

## Elektromagnetické a tepelné výpočty aktuátoru pro plečkovací stroj

**Pracoviště:** RICE  
**Číslo dokumentu:** 22190-009-2024  
**Typ zprávy:** Výzkumná zpráva  
**Řešitelé:** Lukáš Veg, Karel Hruška, Petr Votápek  
**Vedoucí projektu:** Lukáš Veg,  
**Počet stran:** 31  
**Datum vydání:** 1. 12. 2024  
**Oborové zařazení:** 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering,  
Information engineering - Electrical and electronic  
engineering

**Zadavatel / zákazník:**

**Zpracovatel / dodavatel:**

Západočeská univerzita v Plzni  
RICE

Univerzitní 8  
306 14 Plzeň

**Kontaktní osoba:**

Ing. Lukáš Veg, Ph.D.

tel.: 377 634 460

email: vegl@fel.zcu.cz

**Podléhá obchodnímu tajemství.**

**Zpráva vznikla s finanční podporou TAČR v rámci projektu TN02000028  
(CAMAT)**

## **Anotace**

Tato výzkumná zpráva se zabývá definováním technické specifikace plečkovací stroje pro projekt Ullmanna – NCK - CAMAT

## **Klíčová slova**

Plečkovací stroj, lineární aktuátor

## **Název zprávy v anglickém jazyce / Report title**

Technical specification of the actuator for the weeding machine

## **Anotace v anglickém jazyce / Abstract**

This research report deals with defining the technical specification of the weeding machine for the Ulmann - NCK - CAMAT project

## **Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords**

Weeding machine, linear actuator

## Seznam symbolů a zkratek

GPS

Global Position System

## Obsah

|           |                                                       |           |
|-----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>ÚVOD.....</b>                                      | <b>5</b>  |
| <b>2</b>  | <b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PŮDNÍCH PODMÍNEK .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>3</b>  | <b>ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET PRVNÍ VERZE V1 .....</b> | <b>11</b> |
|           | 3.1.1 Předpoklady technické specifikace.....          | 11        |
|           | 3.1.2 Štítkové parametry navrhovaného stroje.....     | 12        |
|           | 3.1.3 Ostatní návrhy – drafty.....                    | 12        |
| <b>4</b>  | <b>TEPELNÝ VÝPOČET .....</b>                          | <b>14</b> |
|           | 4.1.1 První přiblížení.....                           | 15        |
| <b>5</b>  | <b>PRVNOTNÍ ANALÝZA PROVEDITELNOSTI.....</b>          | <b>17</b> |
| <b>6</b>  | <b>AKTUÁTOR, ŘEŠENÍ VERZE V2.....</b>                 | <b>20</b> |
| <b>7</b>  | <b>AKTUÁTOR, ŘEŠENÍ VERZE V3, OBOUSTRANNÝ .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>8</b>  | <b>AKTUÁTOR, ŘEŠENÍ VERZE V4 – SRM .....</b>          | <b>24</b> |
| <b>9</b>  | <b>PŘÍMÝ SERVOPOHON RÁDLA .....</b>                   | <b>25</b> |
| <b>10</b> | <b>NÁVRHY K ŘEŠENÍ.....</b>                           | <b>28</b> |

# 1 Úvod

Projekt směřuje na vývoj elektromechanického aktuátoru pro plečkovací stroj sloužící k odstraňování plevelu kolem hospodářských plodin (rostlinek). Plečkovací stroj může být osazen za traktorem nebo na zemědělském autonomním robotu. Podle toho, pro kterou je stroj určen platformu, se bude zejména lišit přístup k elektrické energii (generátor na vývodové hřídeli traktoru nebo baterie 48 V robotu). U traktoru se počítá maximálně s 12 obsluhovanými řádky, u robotu se šesti.

Co se týká elektromechanické části pohonu, je kladen důraz na dynamiku, ale zároveň na nízkou spotřebu a výslednou cenu řešení.

Pro optimální reálnou a smysluplnou výtěžnost v konvenčním zemědělství při obvyklé rychlosti traktoru 10km/h je 28x za sekundu (tento cíl je případně optimální jen pro masové použití).

Odpor půdy se výrazně liší při různých hloubkách záběru nožů a různé vlhkosti.

Dále je potřeba brát koncepci pohonu jako celek (elektromechanický aktuátor s výkonovou elektronikou), která bude zásobena daty pravděpodobně ze sběrnice CANbus.

Výstupem pro letošní rok 2023 je simulační model.

|                                                                   |                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Platforma pro CAMAT                                               | Traktor                                                                                                     |
| Zástavbový prostor na šířku                                       | 12-30 cm na šířku (předpokládá se, že řádky plodin jsou od sebe 30 cm)                                      |
| Zástavbový prostor na délku                                       | Téměř neomezeno                                                                                             |
| Zástavbový prostor na výšku                                       | Téměř neomezeno                                                                                             |
| Rozevření nožů                                                    | 0-12 cm, případně se v počáteční pozici překryjí). Maximální rozevření by mohlo být i větší např. pro zelí. |
| Pohyb nožů                                                        | Asynchronní (každý z nožů nezávisle)                                                                        |
| Současná frekvence práce nožů (otevření a zavření).               | 6-10 Hz                                                                                                     |
| Současná rychlost pohybu traktoru                                 | 2 km/h                                                                                                      |
| Cílová rychlost traktoru                                          | 3 km/h                                                                                                      |
| Cílová frekvence práce nožů                                       | 8 Hz                                                                                                        |
| Typické mechanické zatížení nožů (moment, síla, výkony, rychlost) | TBD ULLMANNA                                                                                                |
| Krytí IP                                                          | 68                                                                                                          |
| Komunikace                                                        | CAN                                                                                                         |
| Z nadřazeného systému                                             | požadavek na pozici každého nože                                                                            |

Inspirace:

