

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ A ČÁSTÍ STROJŮ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

*Inovace technologie loupání  
a metodika loupateľnosti semen olejin*

Ing. Jan Hoidekr

Doktorský studijní program: *Strojní inženýrství*

Studijní obor: *Konstrukční a procesní inženýrství*

Školitel:

prof. Ing. David Herák, Ph. D.

prof. Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph. D.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

duben 2021

Název anglicky: *Innovation of Hulling Technology and Methodology of Oilseed Hullability*

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu konstruování a částí strojů Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Jan Hoidekr  
Ústav konstruování a částí strojů, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, 160 00 Praha 6

Školitel: prof. Ing. David Herák, Ph. D.  
Katedra mechaniky a strojnictví, Technická fakulta ČZU v Praze  
Kamýcká 129, 165 00 Praha – Suchdol

prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph. D.  
Katedra strojírenství a elektrotechniky, Škoda auto vysoká škola  
Na Karmeli 1457, 293 01 Mladá Boleslav

Školitel-specialista: Ing. Martin Dub, Ph. D.  
Ústav konstruování a částí strojů, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, 160 00 Praha 6

Oponenti: prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc. (TU Liberec)  
prof. Dr. Ing. František Kumhála (ČZU v Praze)  
doc. Ing. Michal Petruš, Ph. D. (TU Liberec)

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6 před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Konstrukční a procesní inženýrství. S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph. D.  
předseda oborové rady oboru Konstrukční a procesní inženýrství  
Fakulta strojní ČVUT v Praze

# Obsah

<b>1</b>	<b>Současný stav problematiky</b> .....	<b>2</b>
1.1	Úvod a motivace .....	2
1.2	Technologie loupání olejin .....	3
1.3	Hodnocení kvality loupání .....	4
1.4	Matematické modely mechanického chování semen olejin .....	4
1.5	Odolnost slupky proti porušení .....	6
1.6	Závěry plynoucí z přehledu problematiky .....	6
<b>2</b>	<b>Cíle disertační práce</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Materiály a použité metody</b> .....	<b>8</b>
3.1	Měření síly a deformace potřebné k porušení slupky slunečnicového semene v závislosti na orientaci zatížení .....	9
3.2	Experimentální ověření energetického modelu predikce porušení slupky semene nárazem simulující prostředí loupacího stroje .....	12
3.3	Analýza kinematických charakteristik pohybu semen v impaktních loupacích strojích .....	12
<b>4</b>	<b>Výsledky a diskuze</b> .....	<b>14</b>
4.1	Stanovení deformačního modelu semene a deformačních energií potřebných k porušení slupky .....	14
4.2	Experimentální ověření energetického modelu predikce porušení slupky semene nárazem simulující prostředí loupacího stroje .....	16
4.3	Metodika hodnocení kvality loupání .....	17
4.4	Výsledky kinematické analýzy .....	19
<b>5</b>	<b>Inovace technologie loupání</b> .....	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>24</b>
	<b>Publikace související s tématem disertace</b> .....	<b>27</b>
	<b>Seznam použité literatury v tezích</b> .....	<b>29</b>
	<b>Anotace</b> .....	<b>30</b>

# 1 Současný stav problematiky

## 1.1 Úvod a motivace

Pěstování olejnin tvoří významnou složku moderního zemědělství. Ať už je výsledný produkt určen pro zpracování v potravinářském průmyslu ve formě jader (případně celých semen), nebo v průmyslu olejářském za účelem získání olejů lisováním či extrakcí.

Semena olejnin vždy obsahují slupku (osemení), která tvoří jejich přirozený obal a ochranu (některá semena mají i specifické obaly – např. bavlník, podzemnice olejná atd.). Slupku je dobré z jádra před lisováním odstranit hned z několika důvodů. Oproti jádru totiž obsahuje jen malé množství oleje a velké množství vlákniny, její odstranění tedy vede k lepší výtěžnosti lisování. Slupka rovněž obsahuje lignin a další složky, které působí abrazivně a způsobují opotřebení lisovacích ústrojí. Odstranění slupek tedy vede k prodloužení životnosti lisů. V neposlední řadě se tak děje i z důvodu získání výlisků jako kvalitnějšího krmiva s vysokým podílem proteinů. Odstraněné slupky jsou pak nejčastěji využity pro spalování, přičemž ke své hmotnosti se nespalují přímo, ale upravují se například granulováním nebo peletováním. [1]

Rovněž v potravinářském průmyslu existuje poptávka po vyloupaných jádrech semen olejnin, zejména pak semen slunečnice. Oproti olejářskému průmyslu jsou zde kladeny náročnější požadavky na kvalitu vyloupání, jelikož je poptávka zejména po celých a neporušených jádrech. Ta mohou být využita jak pro přímou konzumaci např. po úpravě pražením, tak při libovolném dalším zpracování.

Požadavky dnešní doby kladou stále větší důraz na snižování energetické náročnosti technologických procesů se současným zvyšováním jejich produktivity. Nové vývojové metody leckdy posouvají současné technologie až k hranicím jejich fyzikálních možností. K tomu jsou však nutné stále sofistikovanější teoretické modely a potřeba detailně porozumět sledovaným procesům.

Pro konstrukci loupacích strojů semen olejnin je nutné zcela porozumět jak dějům probíhajícím při samotném procesu loupání, tak i mechanickým vlastnostem chování jednotlivých semen v závislosti na různých fyzikálních vlastnostech. To otevírá možnosti pro výzkum a následný popis chování semen pomocí modelů. Důležité je rovněž i nalezení cesty pro aplikaci získaných poznatků do prostředí vývoje konstrukcí technologických linek, v tomto případě loupacích strojů.

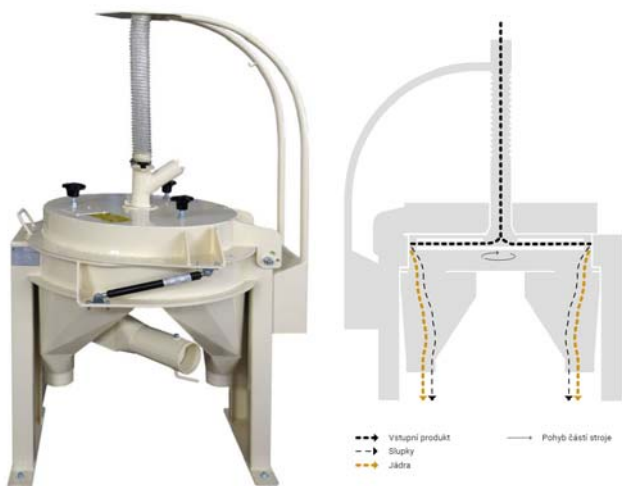
Právě touto cestou se vydává tato disertační práce. V následující kapitole je popsán stav současného vědeckého poznání a jsou nalezena místa, pro která je možno poznání dále prohloubit a rozšířit.

## **1.2 Technologie loupání olejnin**

Loupání semen olejnin, zejména slunečnice, je průmyslově nejčastěji realizováno pomocí impaktních strojů. Ty jsou založeny na loupání semen nárazem, při kterém dochází k porušení integrity slupky. Slupka po nárazu z jádra semene odpadne ve formě úlomků sestávajících se ze dvou nebo více kusů.

Loupací stroj je z hlediska konstrukce nejčastěji složen z rotoru, statoru a vnějšího pláště. Pohonem je zpravidla elektromotor řízený frekvenčním měničem z důvodu nastavení požadovaných otáček vhodných pro jednotlivé plodiny nebo odrůdy. Stroje jsou konstruovány s jednoduchým servisním vstupem pro snadnou výměnu rotorových lopatek a dopadových ploch, neboť dochází k jejich velkému abrazivnímu opotřebení.

