. 28 Nabíraný objem kamenem při rotaci .....	32
Obr. 29 Schéma odvození aerodynamického odporu .....	35
Obr. 30 Graf volby druhu řemenu [23] .....	39

Obr. 31 Schéma zatížení hřídele třídiče .....	42
Obr. 32 Schéma zatížení hřídele třídiče pohled ze spodu na třídič .....	43
Obr. 33 Schéma zatížení hřídele drtiče .....	48
Obr. 34 Síly působící na kuželiková ložiska .....	50
Obr. 35 Popis stroje .....	52
Obr. 36 Iso pohledy šrotovníku .....	53
Obr. 37 Řez šrotovníkem .....	54
Obr. 38 Osazení horní části stroje .....	55
Obr. 39 Osazení spodní části stroje .....	56
Obr. 40 Spodní část stroje .....	57
Obr. 41 Horní část stroje .....	58
Obr. 42 Třídící koš .....	59
Obr. 43 Drticí disk .....	60
Obr. 44 Stator .....	61
Obr. 45 Dělicí přepážka .....	62
Obr. 46 Popis horní ložiskové jednotky .....	63
Obr. 47 Popis spodní ložiskové jednotky .....	64
Obr. 48 Ukázka proudového pole z CFD analýzy prostupující skrze třídič pro druhé nastavení .....	66
Obr. 49 Mnohostěn reprezentující částici o velikosti 50 $\mu\text{m}$ .....	67
Obr. 50 Graf zobrazující procentuální zastoupení velikostí částic prošlé třídičem v závislosti na otáčkách třídiče pro první nastavení a rovné lopatky .....	68
Obr. 51 Graf zobrazující procentuální zastoupení velikostí částic prošlé třídičem v závislosti na otáčkách třídiče pro první nastavení a naklonené lopatky o 22° .....	68
Obr. 52 Graf zobrazující procentuální zastoupení velikostí částic prošlé třídičem v závislosti na otáčkách třídiče pro druhé nastavení a rovné lopatky .....	69

## Seznam tabulek

Tab. 1 Vliv otáček mlecího kola na velikost rozemleté suroviny [6] .....	17
Tab. 2 Vliv otáček třídícího kola na velikost rozemleté suroviny [6].....	18
Tab. 3 Vliv otáček dávkovače (FRAL) na velikost rozemleté suroviny [6] .....	18
Tab. 4 Vliv otevření klapky přívodu vzduchu do mlýna na velikost rozemleté suroviny [6] .....	18
Tab. 5 Potřebný výkon pro urychlení na požadovanou rychlost.....	34
Tab. 6 Výkony potřebné pro překonání aerodynamického odporu .....	36
Tab. 7 Momenty setrvačnosti drtiče a třídiče.....	36
Tab. 8 Výkon potřebný pro naběhnutí stroje do pracovního režimu .....	37
Tab. 9 Celková výkonová náročnost drtiče a třídiče.....	37
Tab. 10 Parametry zvolených motorů značky Siemens .....	38
Tab. 11 Součinitel úhlu opásání [24] .....	40
Tab. 12 Tabulka zvolených dílů řemenového převodu.....	41
Tab. 13 Zatěžovací síly působící na hřídel třídiče .....	43
Tab. 14 Data pro výpočet ložiska 3207 A [16] .....	44
Tab. 15 Data pro výpočet ložiska 208[16] .....	46
Tab. 16 Zatěžovací síly působící na hřídel drtiče .....	48
Tab. 17 Data pro výpočet ložiska 30208 [16].....	49

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Pokud není v textu určeno jinak, použité zkratky a symboly mají následující význam.

- První časová derivace je označena jednou tečkou nad, př.  $\dot{x}$
- Derivace veličiny je značena písmenem  $d$ , př  $dM$
- A, B, C, D body značící místo uložení ložisek

Symbol	Jednotka	Popis
$A$	$[m]$	Matematická konstanta výpočtu diferenciální rovnice
$a$	$[mm]$	Osová vzdálenost řemenic
$c_x$	$[1]$	Součinitel aerodynamického odporu
$c_1$	$[1]$	Součinitel úhlu opásání
$c_2$	$[1]$	Součinitel provozu
$c_3$	$[1]$	Součinitel délky řemenu
$C_1, C_2$	$[m]$	Matematická konstanta výpočtu diferenciální rovnice
$C_{10A}$	$[m]$	Základní dynamická únosnost pro 20 000 hodin pro ložisko A
$C_{10B}$	$[m]$	Základní dynamická únosnost pro 20 000 hodin pro ložisko B
$C_{10C}$	$[m]$	Základní dynamická únosnost pro 20 000 hodin pro ložisko C
$C_{10D}$	$[m]$	Základní dynamická únosnost pro 20 000 hodin pro ložisko D
$C$	$[m \cdot s^{-2}]$	Matematická konstanta výpočtu diferenciální rovnice
$d_m$	$[mm]$	Výpočtový průměr ložiska
$D_{m1}$	$[mm]$	Průměr hnací řemenice
$D_{m2}$	$[mm]$	Průměr hnané řemenice
$D_{mv2}$	$[mm]$	Výpočtový průměr hnané řemenice
$E_k$	$[J]$	Kinetická energie
$E_k$ urychlení	$[J]$	Kinetická energie potřebná k urychlení výlisků
$F$	$[N]$	Síla aerodynamického odporu
$F_{aB}$	$[N]$	Axiální síla v ložisku B
$F_{aD}^{AU}$	$[N]$	Axiální síla axiálně uvolněného ložiska



