

Analýza loupání slunečnicových semen

Bc. Jan Hoidekr

Vedoucí práce: Ing. Jan Andruš

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou stroje pro loupání slunečnicových semen. Dopodrobna jsou rozebrány kinematické charakteristiky pohybu semen v rotoru loupačky, řešena je energetická náročnost stroje a experimentálně jsou zjištěny třecí a nárazové vlastnosti slunečnicových semen.

Klíčová slova

Loupání slunečnicových semen, teorie současných pohybů, energetická náročnost loupání slunečnice.

1. Úvod

Loupání slunečnicových semínek je jednou z úvodních operací technologického procesu zpracování olejnin. Slunečnicové semínko se skládá z jádra a slupky, přičemž obě dvě části se dále zpracovávají a využívají.

Při získávání oleje ze slunečnicových semen je před samotným lisováním nutné jádro zbavit slupky. To se děje v loupačce slunečnice a následné tříděče, kde jsou lehčí slupky odsávány a z jader je dále lisován olej.

Většina dnešních loupaček slunečnice pracuje na odstředivém principu, kdy jsou semínka sypána do vnitřního rotoru a vlivem odstředivé síly vrhána proti vnějšímu statoru, o který se rozbíjejí.

Tato práce se zabývá analýzou dějů, které nastávají v rotoru loupačky a při následném nárazu do statoru.

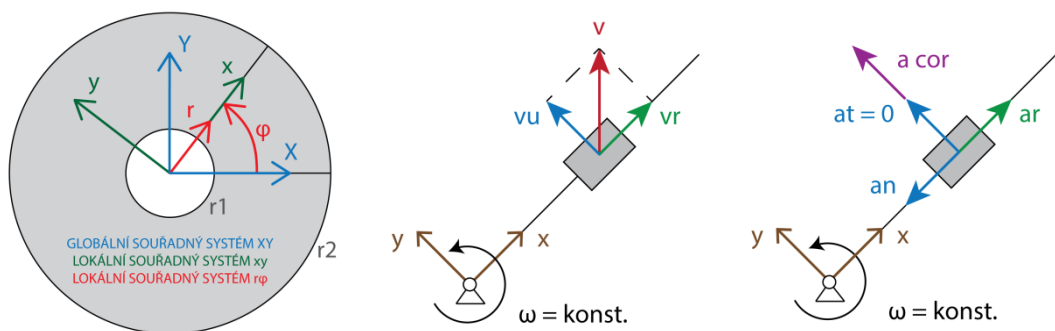
Projekt probíhá ve spolupráci s firmou Farnet a. s., která zároveň umožnila provedení navržených experimentů popsaných v této práci.

2. Kinematické charakteristiky pohybu semínka v rotoru

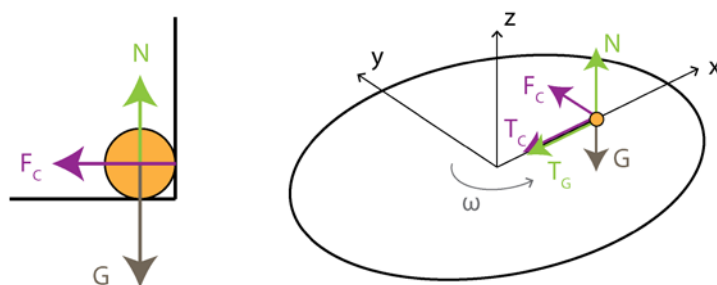
2.1. Řešení úlohy polohy a rychlosti jako funkce času

Kinematické charakteristiky pohybu semínka budeme řešit pro současně vyráběný stroj loupačky, který funguje na principu odstředivého loupání. Stroj se sestává z rotoru, v jehož středu jsou přiváděna semena slunečnice určená k vyloupání. Vlivem odstředivé síly jsou semena vrhána na vnější stator, do kterého narážejí a tím se loupou.

K řešení kinematických charakteristik pohybu semínka v rotoru využijeme teorie současných pohybů. Výsledný pohyb semínka rozdělíme na unášivý pohyb a relativní pohyb.



Obr. 1: Zavedené souřadné systémy a kinematické schéma současných pohybů



Obr. 2: Silové poměry na semínku

Při sestavování pohybových rovnic budeme vycházet z principu II. Newtonova zákona. Musí tedy platit Newtonova pohybová rovnice:

$$m \cdot \underline{a} = \sum \underline{F}. \quad (1)$$

$$m \cdot (\underline{a}_n + \underline{a}_r + \underline{a}_{cor}) = \underline{G} + \underline{N} + \underline{T}_G + \underline{F}_C + \underline{T}_C. \quad (2)$$

$$m \cdot \left(\begin{bmatrix} -\omega^2 \cdot x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \cdot \omega \cdot \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ F_C \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m \cdot g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -F_C \cdot \mu \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -N \cdot \mu \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Definujeme počáteční podmínky úlohy:

$$x(t=0) = r_1. \quad (4)$$

$$\dot{x}(t=0) = v_1. \quad (5)$$

Řešení této Cauchyho úlohy provedeme v programovém prostředí Matlab. Výsledné rovnice kinematických charakteristik mají tvar:

$$x(t) = C_1 \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} + \frac{C}{k_2}, \quad (6)$$

$$\dot{x}(t) = C_1 \cdot \lambda_1 \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + C_2 \cdot \lambda_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t}, \quad (7)$$

kde:

$$k_1 = 2 \cdot \omega \cdot \mu, \quad k_2 = -(\omega^2), \quad C = -g \cdot \mu, \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1^2 - 4 \cdot k_2}}{2}, \quad \lambda_2 = \frac{-k_1 - \sqrt{k_1^2 - 4 \cdot k_2}}{2}. \quad (9)$$

$$A = r_1 - \frac{C}{k_2}, \quad C_1 = \frac{A \cdot \lambda_2 - v_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad C_2 = \frac{v_1 - A \cdot \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (10)$$