V České republice existují dva výrobci a dodavatelé technologií pro zpracování semen olejnin, přičemž oba disponují vlastní vývojovou, konstrukční, projekční a výrobní kapacitou. Jedná se o firmy Farnet a. s. a JK Machinery, s.r.o. Ukázka impaktního stroje z portfolia druhé z těchto firem je zobrazena na Obr. 1.



Obr. 1: Ukázka loupacího stroje JHI 05 s vertikální osou rotace, převzato z [2]

### 1.3 Hodnocení kvality loupání

Proces hodnocení kvality loupání semen olejnin je důležitým zpětnovazebním prvkem jak pro návrh konstrukce a vnitřní geometrie loupacích strojů, tak i pro konkrétní nastavení loupacího stroje v technologické lince v závislosti na vlastnostech konkrétní plodiny nebo odrůdy semene olejnin.

Nebyly dohledány žádné veřejně dostupné odborné publikace popisující metodiku hodnocení kvality vyloupání semen olejnin. Zároveň nebyl jednoznačně a univerzálně popsán ani žádný ucelený soubor vlastností nebo veličin, který by úspěšnost vyloupnutí semen olejnin definoval.

### 1.4 Matematické modely mechanického chování semen olejnin

Při konstrukci strojů a zařízení pro zpracování zemědělských produktů se většinou vychází z matematických modelů popisujících proces zpracování dané plodiny. Nejinak je tomu u modelování semen olejnin, přičemž většina pozornosti ve výzkumu tohoto odvětví je směřována na matematické modely



popisující proces lisování. Stanovení matematických modelů daných procesů vyžaduje pochopení jejich fyzikální podstaty a znalost proměnných, které jakkoliv zasahují do samotného procesu.

Závislost síly na deformaci při lineárním lisování olejin lze popsat tangentsní křivkou dle vztahu (1). Tangentsní popis totiž splňuje mezní podmínky lineárního experimentu. Při nulové lisovací síle je deformace nulová, a naopak při nárůstu lisovací síly k nekonečnu je dosaženo maximální deformace. [3]

$$F_{(\Delta l)} = A \cdot [\tan(B \cdot \Delta l)]^n \quad (1)$$

Reologické modely semen olejin se zabývají vztahem napětí, deformace a času. Přírodní materiály, které jsou vystaveny vnějšímu silovému působení se chovají jako viskoelastické materiály. Reologické modely jsou popsány matematickými rovnicemi (2) a (3), přičemž pro stanovení koeficientů těchto rovnic se nejčastěji využívá zkoušek tečení (creepu) a relaxace. [4]

$$x_{(t)} = \frac{\sigma}{E_1} \cdot L + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}\right) \cdot L + \frac{\sigma}{E_3} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t}\right) \cdot L \quad (2)$$

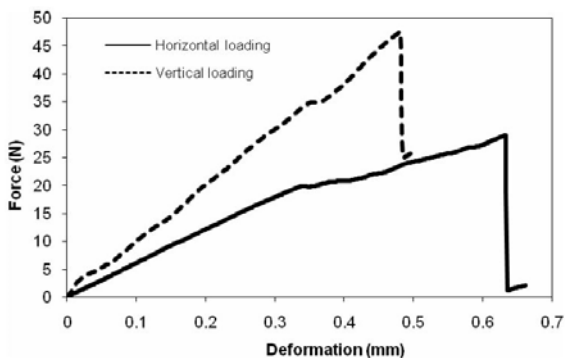
$$\sigma_{(t)} = \varepsilon \cdot E_1 + \varepsilon \cdot E_2 \cdot e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} + \varepsilon \cdot E_3 \cdot e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t} \quad (3)$$

Na proces loupání semen olejin nemají jejich reologické modely zásadnější vliv. Okamžik nárazu a vyloupenutí se odehrává ve zlomkovém časovém intervalu limitně blízcím se nule. Po respektování této úvahy ve vztazích (2) a (3) se modely zredukuje na pouhý Hookeův elastický člen.

Existují i konečněprvkové modely semen slunečnice, avšak nebyly nalezeny dostatečně přesné modely, které by plně respektovaly jejich morfologickou strukturu. Sofistikovanější konečněprvkové modely byly nalezeny pro jiné plodiny, např. semene *Jatrophy curcas* L. (dávivec černý).

## 1.5 Odolnost slupky proti porušení

Silové a energetické veličiny potřebné k porušení slupky semene olejnin mají zásadní vliv pro návrh konstrukce loupacích strojů. Stanovení této síly může ovlivnit např. správné nastavení otáček motoru loupacích strojů a tím optimalizovat energetickou náročnost. Vzhledem ke tvaru slunečnicového semene lze tyto charakteristiky sledovat ve třech různých navzájem kolmých směrech. Většina studií zabývajících se touto problematikou však zkoumá pouze dva směry zatížení, a to zatížení ve směru podélném (vertical loading) a ve směru přes dělicí hranu (horizontal loading), viz. Obr. 2.



Obr. 2: Deformační charakteristika slunečnicového semene s vlhkostí 1,8 % w.b. ve dvou různých směrech zatížení, převzato z [5]

## 1.6 Závěry plynoucí z přehledu problematiky

Přehled problematiky lze shrnout do následujících stěžejních bodů:

- Loupání semen olejnin, obzvláště slunečnice, probíhá v dnešní době v převážné většině na odstředivých impaktních strojích (vyloupení je dosaženo nárazem).
- Pro účely potravinářského průmyslu je snaha získat co největší množství celých a neporušených slunečnicových jader, v olejářském průmyslu je snaha snížit rozdrčenou prachovou složku a dobře vyseparovat úlomky jader od slupek.

- Neexistuje žádná jednoznačná a veřejně dostupná metodika pro hodnocení kvality vyloupání semen olejnin.
- Není definována žádná veličina popisující stav vyloupenutí semen olejnin.
- Vlhkost má zásadní vliv na ostatní fyzikální vlastnosti semen olejnin, zejména na jejich třecí vlastnosti, rozměrové vlastnosti a hmotnost, sílu potřebnou k porušení jejich slupky, ale i na výtěžnost oleje při mechanickém lisování.
- Při modelování semen je nutné respektovat jejich morfologickou strukturu, zejména fakt, že jádro není pevně spojeno se slupkou.
- Vzhledem k velkým rychlostem semen při nárazu v impaktních loupacích strojích je postačující v reologických modelech uvažovat jen Hookeův pružný člen.
- Sílu potřebnou k porušení slupky lze změřit formou lineárního lisování na drobných trhacích strojích a pružinoměrech.
- Vzhledem ke tvaru slunečnicového semene lze sílu potřebnou k porušení slupky definovat ve třech navzájem kolmých směrech. Studie, které se touto problematikou zabývají, definují tuto sílu jen ve dvou z těchto směrů, případně se o směru zatěžování nezmiňují.
- Neexistují žádné studie ani odborná literatura, která by dávala do přímé souvislosti vliv orientace a velikosti síly potřebné k porušení slupky s konstrukčním návrhem vnitřní geometrie loupacích strojů.

## 2 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je v oblasti vědeckého poznání poskytnout nové dosud nepublikované poznatky zaměřené na mechanické chování semen slunečnice při procesu jejich loupání a nalézt cestu pro aplikaci těchto poznatků do prostředí vývoje konstrukcí průmyslových impaktních loupacích strojů. K naplnění hlavního cíle disertační práce dojde dosažením dílčích cílů, které plynou ze závěrů přehledu problematiky.