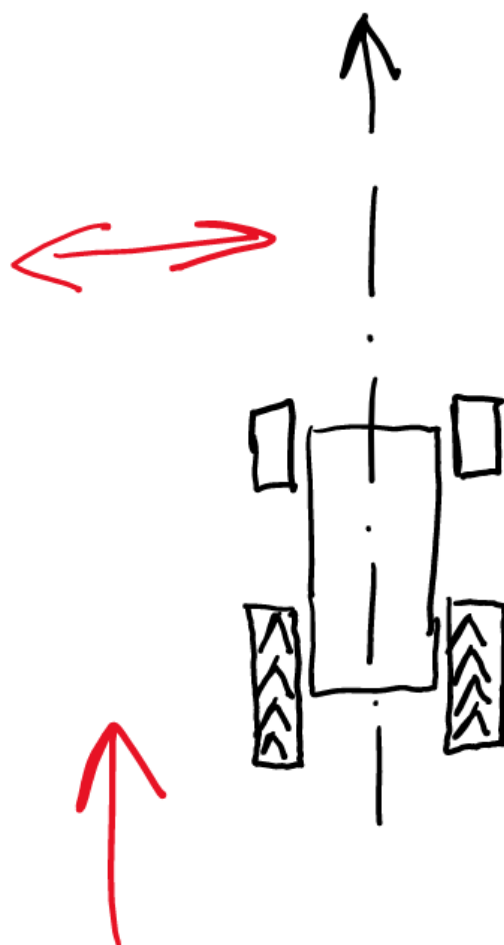
- <https://agrintelli.com/robotti/>
- <https://www.naio-technologies.com/en/home/>
- <https://garford.com/>

## 2 Experimentální měření půdních podmínek

Experimentální měření silového půdního odporu probíhalo na půdním bloku, který má výměru 2,42 ha, má průměrnou nadmořskou výšku 552m a je evidován pod číslem: 8701-1 (680-1110), čtverec: 680-1170. Tento pozemek leží u cesty mezi obcemi Útěchovičky a Velký Rybník (GPS souřadnice: 49.4784944N, 15.2992558E). Půdním typem je zde hnědozem a půdní druh je hlinitá půda, tudíž středně těžká, po deštích v předchozích dnech vlhká a od předchozího kypření rozměněná.

Cílem měření bylo stanovit silový odpor zeminy při pohybu ramene s plecím břitem ve směru jízdy tažného prostředku a dále silový odpor zeminy při pohybu ramene ve směru kolmém na směr jízdy tažného prostředku. Měření bylo realizováno při konstantní hloubce zanoření břitu do půdy cca 50mm díky fixnímu opěrnému kolu na plečkovacím stroji a v rozsahu pracovních rychlostí 1,6 až 2,5km/h tažného prostředku.

Při kolmém pohybu ramena na směr jízdy a při umístění měřicího ramena v takové pozici, kdy se pracovní část ramena s břity pohybovala pouze v zemině již z předešlé operace zkypřené, se střední hodnoty naměřené síly pohybovaly do 120N, lokální špičková maxima dosahovala cca 210N, dále nebyla zaznamenána žádná signifikantní závislost na změnu pracovních rychlostí ve výše rychlostním uvedeném intervalu. Při pohybu ramene v oblasti kolejového řádku z důvodu pedokompakce půdy očekávatelně vzrostl i půdní silový odpor cca o 25%.



Obr. 1 Schematický náčrtek řešeného problému

Při měření půdního odporu ve směru jizdy v zemině již z předešlé operace zkypřené, byla dosažena špičková síla do 350N, v kolejovém řádku byla špičková síla do 600N a v oblasti vysoce utužené půdy ( typicky souvratě) naměřené špičkové hodnoty sil dosahovaly až 750N.

Pro ověření rozptylu naměřených hodnot se nabízí realizovat další sadu obdobného experimentálního měření, avšak v jiných půdních profilech a stavech půdy, případně zvážit požadavek násobně vyšších pracovních rychlostí tažného prostředku.