Pro další řešení kinematických charakteristik zavedme tzv. „Modelový příklad loupáčky“, na kterém znázorníme jednotlivé funkční závislosti. Nebude-li uvedeno jinak, bude modelový příklad počítán pro tyto hodnoty:

$$r_1 = 0,01 \text{ m} \quad r_2 = 0,3 \text{ m} \quad \mu = 0,5 [-] \quad n = 1480 \text{ min}^{-1}$$

Řešíme-li úlohu polohy nebo rychlosti jako funkce času, je pro nás důležitým okamžikem čas, kdy semínko opustí lopatku rotoru na souřadnici $x = r_2$. K řešení dojdeme dosazením této hodnoty poloměru do rovnice (6).

$$r_2 = C_1 \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + C_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} + \frac{C}{k_2}. \quad (11)$$

Tuto nelineární rovnici o jedné neznámé budeme řešit numericky. V prostředí programu Matlab při tom využijeme funkce `fzero`, která hledá kořen rovnice v blízkém okolí zadaného bodu. Tímto postupem dojdeme k získání hodnoty $t = t_{out}$, při které souřadnice x nabývá hodnoty $x = r_2$.

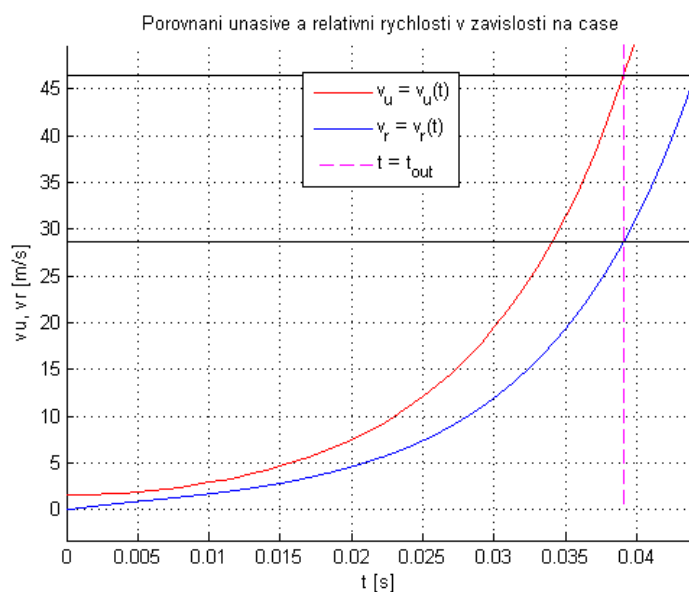
Unášivou i relativní složku výletové rychlosti v bodě $x = r_2$ získáme dosazením času $t = t_{out}$ do rovnice (7). Z tohoto vztahu získáme nejen výslednou rychlost, ale můžeme jím graficky znázornit průběh těchto rychlostí v závislosti na souřadnici x , jak je vidět na Obr. 3.

2.2. Řešení úlohy rychlosti jako funkce polohy

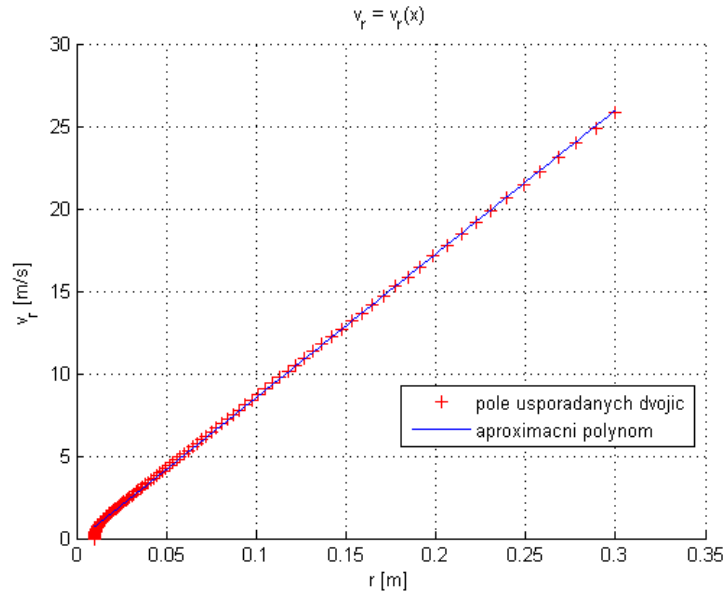
Pro další výpočet energetické bilance loupáčky je výhodné vyjádřit závislost rychlosti semínka jako funkci polohy. Postačující bude vyjádření pouze relativní rychlosti na poloze, z kterého dokážeme případně odvodit další potřebné vztahy.