- **Stanovení vlivu orientace zatížení ve třech navzájem kolmých směrech na porušení slupky slunečnicového semene.**
  - Popis mechanického chování slunečnicového semene pod zatížením ve třech navzájem kolmých směrech a sestavení jeho deformačních modelů.
  - Sestavení energetických modelů pro predikci porušení slupky.
  - Návrh konstrukce zařízení simulující prostředí impaktního loupacího stroje a ověření sestavených modelů experimentálním měřením nárazu semen.
- **Problematika hodnocení kvality loupání semen olejin.**
  - Definice veličin popisujících kvalitu loupání slunečnicových semen a návrh metodiky pro jejich vyhodnocení.
  - Konstrukční návrh zařízení pro vyhodnocení kvality loupání slunečnicových semen dle navržené metodiky.
- **Přenesení získaných poznatků do prostředí vývoje konstrukcí průmyslových impaktních loupacích strojů.**
  - Analýza kinematických charakteristik chování slunečnicových semen uvnitř impaktního loupacího stroje během procesu loupání.
  - Návrh inovativního konstrukčního řešení.

### **3 Materiály a použité metody**

V rámci disertační práce byla pro splnění cílů navržena, provedena a zpracována tato experimentální měření:

- měření síly a deformace potřebné k porušení slupky slunečnicového semene v závislosti na orientaci zatížení,
- experimentální ověření energetického modelu predikce porušení slupky semene nárazem simulující prostředí loupacího stroje.

K experimentům pro měření síly a deformace potřebné k porušení slupky a k ověření energetického modelu byla použita merkantilní slunečnice dodaná firmou FABIO PRODUKT spol. s r.o. Vlhkost semen při obou experimentech byla 4,83 % w.b.

### 3.1 Měření síly a deformace potřebné k porušení slupky slunečnicového semene v závislosti na orientaci zatížení

Při porušení integrity slupky dojde ke skokovému poklesu působící síly. To lze pozorovat např. na ukázce naměřeného deformačního diagramu na Obr. 3. V rámci disertační práce je tento bod porušení integrity slupky označován jako kritický bod, síla potřebná k jeho dosažení jako kritická síla  $F_{krit}$  a deformace, při níž dochází k prasknutí, jako kritická deformace  $\Delta l_{krit}$ .



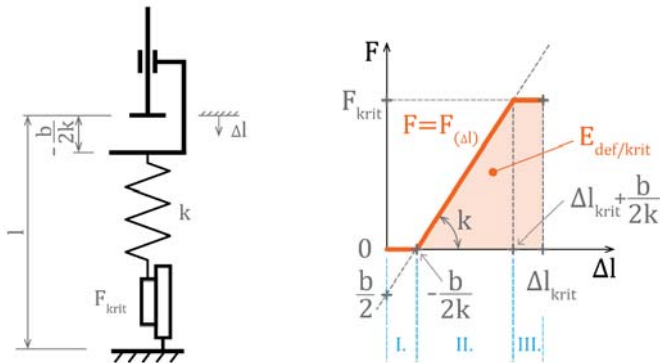
Obr. 3: Ukázka naměřeného deformačního diagramu vzorku 28C s vyznačeným bodem porušení slupky

Navržený deformační model vychází z principu Hookeova pružného členu rozšířeného o počáteční oblast zpevnění a koncovou oblast plastických deformací. Deformační model je rozdělen do částí I., II. a III. dle Obr. 4.

V oblasti I. deformačního modelu se předpokládá se zvyšující se deformací jen malý nárůst působící síly (v modelu popsán jako nulový) zapříčiněný počátečními plastickými mikro-deformacemi, případně zpevněním vláken slupky. Podobné chování biologického materiálu bylo popsáno například ve studii [6] při modelování mechanického chování vlákna *Ensete ventricosum* (banánovník habešský).

V oblasti II. deformačního modelu se předpokládá elastické lineární chování, kde poměr síly a deformace je svázán tuhostí  $k$ . Metodika určení tuhosti z naměřených dat je detailněji popsána v disertační práci.

Oblast III. deformačního modelu představuje tzv. „bioyield point“, který je typický pro biologické materiály, popsány např. ve studii [7]. Tato oblast často předchází bodu porušení integrity vzorku biologického materiálu a je typická minimálním nárůstem síly se zvětšující se deformací. Ostatními studii je toto chování přirovnáno například k dobře známé a popsané plasticitě.



Obr. 4: Deformační model slunečnicového semene

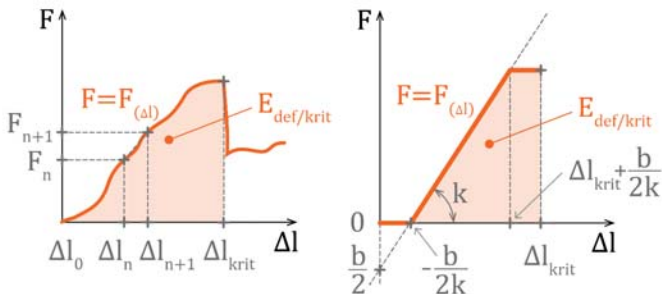
$$F_{(\Delta l)} = \begin{cases} 0 & \text{pro } \Delta l < -\frac{b}{2 \cdot k} \\ k \cdot \Delta l + \frac{b}{2} & \text{pro } -\frac{b}{2 \cdot k} \geq \Delta l > \Delta l_{krit} + \frac{b}{2 \cdot k} \\ F_{krit} & \text{pro } \Delta l \geq \Delta l_{krit} + \frac{b}{2 \cdot k} \end{cases} \quad (4)$$

Určení velikostí oblastí I. a III., tedy určení hodnoty konstanty posunutí  $b$ , je zásadní pro definování tvaru modelu. Důvod stanovení velikosti těchto oblastí jako stejných (v poměru 1:1) vychází ze snahy o symetričnost modelu a také z porovnání naměřených charakteristik, kdy se v některých případech oblast I. nevyskytuje a oblast III. je oproti ní výrazná a opačně. Poměr velikostí oblastí I. a III. s velikostí lineární oblasti II. je však velmi malý, proto rozdělení oblasti

I. a III. na stejně velké intervaly má na výsledný model jen malý vliv a snaží se být kompromisem popisující všechny naměřené charakteristiky.

V technické praxi bývá zvykem deformační modely uvádět také v souřadnicích  $\sigma - \varepsilon$ , kde  $\sigma$  je napětí vztažené k průřezu vzorku a  $\varepsilon$  je poměrná deformace vztažená k celkové délce. Pro účely aplikace získaných poznatků pro vývoj impaktních loupacích strojů se jeví výhodné deformaci nevztahovat k původní délce semene  $l$ , ale k jeho hmotnosti  $m$ , čímž vznikne veličina hmotnostně redukované deformace  $\Delta l_{red}$ . Výhodou hmotnostní redukce oproti rozměrové je určitá vazba na kinetickou energii semen získanou v rotoru odstředivých strojů. Detailní rozbor hmotnostně redukovaných vztahů je rozebrán v samotné disertační práci.

Pro účely aplikace poznatků experimentálně získaných dat do prostředí vývoje konstrukce impaktních loupacích strojů je vhodné dále zaměřit pozornost na veličiny energetické. V rotoru loupacích strojů semena získávají právě kinetickou energii, která se při nárazu do dopadových terčů mění v energii deformační a ta způsobuje prasknutí slupky.



Obr. 5: Dva principy stanovení kritické deformační energie – přímou integrací křivky (vlevo) a výpočtem z deformačního modelu (vpravo)

V této disertační práci jsou dle Obr. 5 uvažovány dva přístupy ke stanovení kritické deformační energie, a to stanovení  $E_{def/krit}$  přímou integrací deformační křivky a stanovení  $E_{def/krit}$  výpočtem z deformačního modelu. Tyto přístupy jsou dále v disertační práci porovnány.

### **3.2 Experimentální ověření energetického modelu predikce porušení slupky semene nárazem simulující prostředí loupacího stroje**

Cílem tohoto experimentálního měření je ověření použitelnosti modelů sestavených v předchozí kapitole při podmínkách simulujících skutečné prostředí loupacího stroje. Simulace prostředí loupacího stroje spočívá ve vystřelování jednotlivých semen vysokou rychlostí proti pevné překážce. Tento proces je snímán vysokofrekvenční kamerou a na základě obrazového zpracování je rozhodnuto, zda při nárazu došlo k porušení slupky případně k vyloupnutí.