Obr. 2 Foto z měření



Obr. 3 Foto z měření

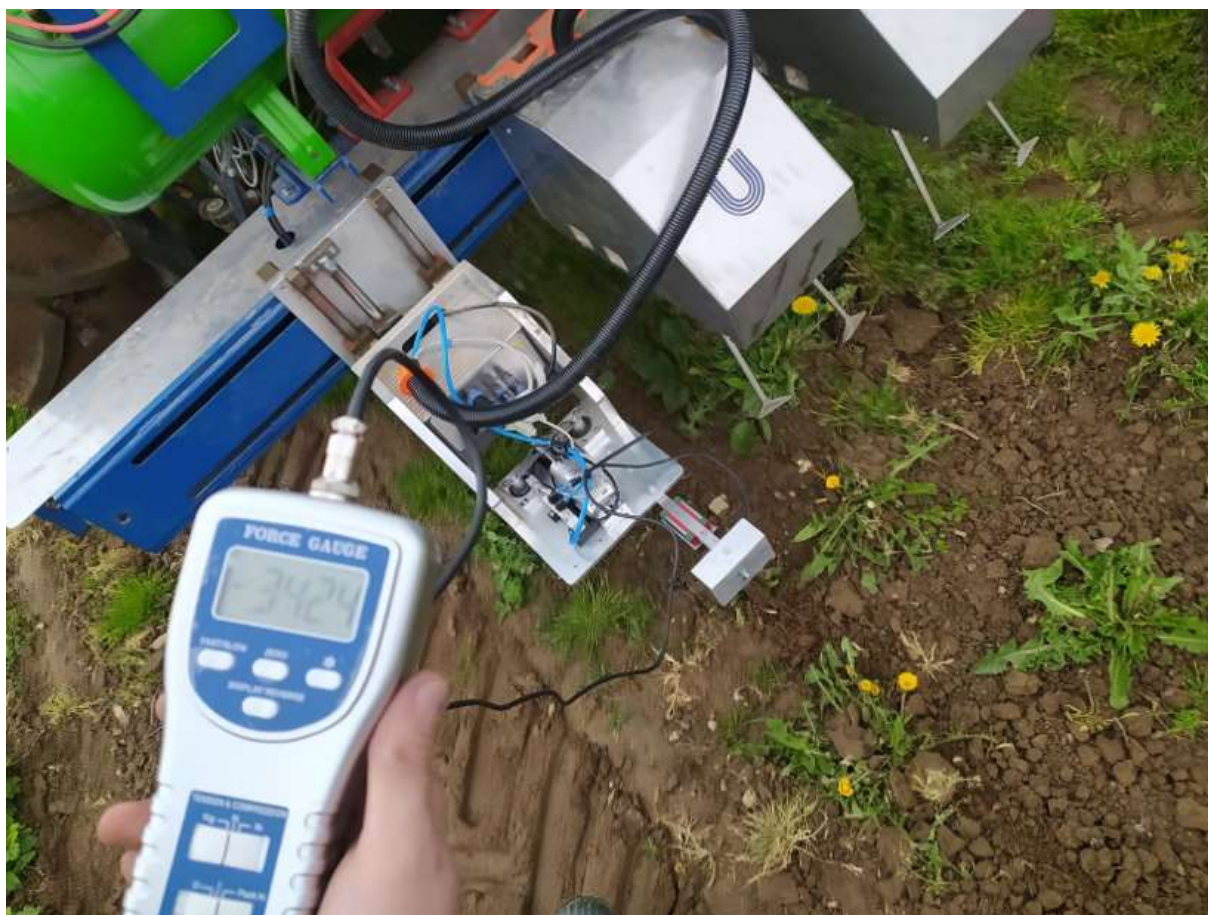




Obr. 4 Foto z měření



Obr. 5 Foto z měření



Obr. 6 Foto z měření



### 3 Elektromagnetický výpočet první verze v1

#### 3.1.1 Předpoklady technické specifikace

Předpokládá se pohyb zemědělského stroje rychlostí  $v_s = 2,8 \text{ m/s}$ , přičemž budou ošetřovány rostliny s rozponem  $t_r = 100 \text{ mm}$ . Šíře ošetřované dráhy je  $d = 300 \text{ mm}$ , přičemž se předpokládá, že polovinu šíře bude obsluhovat jeden lineární motor.

Frekvence kmitů motoru  $f_m$  bude dle zadání:

$$f_m = \frac{v_s}{t_r} = \frac{2,8}{0,1} = 28 \text{ Hz}$$

Během jednoho cyklu musí lineární motor překonat šíři poloviny ošetřované dráhy a vrátit se do původní polohy, požadovaná rychlost pohybu motoru  $v_m$  bude:

$$v_m = d f_m = 0,3 \cdot 28 = 8,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Za předpokladu tažné síly  $F_t = 200 \text{ N}$  pak vychází výkon motoru:

$$P = F_t v_m = 200 \cdot 8,4 = 1680 \text{ W}$$

Předpokládáme-li modulační index  $\xi = 0,95$  a součin účinnosti a účinníku  $\eta \cos \varphi = 0,75$ , je zdánlivý příkon motoru:

$$S = \frac{P}{\eta \cos \varphi} = \frac{1680}{0,75} = 2240 \text{ VA}$$

Pro radu bezpečných napětí  $U_{DC} = 48 \text{ V}$ ,  $60 \text{ V}$  a  $120 \text{ V}$  stejnosměrných pak vychází fázová napětí (pro  $m = 3$  fáze) a proudy uvedené v tabulce níže doplněné o požadované průřezy vodičů při předpokládání jmenovité proudové hustoty ve vodičích  $J = 7 \text{ A/mm}^2$  a počty paralelních vodičů při uvažování vodiče o průměru  $D_v = 0,8 \text{ mm}$  (pozn.: čísla nejsou zaokrouhlena na celé vodiče a budou upřesněna v rámci návrhu stroje).

| $U_{DC} [\text{V}]$ | $U_f [\text{V}]$ | $I_n [\text{A}]$ | $S_v [\text{mm}^2]$ | $n_p [-]$ |
|---------------------|------------------|------------------|---------------------|-----------|
| 48                  | 16,12            | 46,31            | 6,62                | 13,16     |
| 60                  | 20,15            | 37,05            | 5,29                | 10,53     |
| 120                 | 40,31            | 18,53            | 2,65                | 5,27      |

### 3.1.2 Štítkové parametry navrhovaného stroje

Na základě předchozích výpočtů je doporučeno provést návrh lineárního stroje s následujícími štítkovými parametry:

jmenovitá tažná síla:  $F_t = 200 \text{ N}$

jmenovitý výkon:  $P = 1700 \text{ W}$

jmenovité napětí:  $U_{DC} = 120 \text{ V}$

počet fází vinutí:  $m = 3$

délka statické části:  $L_{celk} = 300 \text{ mm}$

Šíře statické a rozměry pohyblivé části vyplynou z návrhu stroje tak, aby dostupný rozkmit motoru byl minimálně  $\Delta x = 150 \text{ mm}$ .