Vydeme ze znalosti závislostí $x = x(t)$, $\dot{x} = \dot{x}(t)$ a času t_{out} , kdy dojde k výletu semínka z lopatky. Naším cílem je vyjádřit závislost $\dot{x} = \dot{x}(x)$. Tuto závislost budeme řešit numericky pomocí aproximační funkce.

Časový úsek $\{t = 0; t = t_{out}\}$ rozdělíme na m stejně velkých intervalů. Poté vytvoříme pole uspořádaných dvojic, kde pro každý čas t_i k hodnotě $x_{(t=t_i)}$ přiřadíme hodnotu $\dot{x}_{(t=t_i)}$. Proměnná i přitom nabývá hodnot $i = \{0; 1; 2; \dots; m - 1; m\}$, kde $i = 0$ odpovídá času $t = 0$ a $i = m$ odpovídá $t = t_{out}$.



Obr. 3: Grafická závislost velikosti vektoru unášivé a relativní rychlosti na čase



Obr. 4: Aproximace závislosti $\dot{x} = f(x)$ polynomem 1. stupně

V prostředí programu Matlab lze poté toto pole hodnot aproximovat polynomem n -tého stupně za pomoci funkce `polyfit`, která jako hodnotu vrací vektor koeficientů výsledného polynomu. Závislost radiální rychlosti na poloze tedy máme popsanou polynomem:

$$\dot{x}(x) = p(1) \cdot x^n + p(2) \cdot x^{n-1} + \dots + p(n) \cdot x + p(n+1). \quad (12)$$

Na Obr. 4 vidíme, že závislost je téměř lineární. Přistoupíme tedy k popisu funkce polynomem 1. stupně, přičemž k sestavení polynomu použijeme pole hodnot získané dělením časového intervalu s koeficientem $m = 100$.

2.3. Funkční závislost

Ukážeme, na čem všem je funkčně závislé výsledné řešení. Kromě počátečních podmínek jsou v řešení obsaženy i fyzikální konstanty.

Obecně tedy můžeme psát pro polohu i rychlost tyto funkční závislosti:

$$x = x(t, \omega, \mu, r_1, r_2, v_1). \quad (13)$$

$$\dot{x} = \dot{x}(t, \omega, \mu, r_1, r_2, v_1). \quad (14)$$

Hodnoty r_1 a r_2 jsou dané rozměry a proto je pro řešení kinematických charakteristik konkrétního stroje můžeme uvažovat jako konstanty.

Hodnota v_1 je neznámá a vzhledem k náhodným dějům a jejich velmi obtížnému popisu v oblasti souřadnice $x < r_1$ budeme uvažovat počáteční rychlost $v_1 = 0$.

Součinitel tření μ je funkčně závislý na rychlosti. Jelikož tuto rychlostní závislost součinitele tření mezi povrchem lopatky a semínkem slunečnice neznáme, budeme uvažovat tuto proměnnou jako konstantní a její hodnotu stanovíme experimentálně.

Z tohoto rozboru plyne, že jedinými nezávislými proměnnými zůstávají čas a úhlová rychlost, která je úměrná otáčkám motoru. Proto si můžeme dovolit psát:

$$x = x(t, n) \quad (15)$$

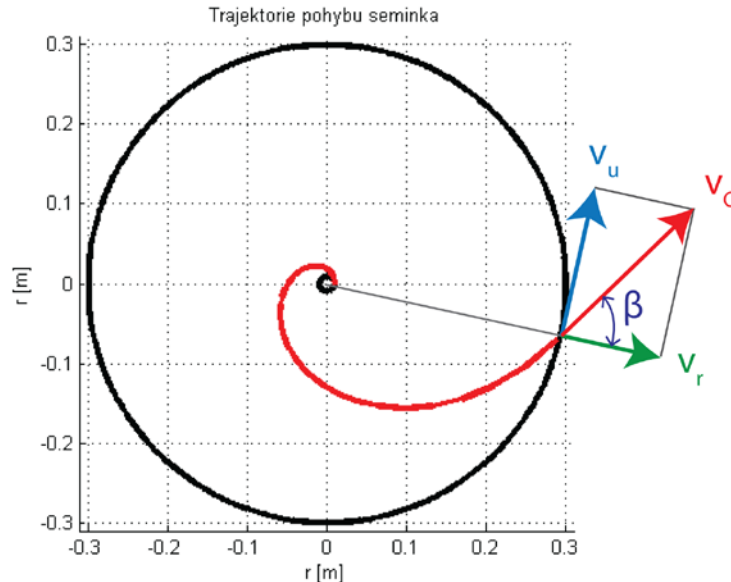
$$\dot{x} = \dot{x}(t, n) \quad (16)$$

3. Experimentální určení součinitele tření

Podrobme rozboru samotné výletové rychlosti a zkoumejme jejich funkční závislosti. Na Obr. 5 vidíme grafický rozklad celkové rychlosti na rychlost unášivou a relativní. Úhel,

o který je vektor výsledné rychlosti odkloněn od lopatky rotoru označme β . Tento úhel můžeme vyjádřit jako:

$$\tan(\beta) = \frac{v_u}{v_r}. \quad (17)$$



Obr. 5: Trajektorie pohybu semínka v rotoru a rozklad výletové rychlosti

Odvodili jsme, že okamžitá poloha a rychlost je za předpokladu, že známe hodnotu součinitele smykového tření funkcí pouze otáček motoru a času. Nyní pro modelový příklad vyšetříme závislost výletových rychlostí na otáčkách.