U semen byla z obrazového záznamu vyhodnocena orientace jejich dopadu a jednotlivým dopadům byla přidělena logická binární hodnota určující porušení slupky. Jako semena s porušenou slupkou byla vyhodnocena i semena, kde nedošlo k úplnému oddělení slupky, ale z obrazového záznamu bylo dostatečně patrné, že došlo k jejímu výraznému porušení. Jako semena s neporušenou slupkou byla vyhodnocena semena, u kterých nedošlo k oddělení slupky od jádra ani nebylo pozorováno její výrazné porušení.

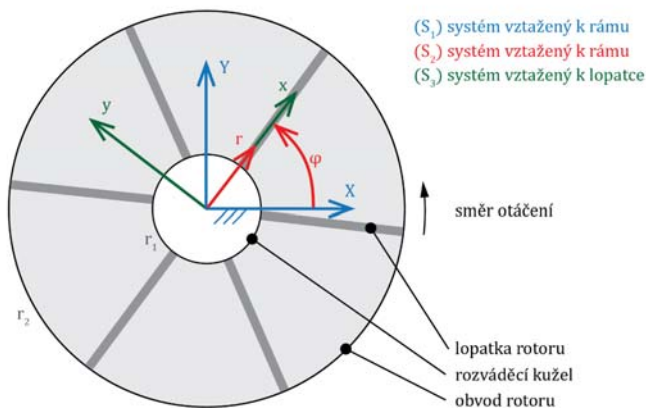
### **3.3 Analýza kinematických charakteristik pohybu semen v impaktních loupacích strojích**

Pro nalezení souvislostí mezi experimentálně získanými daty deformačních modelů slunečnicových semen a vnitřní konstrukcí impaktních loupacích strojů je nutné analyzovat a popsat kinematické charakteristiky pohybu semen uvnitř stroje.

Pro tyto účely je uvažováno klasické konstrukce loupacího stroje s lopatkovým rotorem, kde produkt k vyloupání je přiváděn v jeho ose rotace. Uprostřed rotoru je umístěn rozváděcí člen, nejčastěji ve formě kužele, který se stará o rovnoměrnou obvodovou distribuci semen. Vlivem odstředivé síly jsou semena lopatkou urychlována, rozhazována vysokou rychlostí po obvodu a následně loupána nárazem o vnější stator.



Semeno je uvažováno v rotoru jako hmotný bod a k vyšetření kinematických charakteristik je využito teorie současných pohybů. Souřadné systémy jsou zavedeny dle Obr. 6, přičemž snaha je vyjádřit kinematické charakteristiky v globálním souřadném systému  $S_1$  vztaženému k rámu loupacího stroje. Poloha a rychlost v systému  $S_1$  jsou vyjádřeny rovnicemi (5) a (6), kde radiální poloha semene v závislosti na čase  $x_{(t)}$  je vyjádřena rovnicí (7).



Obr. 6: Rotor loupacího stroje v obecné poloze se zavedenými souřadnými systémy

$${}^{(S_1)}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_{(t)} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \\ x_{(t)} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^{(S_1)}\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{(t)} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) - \omega \cdot x_{(t)} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \\ \dot{x}_{(t)} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) + \omega \cdot x_{(t)} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

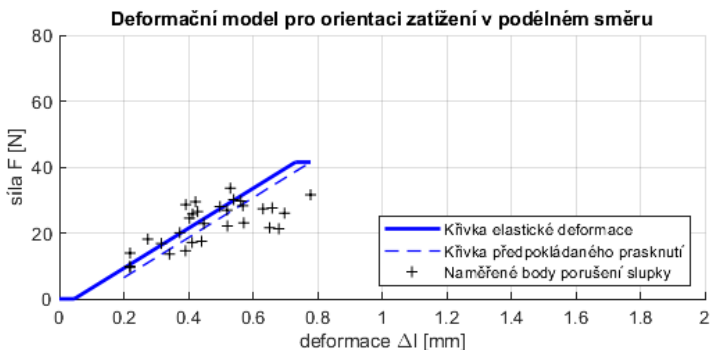
$$x_{(t)} = C_1 \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} + \frac{C}{k_2} \quad (7)$$

## 4 Výsledky a diskuze

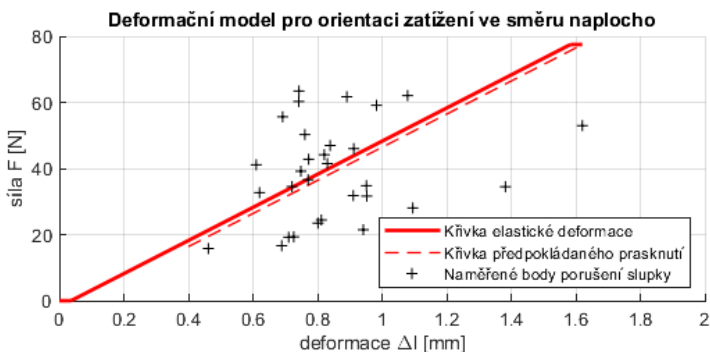
### 4.1 Stanovení deformačního modelu semene a deformačních energií potřebných k porušení slupky

Na základě experimentálně získaných dat byly zhotoveny deformační modely semen slunečnice ve třech různých směrech – ve směru podélném, ve směru naplocho a ve směru přes hranu. Ty jsou zobrazeny na Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9.

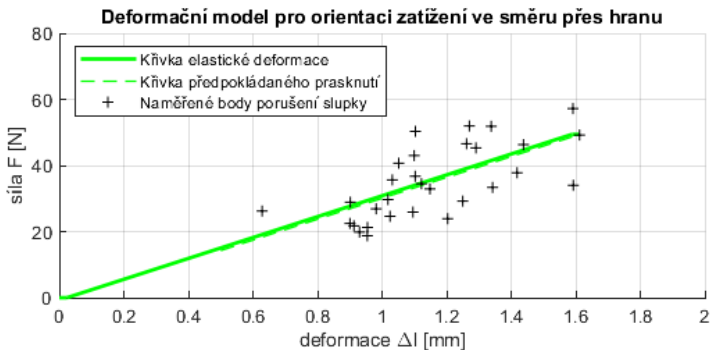
V práci byly rovněž popsány typické průběhy deformačních charakteristik v jednotlivých směrech a znázorněny typické tvary prasklin slupek.