$F_{aC}^{AS}$	[N]	Axiální síla axiálně sevřeného ložiska
$F_{rA}$	[N]	Radiální síla v ložisku A
$F_{rB}$	[N]	Radiální síla v ložisku B
$F_{rD}$	[N]	Radiální síla v ložisku D
$F_{\check{r}}$	[N]	Síla v řemenu
$F_m$	[N]	Silové zatížení od šrotovaných výlisků
$F_{min}$	[N]	Minimální zatížení ložiska
$F_N$	[N]	Napínací síla řemenového převodu
$G_d$	[N]	Zatížení generované vlastní tíhou drtiče
$G_h$	[N]	Zatížení generované vlastní tíhou třídiče
$g$	[ $m \cdot s^{-2}$ ]	Tíhové zrychlení
$h$	[mm]	Výška drticích kamenů
$i_{1,2}$	[1]	Převodový poměr
$i_k$	[1]	Potřebný počet drticích kamenů
$J$	[ $kg \cdot m^2$ ]	Moment setrvačnosti
$k_2$	[ $s^{-2}$ ]	Matematická konstanta výpočtu diferenciální rovnice
$L_w$	[mm]	Výpočtová délka řemenu
$M_a$	[Nm]	Aerodynamický odporový moment
$M_m$	[Nm]	Nominální krouticí moment motoru
$m$	[kg]	Hmotnost
$m_v$	[g]	Průměrná hmotnost výlisků
$\dot{m}$	[ $kg \cdot h$ ]	Hmotnostní průtok šrotovaných výlisků strojem
$\dot{m}_{1k}$	[ $kg \cdot h$ ]	Hmotnostní průtok jedním kamenem
$n_D$	[ $min^{-1}$ ]	Otáčky drticího disku
$n_{mT}$	[ $min^{-1}$ ]	Otáčky třídicího koše
$n_m$	[ $min^{-1}$ ]	Nominální otáčky motoru
$p_o$	[Pa]	Tlak na odsávání
$P_{aero}$	[W]	Výkon potřebný k aerodynamickým odporům
$P_A$	[W]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska A
$P_B$	[W]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska B
$P_C$	[W]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska C
$P_D$	[W]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska D
$P_m$	[kW]	Nominální výkon motoru

$P_r$	[kW]	Výkon přenesený jedním řemenem
$P_t$	[W]	Celkový potřebný výkon
$P_{rozběh}$	[W]	Výkon potřebný pro naběhnutí stroje do pracovního režimu
$P_{urychlení}$	[W]	Výkon potřebný k urychlení výlisků
$R_A$	[N]	Reakce v podpoře A
$R_B$	[N]	Reakce v podpoře B
$R_C$	[N]	Reakce v podpoře C
$R_D$	[N]	Reakce v podpoře D
$R_e$	[MPa]	Mez kluzu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$r_1$	[m]	Poloměr začátku drticího kamenu
$r_2$	[m]	Poloměr konce drticího kamenu
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
$t$	[s]	Čas
$t_h$	[s]	Čas pohybu šrotovaných výlisků po kameni
$v$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Celková rychlost
$v_r$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Relativní rychlost
$v_u$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Unášivá rychlost
$v_v$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Rychlost vzduchu
$v_1$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Rychlost šrotovaných výlisků v čase t=0
$V_n$	[mm <sup>3</sup> ]	Objem, který nabere kámen při šrotování
$V_v$	[mm <sup>3</sup> ]	Průměrný objem výlisků
$x_{(t)}$	[m]	Poloha šrotovaných výlisků ve směru souřadnice x v čase t
$\dot{x}_{(t)}$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Rychlost šrotovaných výlisků ve směru souřadnice x v čase t
$\alpha$	[rad · s <sup>-2</sup> ]	Úhlové zrychlení
$\beta$	[°]	Úhel opásání
$\lambda_1, \lambda_2$	[s <sup>-1</sup> ]	Kořeny charakteristické rovnice
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
$\mu$	[1]	Součinitel smykového tření
$\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Hustota vzduchu

---

$\rho_v$	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota výlisků
$\eta_{\dot{r}}$	[1]	Účinnost řemenového převodu