Na Obr. 6 je vidět, že tato závislost je jak pro unášivou tak i relativní složku rychlosti lineární. Budeme zkoumat, jak se v závislosti na otáčkách mění poměr rychlosti unášivé ku rychlosti relativní neboli závislost úhlu odklonění vektoru celkové rychlosti od lopatky rotoru.

Z vnesení této závislosti do grafu na Obr. 7 můžeme pozorovat s narůstajícími otáčkami klesající charakter hodnoty úhlu β .

Prozkoumáním této závislosti zjistíme, že pro velký rozsah otáček motoru nabývá diference úhlu β pro naši aplikaci zanedbatelných hodnot. Z praktického hlediska se tedy nedopustíme chyby, když prohlásíme, že závislost úhlu β na otáčkách motoru je konstantní.

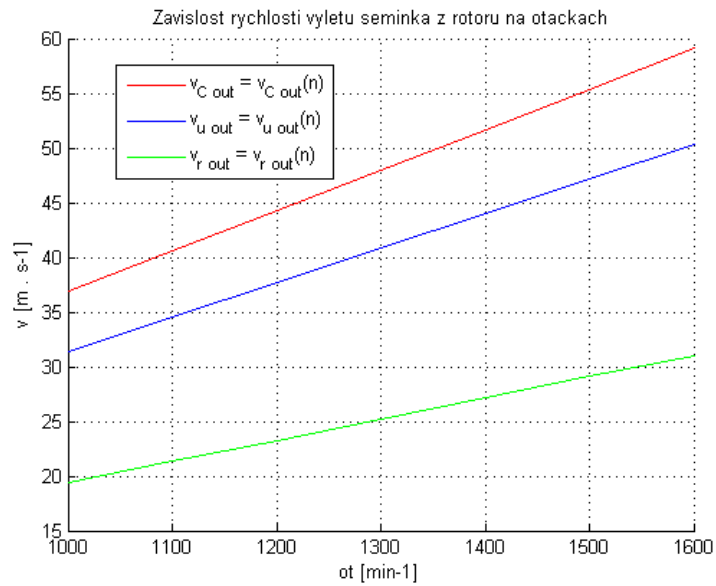
Zjištění, že poměr unášivé a relativní rychlosti v závislosti na otáčkách je konstantní, má pro nás klíčový význam. V čase $t = t_{out}$ bude totiž tento poměr funkcí pouze jediné proměnné, a to součinitele smykového tření. Vyšetřeme tedy tuto závislost v rozmezí hodnot $\mu = \langle 0; 1 \rangle$. Výsledek lze vidět na Obr. 8. Pro důkaz, že nedochází k zásadní chybě uvažováním konstantní závislosti úhlu β na otáčkách vyneseme funkci $\beta = f(\mu)$ pro dvoje různé otáčky motoru.

Podaří-li se nám experimentálně určit úhel výletu semínek β , pak bychom dokázali ze závislosti na Obr. 8 určit hodnotu součinitele tření mezi semínkem a povrchem lopatky rotoru.

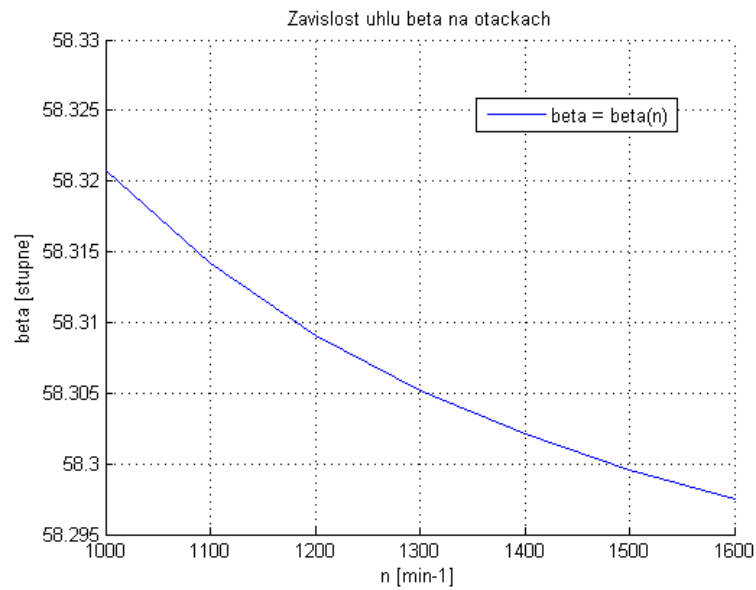
Snadno toho docílíme, vložíme-li letícímu semínku do cesty mezi konec lopatky rotoru a nárazovou plochu překážku. Jako vloženou překážku využijeme sousedící statorovou lopatku, která je přesazená o dostatečnou vzdálenost tak, aby následující lopatka byla vždy v jejím zákrytu. Vzhledem k tomu, že semínka jsou po obvodu rozhazována rovnoměrně, bude možné z geometrických poměrů znázorněných na Obr. 9 odečíst úhel, pod kterým semínka z rotoru vylétla.