### 3.1.3 Ostatní návrhy – drafty

| vstupní data           |       |        | konzervativní návrh          |        |                   | VUES L3S150P-1215-SH-X1-002   |      |      |
|------------------------|-------|--------|------------------------------|--------|-------------------|-------------------------------|------|------|
| F =                    | 200   | N      | A =                          | 20000  | A/m               | F =                           | 900  | N    |
| L <sub>pos</sub> =     | 150   | mm     | B <sub>δ</sub> =             | 0,8    | T                 | U <sub>DC</sub> =             | 560  | V    |
| k <sub>Fe</sub> =      | 0,95  | -      | α <sub>δ</sub> =             | 0,75   | -                 | I <sub>n</sub> =              | 3,1  | A    |
| předpokládané vinutí   |       |        | k <sub>B</sub> =             | 1,07   | -                 | k <sub>E</sub> =              | 173  | Wb/m |
| 2p =                   | 8     | pólů   | J <sub>d</sub> =             | 3      | A/mm <sup>2</sup> | k <sub>F</sub> =              | 300  | N/A  |
| m =                    | 3     | fáze   | k <sub>σ</sub> =             | 0,15   | -                 | R <sub>UV</sub> =             | 17,5 | Ω    |
| q =                    | 3/8   | -      | B <sub>z</sub> =             | 1,8    | T                 | L <sub>UV</sub> =             | 145  | mH   |
| n =                    | 3     | -      | L <sub>akt</sub> = 122,73 mm |        |                   | b =                           | 145  | mm   |
| c =                    | 8     | -      | t <sub>d</sub> =             | 13,64  | mm                | L =                           | 190  | mm   |
| Q <sub>akt</sub> =     | 9     | drážek | t <sub>p</sub> =             | 15,34  | mm                | h <sub>stat</sub> =           | 45   | mm   |
| Q <sub>c</sub> =       | 11    | drážek | C <sub>L</sub> = 12137 A/m   |        |                   | b <sub>PM</sub> =             | 14   | mm   |
|                        |       |        | b =                          | 134,27 | mm                | t <sub>p</sub> =              | 15   | mm   |
| t <sub>pd</sub> =      | 1,125 | drážky | Φ = 0,001236 Wb              |        |                   | 2p =                          | 12   | pólů |
| y <sub>1d</sub> =      | 1     | drážky | Φ <sub>z</sub> = 0,001051 Wb |        |                   | L <sub>skut</sub> =           | 180  | mm   |
| β =                    | 0,889 | -      | b <sub>z</sub> =             | 9,01   | mm                | C <sub>L</sub> = 34482,76 A/m |      |      |
| k <sub>y1</sub> =      | 0,985 | -      | zaokr. b <sub>z</sub> =      | 9,00   | mm                | A = 56824,68 A/m              |      |      |
| k <sub>r1</sub> =      | 0,960 | -      | b <sub>d</sub> =             | 4,64   | mm                |                               |      |      |
| k <sub>v1</sub> =      | 0,945 | -      |                              |        |                   |                               |      |      |
| legenda                |       |        |                              |        |                   |                               |      |      |
| vstupní hodnota        |       |        | I <sub>d</sub> =             | 272,73 | A                 |                               |      |      |
| ručně odečtená hodnota |       |        | S <sub>d</sub> =             | 90,91  | mm <sup>2</sup>   |                               |      |      |
| zaokrouhlená hodnota   |       |        | h <sub>d</sub> =             | 19,61  | mm                |                               |      |      |
| dopočtená hodnota      |       |        |                              |        |                   |                               |      |      |

Ullman dle dat z VUES  
 $b = 47,26$  mm

$I_d = 774,88$  A  
 $S_d = 258,29$  mm<sup>2</sup>  
 $h_d = 55,71$  mm

#### Komentář:

Předpokládám motor s dlouhým statorem (vinutí je statické). Zubové vinutí s  $q = 3/8$  voleno kvůli nejmenší pulzaci síly a zároveň nízkému výslednému počtu zubů – na délce 122 mm jich není možné udělat moc, navíc 2 drážky je dobré mít navíc jako kompenzaci okrajového jevu.

#### Komentář ke konzervativnímu návrhu:

Vychází stroj se statorem délky 300 mm a šířky 122,73 mm, pohyblivá část s PM má rozměry 134,27 x 122,73 mm. Drážka má profil přibližně 1:5, což je rozumné.

Pro drážku je volena proudová hustota 3 A/mm<sup>2</sup>, což by v reálu odpovídalo nějakým 7,5 – 8 A/mm<sup>2</sup> ve vodičích (při činiteli plnění drážky kolem 0,4), což už je poměrně značná hodnota na pasivně chlazený stroj, ale z tenkých drážek by vzniklé teplo mělo jít odvést.

#### Komentář ke VUES návrhu:

Z porovnání je zřejmé, že motor VUES (EL204) má cca 3x vyšší lineární proudovou hustotu, což může být dále ovlivněno činitelem vinutí a hlavně indukci ve vzduchové mezeře. Elektrické parametry stroje jsou ze štítku na pohyblivé části (část s vinutím), mechanické parametry jsou odměřené pravítkem.

Zda jsou výsledné hodnoty realistické je otázka – hodnoty Essonova činitele pro lineární stroje neznám, lineární proudová hustota odpovídá točivým strojům s vyšším elmg. Využitím. Na štítku zároveň není uveden způsob provozu stroje (Sx).

Při použití dat ze stroje VUES vychází stroj přiměřeně užší – pouze necelých 50 mm. Zároveň vychází díky vysoké proudové hustotě značně hluboká drážka s profilem 1:12, což je technologicky nevhodné. Z porovnání s měřenou výškou statoru VUES ( $h_{stat}$ ) je zřejmé, že hloubka drážky je větší, než samotná výška statoru, stroj VUES má tedy nejspíše vyšší proudovou hustotu vinutí. Aby se tyto jevy kompenzovaly, lze snížit lineární proudovou hustotu a navýšit proudovou hustotu vinutí a indukci v zubech – následná funkčnost je otázkou tepelného výpočtu a požadované suvné rychlosti stroje.

## 4 Tepelný výpočet

Vstupní data vzata z:

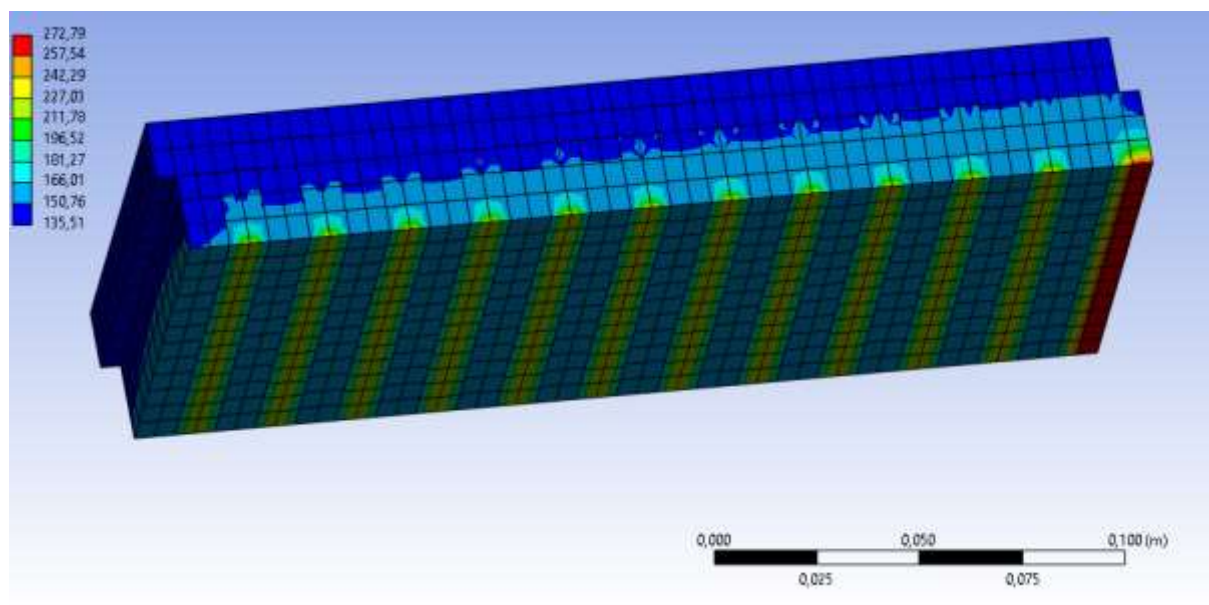
| $U_{bc}$ [V] | $U_f$ [V] | $I_n$ [A] | $S_v$ [mm <sup>2</sup> ] | $n_p$ [-] |
|--------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|
| 48           | 16,12     | 46,31     | 6,62                     | 13,16     |
| 60           | 20,15     | 37,05     | 5,29                     | 10,53     |
| 120          | 40,31     | 18,53     | 2,65                     | 5,27      |

$\xi = 0,95$  -  
 $P = 2240$  W  
 $m = 3$  -  
 $J = 7$  A/mm<sup>2</sup>  
 $Dd = 0,80$  mm  
 $Sd = 0,50$  mm<sup>2</sup>

Z toho vyplývá prostor 120mm x 100mm x 30mm objemu kde vzniká přerozdělených 220W ztrát při uvažované účinnosti stroje 90%.

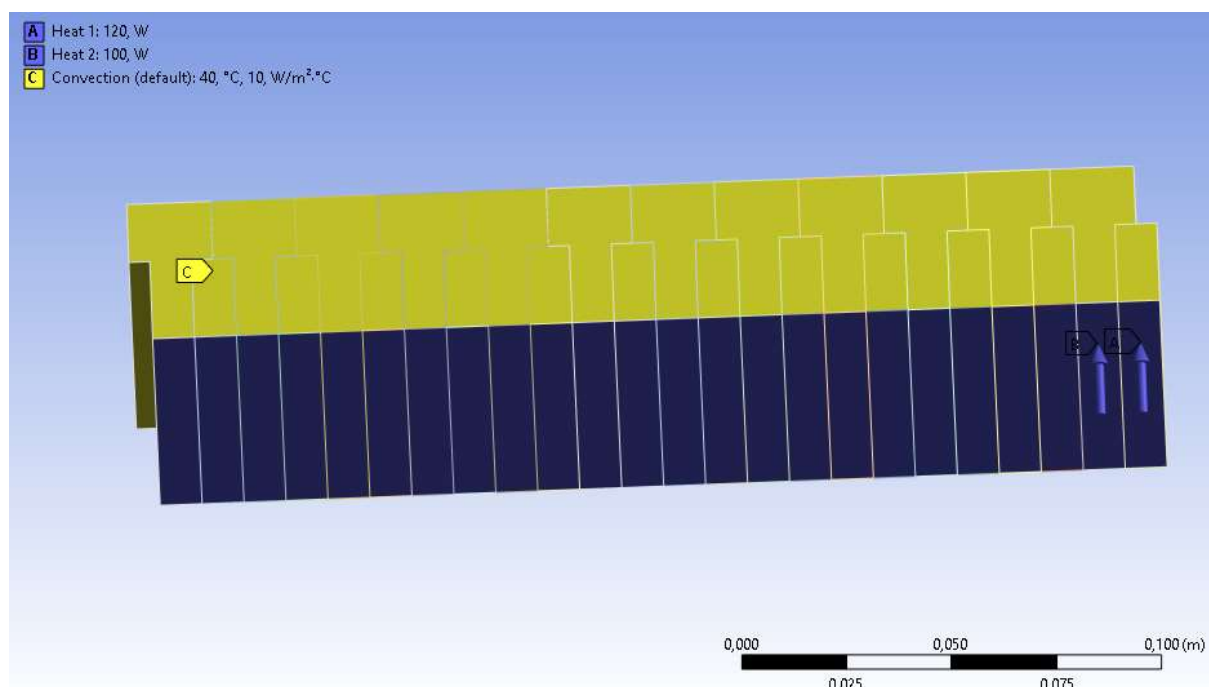
#### 4.1.1 První přiblížení

P ve vinutí=120W, P ve jhu=100W. Předpokládá se uzavřená varianta stroje s nejlépe IP68 ale i kdyby nižším IP stále s do jisté míry velmi uzavřeným strojem.



Obr. 7 Výsledky tepelného modelu

Při nastavení okrajových podmínek:



Obr. 8 Výsledky tepelného modelu

## Výsledky parametrického modelu

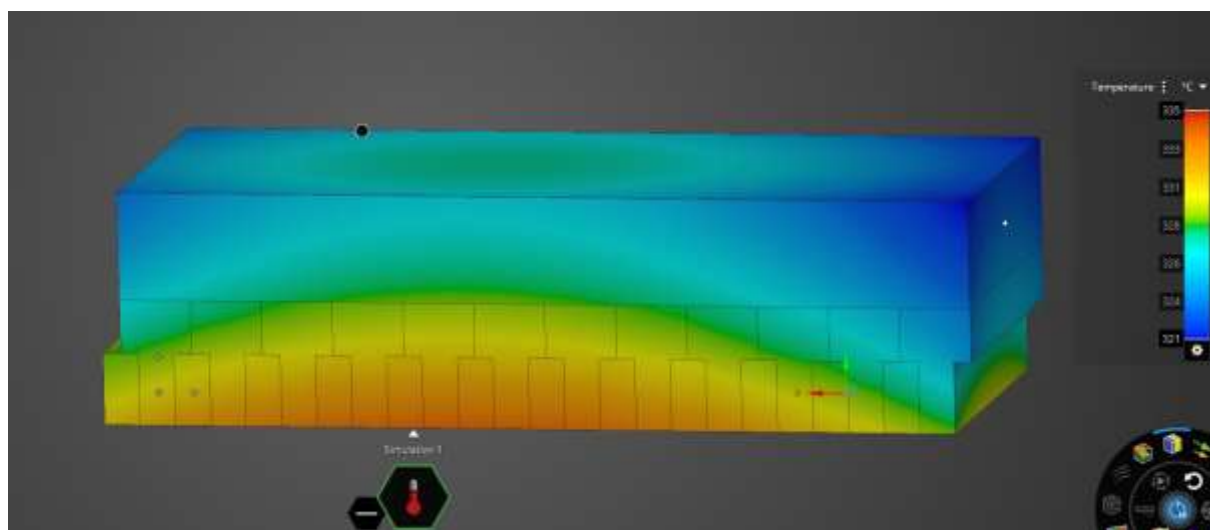
|                   | P vin (W) | P jho (W) | W/m2.K | T max (°C) | T avg (°C) |
|-------------------|-----------|-----------|--------|------------|------------|
| <b>Varianta 1</b> | 120       | 100       | 5      | 389,0      | 267,0      |
| <b>Varianta 2</b> | 120       | 100       | 10     | 272,8      | 155,2      |
| <b>Varianta 3</b> | 120       | 100       | 15     | 231,8      | 117,9      |
| <b>Varianta 4</b> | 120       | 100       | 20     | 209,9      | 99,3       |
| <b>Varianta 5</b> | 60        | 50        | 5      | 214,5      | 153,5      |
| <b>Varianta 6</b> | 60        | 50        | 10     | 156,4      | 97,6       |
| <b>Varianta 7</b> | 60        | 50        | 15     | 135,9      | 79,0       |
| <b>Varianta 8</b> | 60        | 50        | 20     | 125,0      | 69,6       |

**Legenda:**

ě

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| nedoporučuji | nesmysl              |
| na hraně     | pořádně přeq;počítat |
| bezpečné     | doporučeno           |

## Live Discovery ukázka



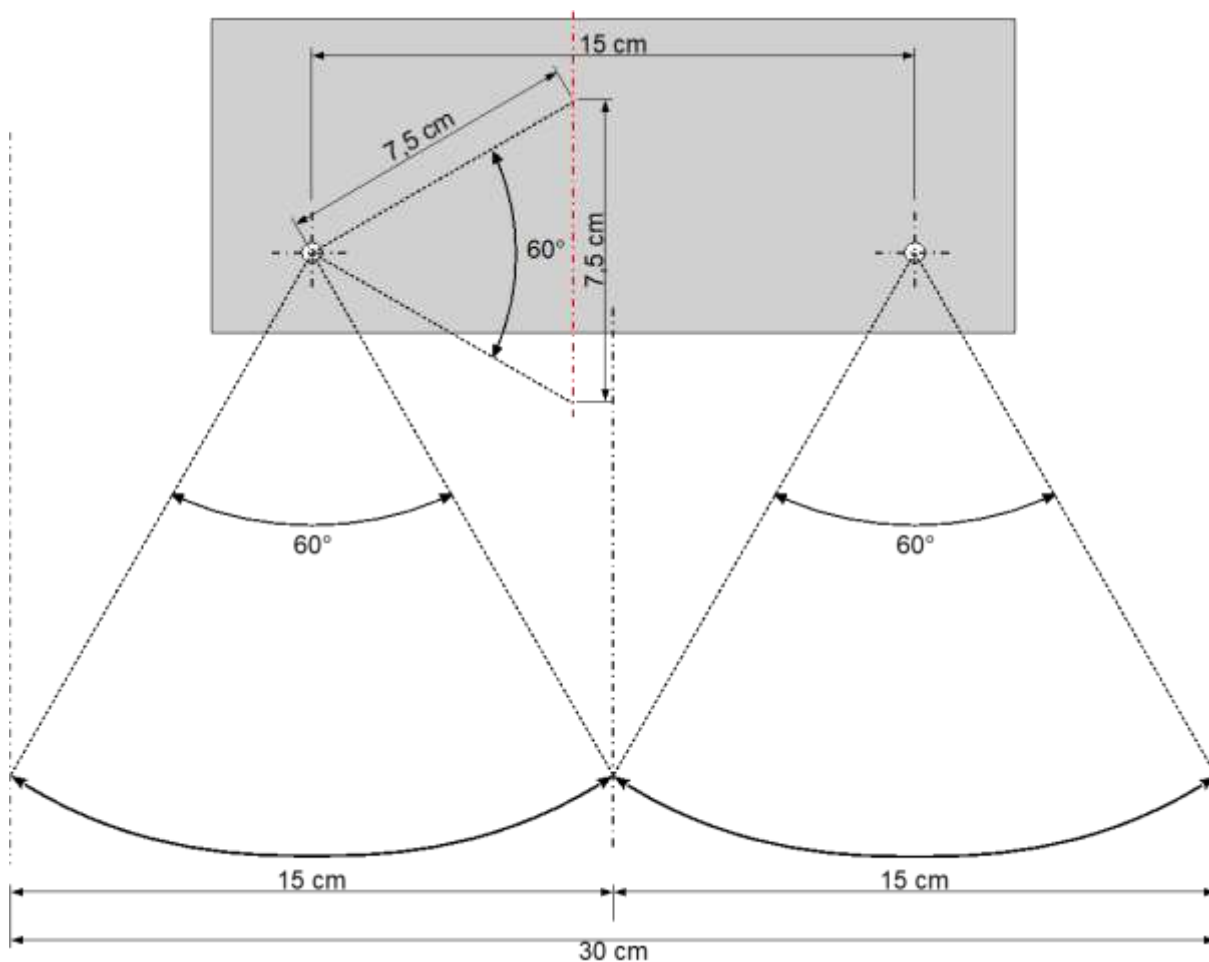
Obr. 9 Výsledky tepelného modelu



## 5 Prvotní analýza proveditelnosti

Návrh vychází z publikace: Mayer Daniel, Ulrych B.: Elektromagnetické aktuátory. BEN, Praha, 2009. ISBN 978-80-7300-216-9

V prvotní fázi uvažován aktuátor s pasívní kotvou (bez PM); uvažován pohon 1 aktuátor na 1 rádlo



Obr. 10 Analýza problému

Obdělávaná dráha: 30 cm, 2 rádla na dráhu. Aktuátor umístěný poblíž osy dráhu

Předpokládáno: rameno rádla 15 cm (rozkmit 60°), rameno aktuátoru 7,5 cm

Zanedbáno: tření v ose, změna délky ramene aktuátoru.