Obr. 7: Deformační model semene pro orientaci zatížení v podélném směru

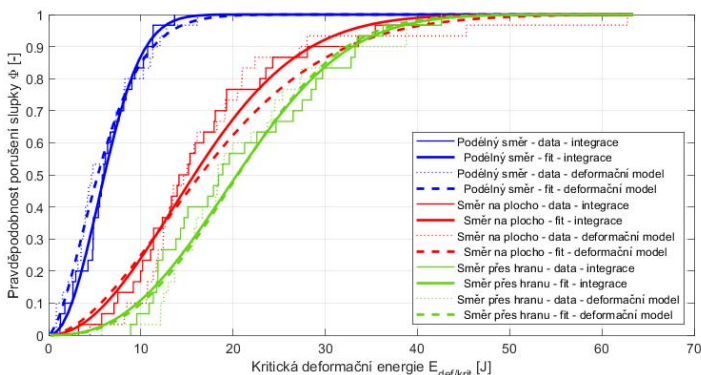


Obr. 8: Deformační model semene pro orientaci zatížení ve směru naplocho



Obr. 9: Deformační model semene pro orientaci zatížení ve směru přes hranu

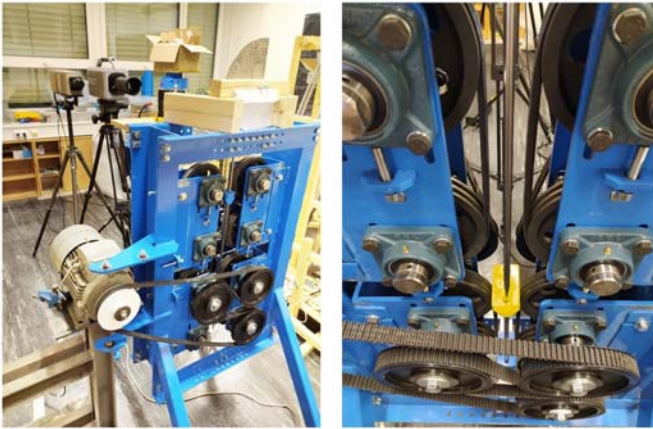
Výsledky zjištěných kritických deformačních energií je názorné vyjádřit ve formě distribuční funkce (kumulované pravděpodobnosti), viz Obr. 10. Experimentálně naměřená data byla aproximována spojitou funkcí. Z výsledného grafu lze tím pádem v závislosti na dodané deformační energii předpovědět, u kolika procent semen ze stejného vzorku při dané deformační energii dojde k porušení slupky. V grafu na Obr. 10 jsou zobrazeny distribuční křivky pro oba způsoby stanovení kritické deformační energie a vzájemně porovnány.



Obr. 10: Distribuční funkce kritických deformačních energií potřebných k porušení slupky v závislosti na směru zatížení

## 4.2 Experimentální ověření energetického modelu predikce porušení slupky semene nárazem simulující prostředí loupacího stroje

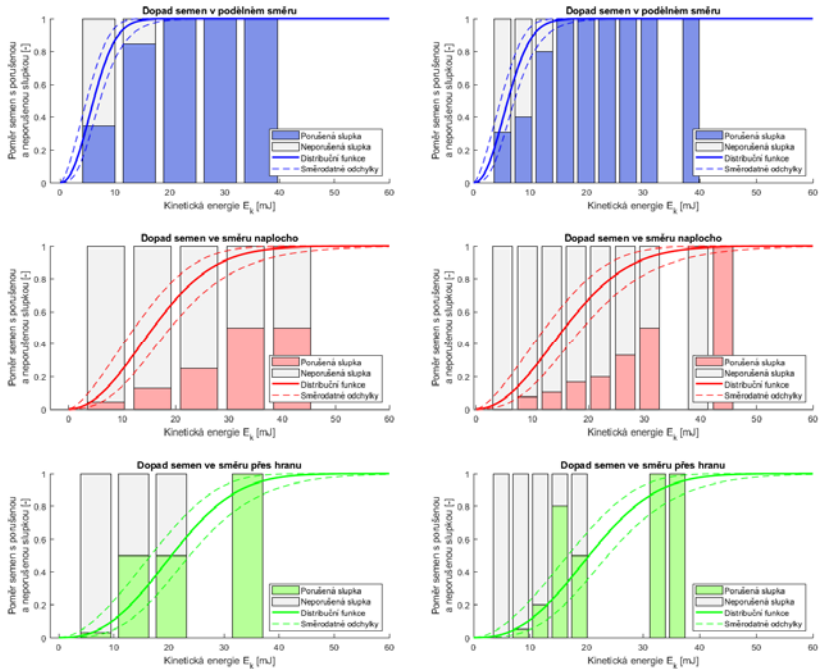
V rámci disertační práce bylo navrženo a realizováno experimentální stanoviště umožňující snímání nárazu jednotlivých semen, které lze vidět na Obr. 11. Rychlost semen byla určována pomocí navrženého programu v prostředí softwaru Matlab.



Obr. 11: Experimentální stanoviště pro snímání nárazu semen slunečnice

Pro vyhodnocení výsledků byla rozdělena mapa naměřených hodnot do několika energetických pásem (pro porovnání do pěti a deseti), jak lze vidět na Obr. 12., a v těchto energetických pásmech byl určen poměr vyloupaných a nevyloupaných semen. Výsledky jsou graficky porovnány s distribučními křivkami získanými z experimentálního měření deformací pomocí pružinoměru. Lze vidět, že v podélném směru a ve směru dopadu přes hranu si výsledky odpovídají, kdežto ve směru naplocho se data získaná simulací prostředí loupacího stroje značně odchyľují. Vysvětlení tohoto jevu lze hledat v mírně odlišném kritériu vyhodnocení těchto dvou experimentů. Tvar praskliny slupky při deformaci ve směru naplocho vzniká pouze nepatrná prasklina v bazální části semene, která byla vyhodnocena jako kritické prasknutí slupky, ale není dostatečná pro samotné vyloupaní, což bylo

kritériem vyhodnocení simulace loupacího stroje. Z důvodu kvality záznamu nebylo možné drobné praskliny ve slupce z obrazu detekovat. Pro ostatní dva směry došlo tímto k ověření použitelnosti sestavených deformačních modelů pro predikci vyloupenutí semen v průmyslových loupacích strojích.



Obr. 12: Vyhodnocení dat experimentálního měření nárazu semen v porovnání s daty získanými při měření deformací pomocí pružinoměru

Z výsledků je patrné, že nejvýhodnější orientací dopadu pro úspěšné vyloupenutí je směr podélný, následně přes hranu a nejméně vhodný naplocho.

### 4.3 Metodika hodnocení kvality loupání

Při definování veličin popisujících kvalitu loupání semen olejnin je nutné si uvědomit, že nelze rozlišovat mezi pouhými dvěma logickými stavy – semeno zcela nevyloupenuté a semeno zcela vyloupenuté – ale v závislosti na vstupních

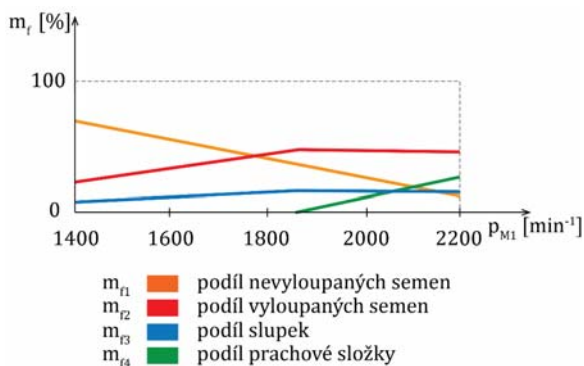
parametrech procesu loupání je možné mezi těmito dvěma stavy přecházet spojitě, i když tento přechod je pouze jednosměrný.

Veličina popisující kvalitu vyloupaní semen olejnin je disertační prací definována jako loupateľnost označená  $L$  a vyjadřuje hmotnostní poměry čtyř hlavních frakcí ve vyloupané směsi definovaných v Tab. 1.

frakce	popis frakce	označení hmotnostního podílu
$F_1$	nevylopaná semena	$m_{f1}$
$F_2$	vyloupaná semena	$m_{f2}$
$F_3$	slupky	$m_{f3}$
$F_4$	prachová složka	$m_{f4}$

Tab. 1: Popis čtyř hlavních frakcí loupané směsi semen olejnin pro definování kvality loupání

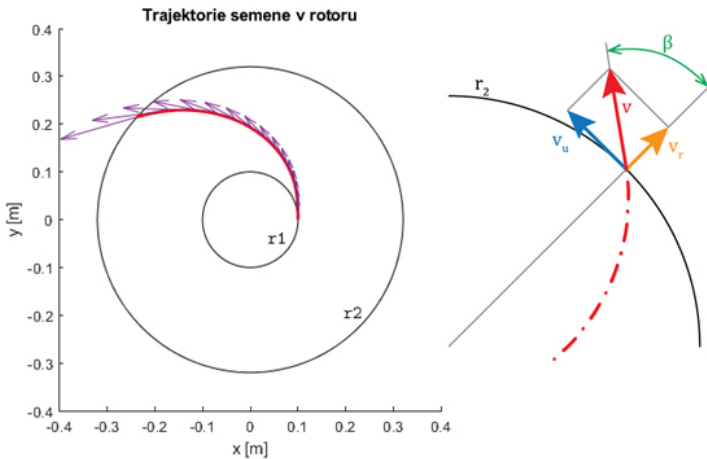
Vyjádřením funkcí hmotnostních podílů  $m_{f1}$  až  $m_{f4}$  v závislosti na parametrech nastavení zvolené metody loupání (loupacího stroje) vzniknou tzv. křivky loupateľnosti. Výřezem pro oblast nastavení běžného provozu loupacího stroje vzniknou částečné křivky loupateľnosti, které jsou vidět na Obr. 13. Pro vyhodnocení loupateľnosti vzorku bylo navrženo a zkonstruováno laboratorní stanoviště. Zvolené technické řešení je chráněno užitným vzorem PUV 2015-31860 Zařízení pro testování loupateľnosti olejnatých semen. [A9].