Navoskovaním lopatek statoru před zahájením experimentu docílíme toho, že dopadající semínka po dopadu zanechají viditelnou stopu. Na Obr. 9 je tato stopa na lopatce statoru

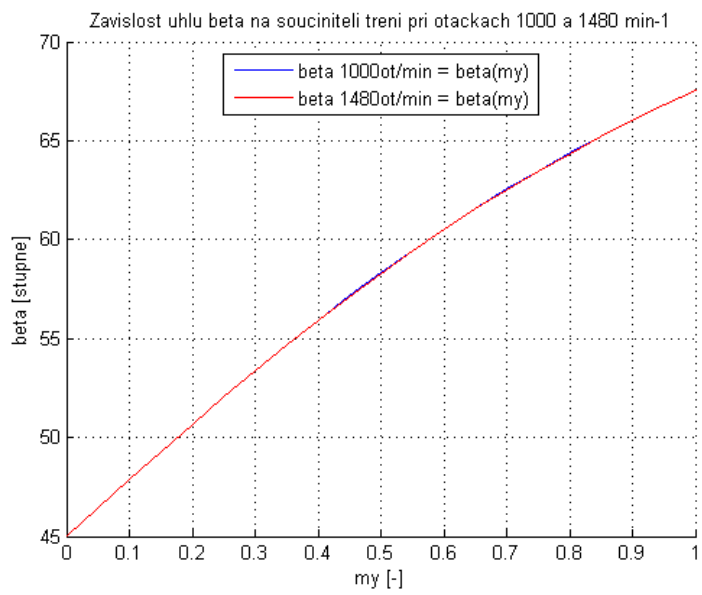
znázorněna zelenou barvou. Díky tomu a ze znalosti rozměrů rotoru a statoru jsme schopni určit úhel β odklonění vektoru výletové rychlosti v_C od lopatky rotoru.



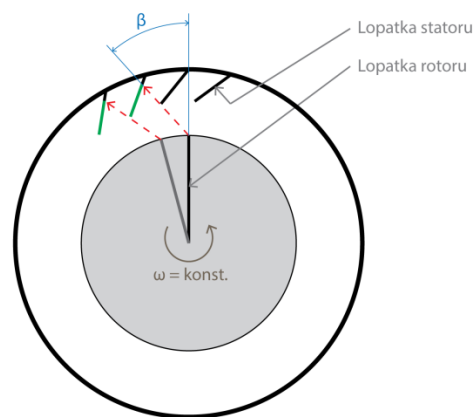
Obr. 6: Zavislost výletových rychlostí na otáčkách motoru



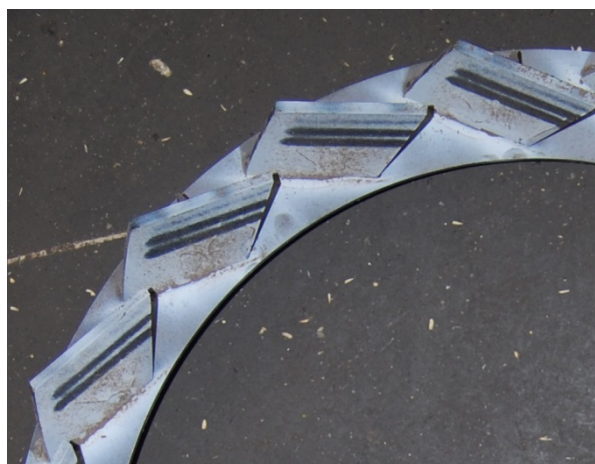
Obr. 7: Zavislost úhlu β na otáčkách motoru



Obr. 8: Závislost úhlu β na součiniteli smykového tření



Obr. 9: Geometrické poměry pro experimentální určení výletového úhlu



Obr. 10: Lopatky statoru po experimentu

4. Energetická bilance provozu stroje

Složky celkové energetické náročnosti stroje můžeme dle charakteru rozdělit do třech hlavních skupin:

- energie spojená s pohybem semen,
- odpor vzduchu rotujících částí,
- mechanické ztráty stroje.

Následující odstavce se budou zabývat zejména prvními dvěma složkami, jelikož ty mají na celkovou náročnost dominantní vliv a z konstrukčního i provozního hlediska jsou nejnáze ovlivnitelné

4.1. Zrychlení semen v rotoru

Podstatná část vložené energie je odebrána zrychlením semen v rotoru loupáčky. Pouze tuto složku vnímáme jako užitečnou, jelikož se v semenech uloží ve formě kinetické energie potřebné k vyloupenutí při nárazu do statoru.

Z kinematických charakteristik pohybu semen v rotoru dokážeme v závislosti na otáčkách určit výslednou celkovou rychlost, jakou semena rotor opouští. V matematickém modelu uvažujeme počáteční rychlost nulovou, proto se změna kinetické energie semen zrychlením rovná přímo kinetické energii semen na výstupu z rotoru.