Pro 28 kmitů za sekundu, tažnou sílu 200 N na rádlo vychází:

Frekvence otáčení osy 9,3 Hz s momentem 30 Nm a výkonem 1760 W

(výkon je o cca 80 W vyšší, než v případě lineárního PMSM)

Pro poměr ramen aktuátoru je minimální požadovaná síla aktuátoru 400 N

Pro první iteraci je volen pasivní aktuátor s akční délkou 75 mm, vnějším průměrem 150 mm a průměrem kotvy 60 mm

Rozměry voleny:

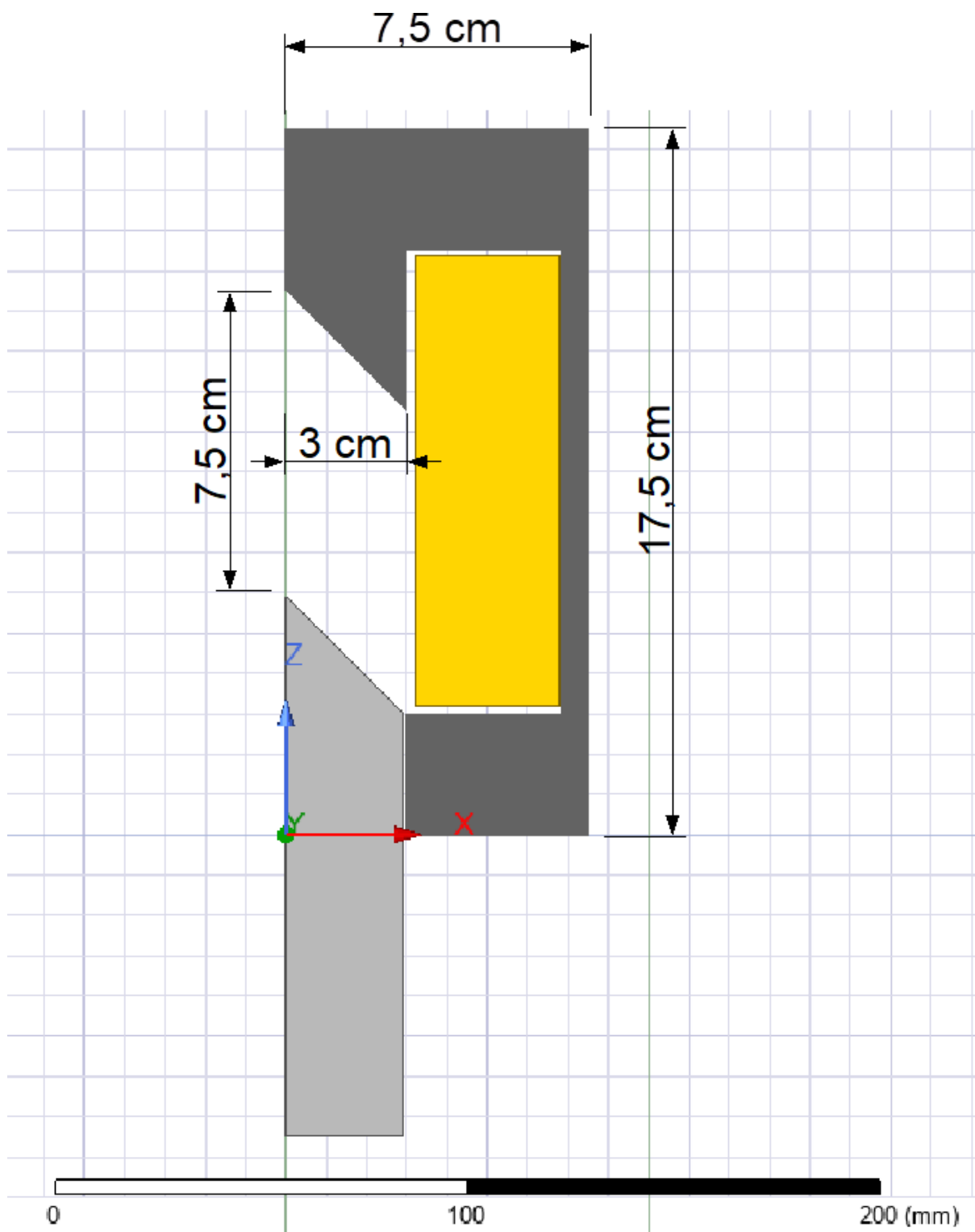
s ohledem na maximální zástavbový prostor

s ohledem na minimalizaci proudové hustoty

ve vinutí

Není řešen počet závitů vinutí ve vztahu k napájecímu napětí, pouze pro potřeby výpočtu indukčnosti je předpokládáno  $N_c = 1000$  závitů (možné při použití vodiče cca 1 mm x 3,5 mm)