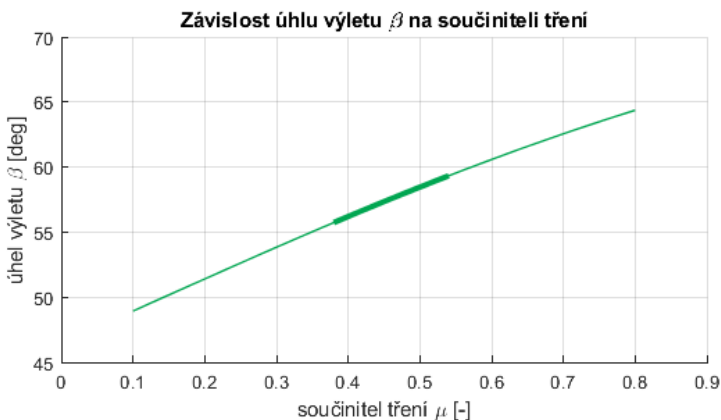
Obr. 13: Modelový příklad ukázky částečných křivek loupateľnosti jako funkce jedné proměnné nastavení zvolené metody loupání

#### 4.4 Výsledky kinematické analýzy

Pro vyčíslení rovnic (5) a (6) byly použity rozměry loupacího stroje FH2000 od společnosti Farnet a.s. Pro jmenovité otáčky loupacího stroje byly spočteny radiální (relativní) a tečné (unášivé) rychlosti a jejich poměrem stanoven úhel výletu  $\beta$ . Tento úhel výletu lze v rozmezí otáček 1000 až 2000  $\text{min}^{-1}$  považovat s dostatečnou přesností za funkčně závislý pouze na součiniteli tření mezi slunečnicovým semenem a rotorovou lopatkou, a to dle Obr. 15.



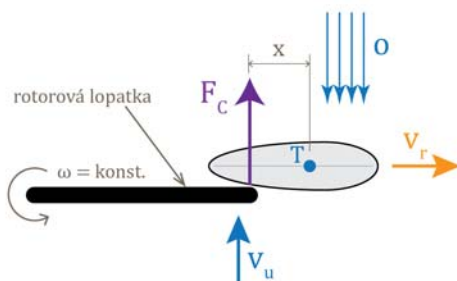
Obr. 14: Trajektorie semen v rotoru loupacího stroje a zavedený úhel výletu



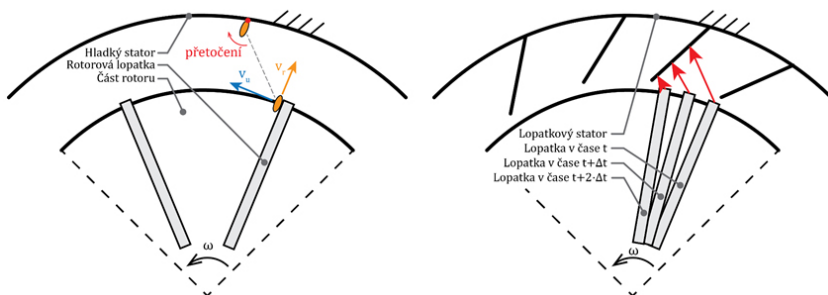
Obr. 15: Závislost úhlu výletu na součiniteli tření pro otáčky 1000-2000  $\text{min}^{-1}$

Způsob, jakým semeno opouští rotorovou lopatku, má vliv na jeho následný dopad na vnější stator. Síly působící na semeno v okamžiku opuštění rotorové lopatky lze předpokládat dle Obr. 16. Vzhledem k velikosti působících sil je možné zanedbat vliv gravitační síly a situaci řešit jako rovinný problém. Situaci v rotoru stroje díky vysokým rychlostem nelze předpokládat jako bezodporovou, proto je na schématu Obr. 16 zaveden odpor prostředí proti směru pohybu rotorové lopatky.

Na základě silového rozboru lze předpokládat, že je při opuštění lopatky semenu udělen krátký silový impulz k jeho rotaci, a to v opačném smyslu, než je směr otáčení rotoru.



Obr. 16: Silové poměry v okamžiku opuštění rotorové lopatky



Obr. 17: Schéma nárazu při použití hladkého (vlevo) a lopatkového (vpravo) statoru

Na Obr. 17 jsou zobrazeny dva běžně používané typy statorů – hladký a lopatkový. Výhodou první varianty je zaručení konstantní dráhy letu, avšak



při nárazu dochází k přetočení, a částečnému odvalení semene po statoru tak, že k vyloupení dochází v jeho nejstabilnější poloze naplocho, což je z energetického hlediska nejhorší možná orientace. Zároveň má po nárazu semeno kvůli vysoké unášivé rychlosti tendenci smýkat se dále po statoru a vlivem abraze dochází k tvorbě nežádoucí prachové složky.

Nevýhodou druhé varianty (lopatkového statoru) je rozdílná délka dráhy letu semen od opuštění rotorové lopatky do nárazu. To je důležité zejména při respektování silových poměrů z Obr. 16, kdy při opuštění rotorové lopatky je semenu udělen silový impuls k jeho rotaci. Z důvodu rotace semene a rozdílné délky dráhy letu není v této konstrukční variantě možnost kontroly orientace semene při dopadu.

## **5 Inovace technologie loupání**

Experimentálním měřením byly určeny síly a deformace potřebné k porušení slupky při zatížení semen pod lisem ve třech různých navzájem kolmých směrech. Z průběhu deformačních křivek byly stanoveny kritické deformační energie při prasknutí. Z výsledků tohoto experimentu na Obr. 10 je patrné, že nejméně deformační energie je potřebné pro porušení slupky v podélném směru, zatímco nejvíce energie je nutné při zatížení přes hranu.

Porovnáním těchto výsledků s výsledky experimentálního měření porušení slupky impaktním způsobem se potvrzuje korespondence naměřených dat pro podélný směr zatížení a směr zatížení přes hranu, zatímco výsledky při zatížení ve směru naplocho si viditelně neodpovídají. To je přisuzováno zvolenému kritériu vyhodnocení porušení slupky. Rozdílnost výsledků je zapříčiněna tvarem a velikostí praskliny při směru zatížení naplocho, kdy její velikost je nedostatečná pro oddělení slupky a jádra a případné malé porušení slupky není z nasnímaných obrazových záznamů rozpoznatelné.