Při uvažování konstantního hmotnostního průtoku lze určit výkon potřebný k pokrytí této složky celkové energetické bilance.

$$\Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = E_{k2} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_C^2 = W_{kin}. \quad (18)$$

$$P_{kin} = \frac{W}{t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{t} \cdot v_C^2 = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_C^2. \quad (19)$$

4.2. Třecí ztráty

Jak ukazuje matematický model, působí mezi semínkem a lopatkou třecí síly T_C a T_G . Ty pak při pohybu semínka po lopatce konají práci W_T , která spotřebovává dodávanou energii.

$$W_T = T \cdot x = F \cdot \mu \cdot x. \quad (20)$$

Zatímco působení gravitační síly je konstantní po celou dobu pohybu po lopatce, reakční síla Coriolisova svoji velikost v závislosti na poloze mění. Zde využijeme aproximační funkce závislosti rychlosti semínka na poloze a celkovou velikost Coriolisovy síly zintegrujeme přes délku lopatky rotoru. Aproximační funkci máme vyjádřenou ve tvaru polynomu n -tého stupně.

$$dW_T = T_{(x)} \cdot dx = F_{(x)} \cdot \mu \cdot dx. \quad (21)$$

$$F_{(x)} = G + F_{cor} = m \cdot g + 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x}_{(x)}. \quad (22)$$

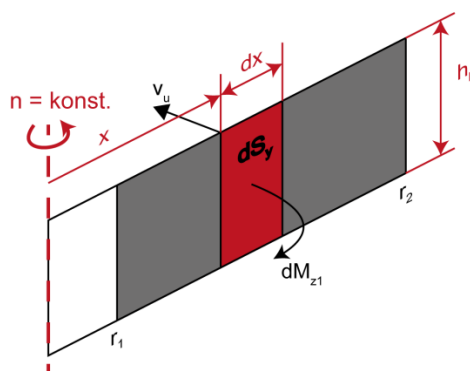
$$W_T = \mu \cdot \int_{r_1}^{r_2} F_{(x)} \cdot dx \quad (23)$$

$$P_T = \frac{W_T}{t} = \mu \cdot \int_{r_1}^{r_2} \dot{m} \cdot (g + \omega \cdot \dot{x}_{(x)}) \cdot dx. \quad (24)$$

4.3. Odpor vzduchu rotujících částí

Pro výpočet vzdušného odporu na lopatkách rotoru vyjdeme z Newtonova vztahu pro aerodynamickou odporovou sílu.

$$F = \frac{1}{2} \cdot S_y \cdot C_d \cdot \rho \cdot v_u^2. \quad (25)$$



Obr. 11: Schéma pro odvození vztahu vzdušného odporu rotorových lopatek

$$\frac{dM_z}{i_l} = dF \cdot x = \left(\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot v_u^2 \cdot dS_y \right) \cdot x = \left[\frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot x \right)^2 \cdot h_l \cdot dx \right] \cdot x. \quad (26)$$

Pokud budeme chtít zkoumat energetickou náročnost současné varianty stroje, uvažujme rozměry a počet lopatek jako neměnné konstanty. Pak pro závislost na otáčkách motoru můžeme definovat aerodynamickou odporovou konstantu stroje k_s .

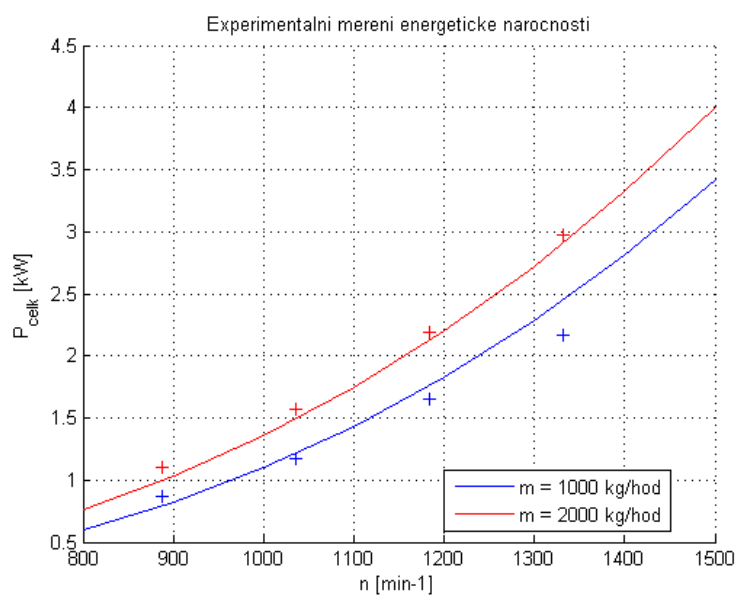
$$k_s = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{60} \right)^2 \cdot h_l \cdot i_l. \quad (27)$$

Z elementárního momentu odporu vzduchu na lopatkách potom vyjádříme celkový odporový moment jako integrál přes délku lopatky rotoru.

$$dM_z = k_s \cdot n^2 \cdot x^3 \cdot dx. \quad (28)$$

$$M_z = k_s \cdot n^2 \cdot \int_{r_1}^{r_2} x^3 \cdot dx. \quad (29)$$

$$P_z = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot k_s \cdot n^3 \cdot \int_{r_1}^{r_2} x^3 \cdot dx \quad (30)$$



Obr. 12: Experimentální měření energetické náročnosti pro reálný stroj

4.4. Celková náročnost

Celkovou energetickou náročnost můžeme vyjádřit jako sumu všech potřebných energií k provozu stroje. Pokud zanedbáme mechanické ztráty stroje, které jsou oproti ostatním položkám minimální, pak můžeme psát vztah pro celkový výkon stroje:

$$P_{celk} = P_{kin} + P_T + P_z. \quad (31)$$

$$P_{celk} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_C^2 + \mu \cdot \int_{r_1}^{r_2} \dot{m} \cdot (g + \omega \cdot \dot{x}(x)) \cdot dx + \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot k_s \cdot n^3 \cdot \int_{r_1}^{r_2} x^3 \cdot dx. \quad (32)$$

Tabulka. 1: Experimentální měření energetické náročnosti

\dot{m} [kg · hod ⁻¹]	n [min ⁻¹]	M_k [N · m]	P_{celk}^{skut} [kW]	P_{celk}^{teor} [kW]	Δ [%]
1000	888	9,38	0,87	0,79	9,2
	1036	10,83	1,17	1,21	3,4
	1184	13,36	1,65	1,75	6,0
	1332	15,52	2,17	2,44	2,4
2000	888	11,91	1,11	0,99	12,4
	1036	14,44	1,57	1,49	5,1
	1184	17,69	2,19	2,12	3,2
	1332	21,30	2,97	2,91	2,0

Měření skutečné energetické náročnosti probíhalo experimentálně. Výsledek měření lze vidět na Obr. 12.

5. Analýza dopadu semen na stator – experimentální měření

Cílem experimentu bylo pořídit obrazový záznam nárazu semínka do stěny, při kterém dojde k vyloupnutí semínka.

Princip experimentu spočívá ve vystřelení jednotlivých semínek proti nárazové desce. Jako střelného mechanismu je využito paintballové pistole s regulací tlaku. Regulačním šroubem je v pistoli nastaveno předepnutí pružiny, která po stisku spouště svým uvolněním uvede do pohybu píst. Ten následně otevře ventil tlakové lahve a stlačený vzduch pak vystřelí semínko z hlavně proti desce. Rychlost výstřelu je závislá na míře otevření ventilu a proto jí lze regulovat předepnutím pružiny pomocí šroubu.

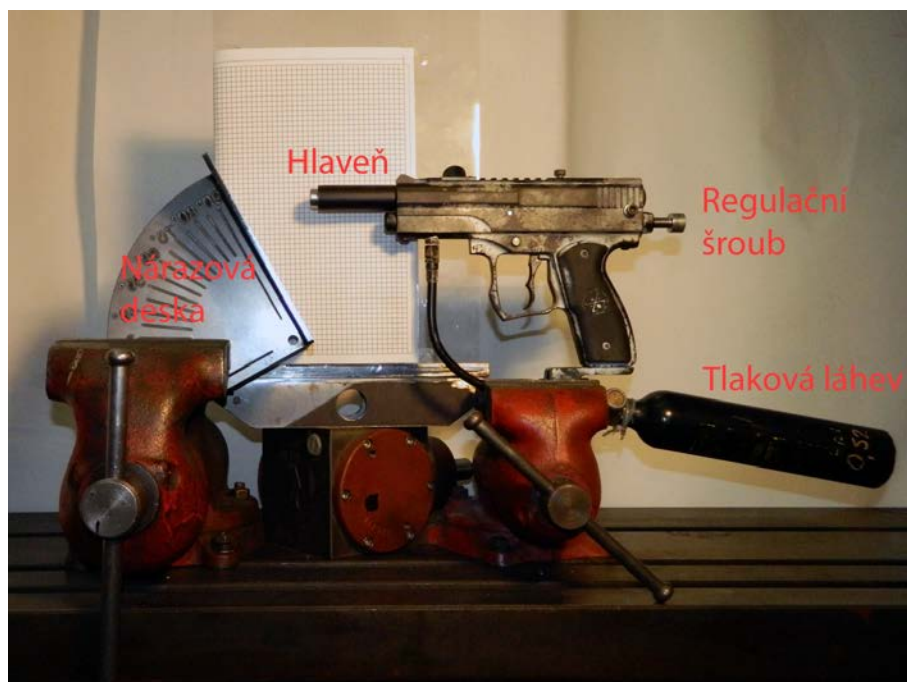
Rychlost výstřelu je řízená zpětnovazebně, kdy je z obrazového záznamu odečtena rychlost předchozího výstřelu a podle toho je upraveno předepnutí pružiny.

K odečítání rychlosti je na pozadí snímaného prostoru umístěn rastr se čtvercovou sítí o velikosti strany čtverce $a = 5$ mm. Známe-li snímací frekvenci kamery f_k , pak rychlost letu semínka lze napočítat z počtu pořízených snímků X na vzdálenost jednoho dílku rastru a .

$$v = \frac{a \cdot f_k}{X \cdot 1000}. \quad (33)$$

Aby byl obrazový záznam dostatečně plynulý, je nutné určit minimální snímací frekvenci kamery. Chceme-li snímat rychlosti letu $v = 40$ m/s, a řekneme-li, že postačující kvalita snímání letícího semínka je 5 snímků během uražené vzdálenosti $a = 5$ mm, pak z rovnice (33) plyne, že nutná snímací frekvence kamery je $f_k = 40\,000$ fps.