Z hlediska požadavku na vyloupení (oddělení slupky a jádra) semena impaktním způsobem tento experiment ukazuje, že existuje závislost mezi potřebnou energií k vyloupení semene a směrem působícího zatížení, tedy že orientace semene při nárazu má vliv na jeho vyloupení. Nejvýhodnější

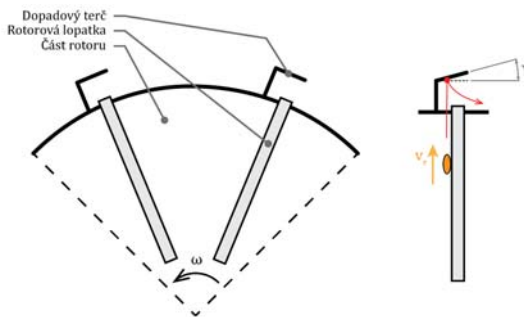
orientací dopadu z hlediska potřebné energie při impaktním loupání semen je dle výsledků náraz semen v podélném směru a nejméně výhodný je náraz ve směru naplocho.

Z kinematického rozboru loupacího stroje FH2000 plyne, že v běžném provozním rozsahu otáček jsou rychlost a úhel výletu semen z rotoru funkčně závislé pouze na otáčkách rotoru a součiniteli tření mezi dvojicí semena a rotorové lopatky. Součinitel tření je nejvíce ovlivněn vlhkostí semen, kterou je však možné před loupáním stanovit. Protože rychlost a úhel výletu semen z rotoru nejsou funkčně závislé na hmotnosti semen, jsou tyto dva parametry stejné pro libovolně velké (těžké) semeno.

Z rozboru stávajících konstrukčních řešení plyne, že existují principiálně dva druhy vnějších nárazových statorů, hladký a lopatkový, přičemž každý má své výhody a nevýhody. U hladkého statoru sice mají všechna semena stejnou dráhu letu, ale při nárazu je jednak využita jen relativní složka rychlosti a jednak z důvodu vysoké unášivé rychlosti semena po nárazu přetácejí, dochází částečně k jejich odvalu a po hladkém statoru kloužou a vlivem abraze vzniká podíl nežádoucích prachové složky. Při použití lopatkového statoru je sice při nárazu využita plná rychlost semene, avšak při rovnoměrné distribuci semen po obvodu není nikdy zajištěna konstantní dráha letu. Ze silového rozboru při opouštění lopatky vyplývá závěr, že je semenu udělen silový impulz k jeho rotaci během letu. Při různé délce dráhy letu nemůže být zajištěn náraz vždy ve stejné orientaci, což dle výsledků experimentů má vliv na množství vyloupaných semen.

S využitím navržené metodiky vyhodnocení kvality loupání bude možné po realizaci prototypu navrženého inovativního konstrukčního řešení porovnat stanovenou veličinou loupateľnosti jeho přínos.

Myšlenkově vychází inovace konstrukčního řešení ze skloubení výhod hladkého a lopatkového statoru a snaží se nalézt takové řešení, při kterém je zaručena konstantní délka dráhy letu všech semen pro zajištění jejich stejné orientace při nárazu, a zároveň nedochází při nárazu k přetáčení semen a ke smýkání semen po statoru vlivem velké unášivé rychlosti.

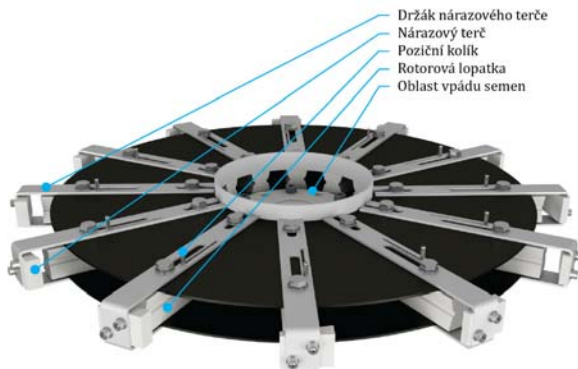


Obr. 18: Schématické řešení inovativního konstrukčního návrhu

Toho je docíleno spojením nárazových terčů s rotorovými lopatkami podle Obr. 18 tak, že dopadové terče původně umístěné pevně na vnějším statoru rotují společně s rotorem. Případným mírným natočením dopadových terčů o úhel  $\gamma$  je zabráněno odrazu semene do stejného směru zpět na lopatku.

Nevýhodou tohoto konstrukčního řešení je efektivní využití pouze relativní složky rychlosti, a tudíž jsou k dosažení potřebné rychlosti nárazu nutné vyšší otáčky rotoru. Tím roste energetická náročnost provozu zařízení.

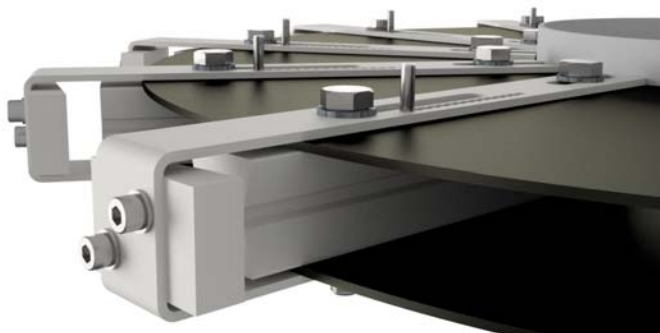
V rámci disertační práce je řešen inovativní konstrukční návrh rotoru pro loupací stroj FH 2000 od firmy Farnet a.s. Konstrukční návrh je zpracován tak, aby byl použitelný bez větších zásahů do rámu stroje a aby byl kompatibilní se stávající přírubou uložení rotoru.



Obr. 19: Konstrukční návrh inovativního řešení rotoru loupacího stroje

Zároveň jsou v konstrukčním návrhu dodrženy rozměry a umístění rotorových lopatek stanovených v úvodu kapitoly 4.4 tak, aby bylo možné pro nové řešení aplikovat výsledky kinematické analýzy kapitolou 4.4 popsané.

Navržené konstrukční řešení je řešeno jako prototyp s ohledem na možnosti testování nastavení délky dráhy letu a možnosti výměny nárazových terčů s různou geometrií bez nutnosti demontáže rotoru jako celku. Navržené řešení rotoru loupacího stroje lze vidět na Obr. 19 a Obr. 20.



Obr. 20: Detailní pohled na provedení uchycení nárazových terčů v držáku

Navržené konstrukční řešení je původní a nekoliduje s jinými průmyslově chráněnými řešeními. Zvolené technické řešení je chráněno patentem PV 2015-898 Zařízení pro loupání, zejména rostlinných olejnatých semen. [A8]

Výroba prototypu navrženého inovativního konstrukčního řešení a následné testování v souladu s navrženou metodikou pro hodnocení kvality loupání je předpokládaným dalším pokračováním navázané spolupráce s firmou Farnet a. s.

## **6 Závěr**

V disertační práci bylo popsáno mechanické chování semen slunečnice při deformaci ve třech definovaných navzájem kolmých směrech formou deformačních modelů pro jednotlivé směry. To je vyplněním neprozkoumaného prostoru ve vědeckém poznání, které doposud zkoumalo

síly, deformace a energie potřebné k porušení slupky slunečnicového semene pouze ve dvou směrech – horizontálním a vertikálním. Z naměřených dat byly formou distribučních křivek sestaveny energetické modely predikce porušení slupky pro jednotlivé směry, které jsou přenositelné do praxe do prostředí vývoje konstrukcí impaktních loupacích strojů.

Byla navržena metodika pro hodnocení kvality loupání pro zvolenou metodu loupání, přičemž byla pro tyto účely definována veličina loupatelnosti. Vynesením této veličiny v závislosti na proměnných parametrech zvolené metody loupání vznikají křivky loupatelnosti, ze kterých lze pro danou plodinu s ohledem na požadované vlastnosti vyloupané směsi zjistit optimální nastavení parametrů zvoleného stroje. Navržená metodika byla podpořena konstrukčním návrhem a realizací zařízení pro vyhodnocení loupatelnosti.

V disertační práci byla provedena detailní analýza kinematických charakteristik pohybu semen v rotoru během procesu loupání a syntézou s poznatky získanými z experimentálních měření byla nalezena cesta aplikace těchto poznatků do prostředí vývoje konstrukcí impaktních loupacích strojů. To je prokázáno návrhem inovativního konstrukčního řešení, které z této syntézy vychází a jemuž byla udělena patentová ochrana. Realizace prototypu a zhodnocení výsledků pomocí navržené metodiky je předmětem pokračování navázané spolupráce mezi Ústavem konstruování a částí strojů a firmou Farnet a. s.

K naplnění hlavního cíle práce došlo dosažením a splněním všech vytčených dílčích cílů, jejichž rozbor a diskuze výsledků jsou uvedeny výše. Principy a metody uvedené v disertační práci jsou aplikovány na semena slunečnice, nicméně jsou dobře zobecnitelné na širší spektrum semen olejin.

Práce nebo její části vznikly za podpory projektu Technologické agentury České republiky TA04010992 „Výzkum a vývoj technologií získávání rostlinných olejů a výlisků s důrazem na kvalitu výlisků jako krmiv a na vhodnost použitých konstrukčních materiálů, a projektů Českého vysokého učení technického v Praze SGS18/126/ OHK2/2T/12 „Kontinualizace třídícího

procesu laboratorní třídící linky“ a SGS20/114/OHK2/2T/12 „Zkoumání kvalitativních parametrů loupání olejnatých semen“.

## Publikace související s tématem disertace

- [A1] HOIDEKR, Jan, Jan ANDRUŠ a Vojtěch DYNBYL. The Mathematical Description of Sunflower Seed's Hulling Process Using Impact Huller. DYNBYL, Vojtěch, Ondřej BERKA, Karel PETR, František LOPOT a Martin DUB. *The Latest Methods of Construction Design*. 1. Cham: Springer International Publishing, 2016, s. 203-206. ISBN 9783319227610.
- [A2] HOIDEKR, Jan, Martin MACHAČ a Oskar TUREK. Determining coefficient of friction between oilseeds and rotor blade of hulling machine using equation of motion. In: *EAN 2019 57th conference on experimental stress analysis CONFERENCE PROCEEDINGS*. Praha: Česká společnost pro mechaniku, 2019, s. 121-124. ISBN 978-802145766-9.
- [A3] HOIDEKR, Jan a Vojtěch DYNBYL. Dynamic Analysis of Vibrating Sorter and Description of Optical Methods for Experimental Verification. In: *Current Methods of Construction Design: Proceedings of the ICMD 2018*. Springer International Publishing, 2020, s. 279-285. ISBN 978-3-030-33145-0. ISSN 2195-4356.
- [A4] HOIDEKR, Jan. Design of Machine for Testing the Quality of Oilseed Hulling. In: *Proceedings of 60th International Conference of Machine Design Departments*. (vydání sborníku ve fázi procesu).

- [A5] TUREK, Oskar a Jan HOIDEKR. Popis kmitání vibrační třídičky s více stupni volnosti pomocí numerických metod. In: MORAVEC, Jiří. *Studentská tvůrčí činnost 2018*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-06421-4.
- [A6] MACHAČ, Martin a Jan HOIDEKR. Vyhodnocení experimentálního měření kmitání vibrační třídičky pomocí optické metody. In: MORAVEC, Jiří. *Studentská tvůrčí činnost 2018*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-06421-4. Dostupné také z: <http://stc.fs.cvut.cz/history/2018/sbornik/index.html>
- [A7] PRACHENSKÝ, Jan a Jan HOIDEKR. Optická třídící linka pro zpracování vzorku olejnatých semen. In: MORAVEC, Jiří. *Studentská tvůrčí činnost 2019*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019. ISBN 978-80-01-06564-8. Dostupné také z: <http://stc.fs.cvut.cz/history/2019/sbornik/index.html>
- [A8] HOIDEKR, Jan, Vojtěch DYNBYL, Aleš MODRÝ a Jiří HANUŠ. *Zařízení pro loupání, zejména rostlinných olejnatých semen*. Česká republika. PV 2015-898. Uděleno 15. 3. 2017. Dostupné také z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/306/306665.pdf>
- [A9] HOIDEKR Jan. *Zařízení pro testování loupatelnosti olejnatých semen*. Česká republika. PUV 2015-31860. Uděleno 12. 4. 2016. Dostupné také z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0029/uv029344.pdf>



## Seznam použité literatury v tezích

- [1] Technická informace na dodávku technologického zařízení loupání a separace slupek. Česká Skalice: Farmet a. s., 2014.
- [2] JHI Nárazové loupačky - JK Machinery s.r.o. *JK Machinery s.r.o.* [online]. [cit. 2020-11-20]. Dostupné z: <https://www.jk-machinery.cz/stroje/jhi-narazove-loupacky/>
- [3] HERAK, D., G. GURDIL, A. SEDLACEK, O. DAJBYCH a S. SIMANJUNTAK. Energy demands for pressing *Jatropha curcas* L. seeds. *Biosystems Engineering*. 2010, **106**(4), 527-534. ISSN 15375110. Dostupné z: doi:10.1016/j.biosystemseng.2010.06.002
- [4] DIVIŠOVÁ, Monika. *Mechanické chování semen olejnin pod tlakovým zatížením*. Praha, 2020. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. David Herák, Ph.D.
- [5] JAFARI, S., J. KHAZAEI, A. ARABHOSSEINI, J. MASSAH a M.H. KHOSHTAGHAZA. Effects of some parameters on fracture resistance of sunflower seed. *Cercetari agronomice in Moldova*. 2011, **44**(3). ISSN 2067-1865. Dostupné z: doi:10.2478/v10298-012-0037-2
- [6] MIZERA, Cestmir, David HERAK, Petr HRABE, Miroslav MULLER a Abraham KABUTEY. Mechanical Behavior of *Ensete ventricosum* Fiber Under Tension Loading. *Journal of Natural Fibers*. 2016, **14**(2), 287-296. ISSN 1544-0478. Dostupné z: doi:10.1080/15440478.2016.1206500
- [7] VOICU, Gheorghe, Sorin-Stefan BIRIS, Elena-Madalina STEFAN, Gabriel- ALEXANDRU a Nicoleta UNGUREANU. Grinding Characteristics of Wheat in Industrial Mills. *Food Industry*. InTech, 2013, 2013-01-16. ISBN 978-953-51-0911-2. Dostupné z: doi:10.5772/53160

## **Anotace**

Tato disertační práce se zabývá problematikou loupání slunečnicových semen pomocí impaktních loupacích strojů. V rámci disertační práce jsou provedeny dvě experimentální měření zabývající se vlivem orientace zatížení na proces porušení slupky. Na základě naměřených dat jsou sestaveny deformační modely semen pro jednotlivé směry zatížení a energetické modely pro predikci porušení slupky. V disertační práci je rovněž provedena detailní analýza kinematických charakteristik pohybu semene uvnitř loupacího stroje během procesu loupání a syntézou s poznatky získanými z experimentálních měření je nalezena cesta aplikace těchto poznatků do prostředí vývoje konstrukcí impaktních loupacích strojů, což je podpořeno návrhem inovativního konstrukčního řešení. V rámci této práce je rovněž definována veličina loupateľnosti popisující kvalitu vyloupání semen olejin a je navržena metodika jejího vyhodnocení.

## **Summary**

This dissertation thesis deals with the issue of hulling sunflower seeds using impact hulling machines. As part of the dissertation, two experimental measurements are performed dealing with the influence of load orientation on the hull rupture. Based on the measured data, deformation models of seeds for individual directions of loading and energy models for the prediction of hull rupture are compiled. The dissertation also performs a detailed analysis of the kinematic characteristics of the seed movement inside the hulling machine during the hulling process. By synthesis with the knowledge gained from experimental measurements is found a way to apply this knowledge to the development of impact hulling machines, which is supported by innovative construction design solution. Within this work, the quantity of hullability is defined, describing the quality of oilseed hulling, and a methodology for its evaluation is proposed.