K realizaci experimentu využijeme zapůjčené vysokorychlostní kamery Olympus i-SPEED 3. Její součástí je obrazový ovládací panel, který rovněž umožňuje okamžité zpomalené přehrání pořízeného záznamu jako zpětnou vazbu výstřelu.



obr. 13: Stand pro snímání nárazu vystřeleného semínka

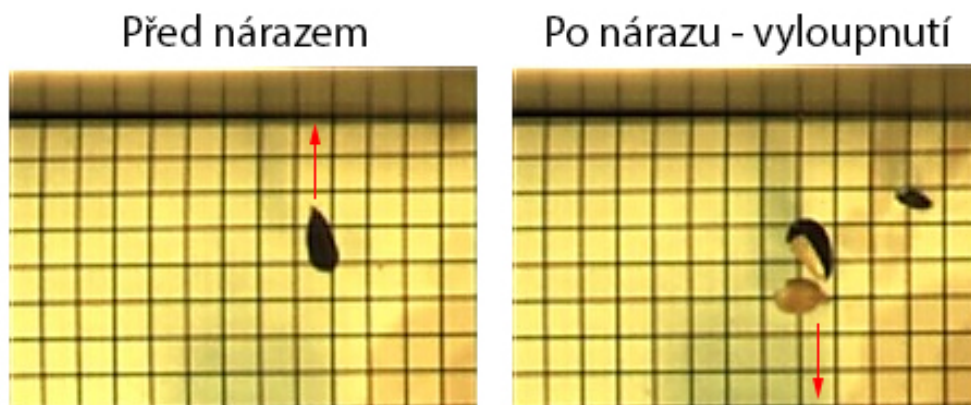
5.1. Provedení experimentu

Pistole i nárazová deska jsou pevně uchyceny do svěráků. Před každým výstřelem je odšroubována hlaveň, ve které je vložka o vnitřním průměru odpovídající velikosti semínka. Nárazová deska má na sobě úhlovou stupnici pro snímání nárazu pod různými úhly.

Měření je rozděleno do tří částí. V části A zkoumáme závislost velikosti semínek, v části B zkoumáme závislost vlhkosti a v části C závislost úhlu dopadu. Provedená měření jsou uvedena v tab. 2.

Tabulka. 2: Provedení měření snímání nárazu slunečnicového semínka

Část	č. m.	frakce	vlhkost	úhel nárazu	počet provedených výstřelů
A, B, C	1	střední	7,5 %	0 °	19
A	2	malá	7,5 %	0 °	20
	3	velká	7,5 %	0 °	27
B	4	střední	5,7 %	0 °	30
	5	střední	10,6 %	0 °	21
C	6	střední	7,5 %	10 °	11
	7	střední	7,5 %	15 °	8
	8	střední	7,5 %	20 °	8
	9	střední	7,5 %	25 °	7
	10	střední	7,5 %	10 °	8



obr. 14: Ukázka obrazového záznamu vyloupenutí semínka

5.2. Zhodnocení experimentu

Při experimentu došlo v několika případech ke znehodnocení záznamu tím, že semínko vylétlo z hlavně s již narušenou slupkou. K tomu docházelo zejména při vyšším předeptnutí pružiny se snahou docílit vyšších výletových rychlostí. Vysvětlením tohoto jevu může být velmi prudký nárůst tlaku v uzavřeném prostoru, který slupku semínka poškodil.

Ukázalo se, že rychlosti, při kterých se semínka nárazem vyloupala leží v určitém pásmu hodnot, přičemž u větších semínek bylo toto pásmo posunuto k nižším rychlostem. To sice neodporuje uvedené teorii o závislosti velikosti semínka, ale pro úplné potvrzení této teorie by muselo být provedeno několikanásobně více záznamů.

V části B se ukázalo, že k vyloupenutí semínek o vyšší vlhkosti je zapotřebí vyšší rychlost. Zároveň se s vyšší vlhkostí zhoršila kvalita loupání, neboť se slupky od jádra neodloučily, ale jejich části na něm zůstávaly nalepené.

V části C se podařilo zjistit, že úhel odletu semínka po nárazu není roven úhlu dopadu na desku. Podařilo se tedy určit takový úhel sklonu lopatek, při kterém budou semínka po nárazu odkláněna do požadovaného směru.

6. Závěr

V tomto projektu byla provedena důkladná analýza kinematických charakteristik pohybu slunečnicového semínka v rotoru loupáčky. Z této analýzy vzešel experiment, díky kterému se podařilo zjistit součinitel smykového tření mezi povrchem rotorové lopatky a slunečnicovým semínkem.

Dále byla rozebrána teorie energetické náročnosti loupání, kterou se opět podařilo potvrdit experimentálním měřením.

V poslední části se podařilo získat obrazové záznamy nárazu semínka na překážku pro různé velikosti, vlhkosti a úhly dopadu semínka na nárazovou desku. Tyto záznamy slouží nejen jako podklad pro další vývoj stroje loupáčky slunečnice, ale i jako nástroj využitelný v marketingu firmy.

Zároveň tato práce slouží jako teoretický podklad pro konstrukční úpravy vedoucí ke zvýšení kvality loupání a snížení jeho energetické náročnosti. Přímé konstrukční úpravy loupáčky byly na základě této práce navrženy, avšak z důvodu rozsahu této práce a nevěřejnosti těchto informací zde nejsou publikovány.

Seznam použité literatury

VALÁŠEK, Michael, Jiří BŘEZINA a Vladimír STEJSKAL. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STROJNÍ FAKULTA. *Mechanika A*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001028909.

VALÁŠEK, Michael, Zbyněk ŠIKA a Václav BAUMA. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STROJNÍ FAKULTA. *Mechanika B*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001029190.