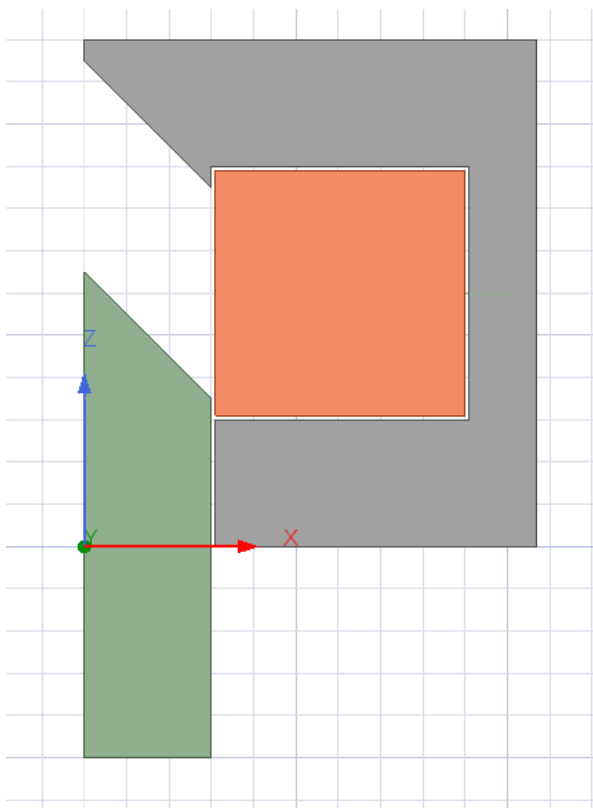
Pro  $J_c = 3$  A vychází „jmenovitý“ proud cívkou  $I_c = 13365$  A (~ 13,365 A vodičem při  $N_c = 1000$  z)



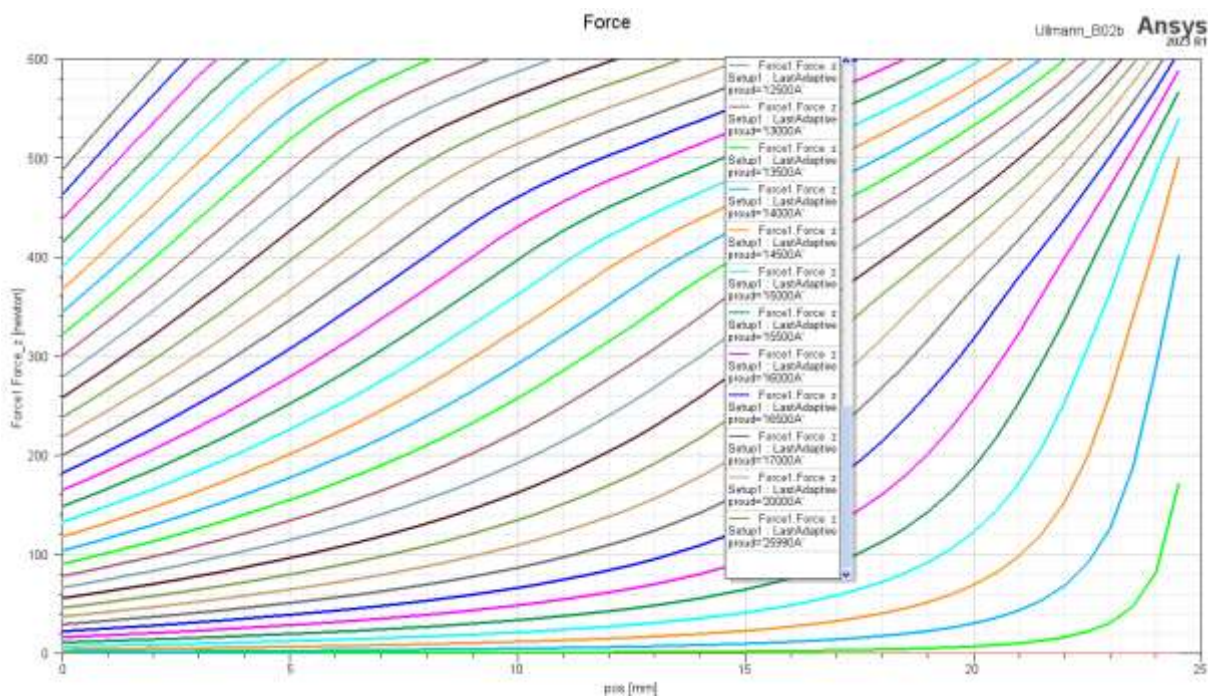
Obr. 11 Řešení, resp. výsledek řešení

## 6 Aktuátor, řešení verze v2

Bez PM, 53mm šířka poloviny, 60mm výška

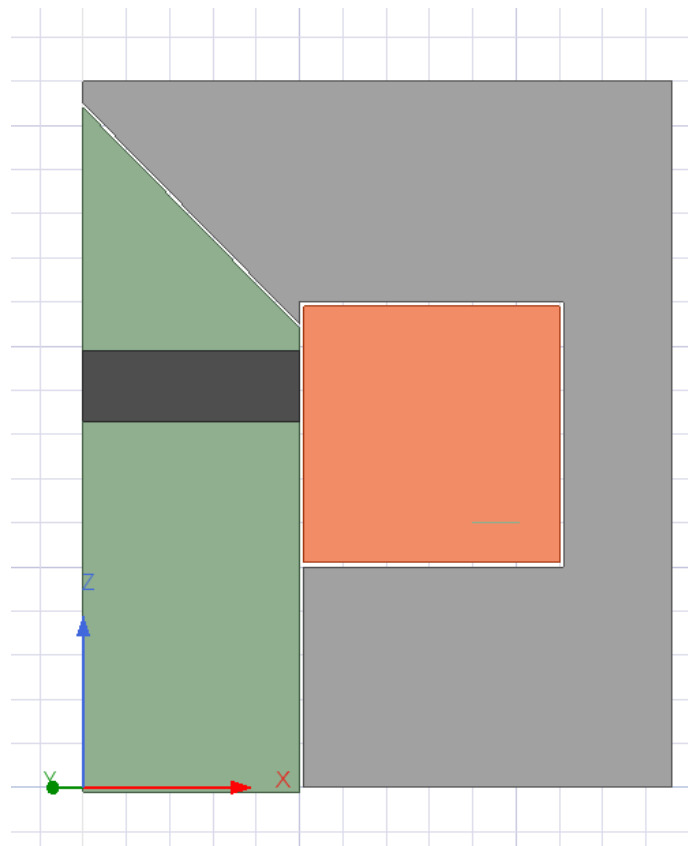


Obr. 12 Řešení, resp. výsledek řešení

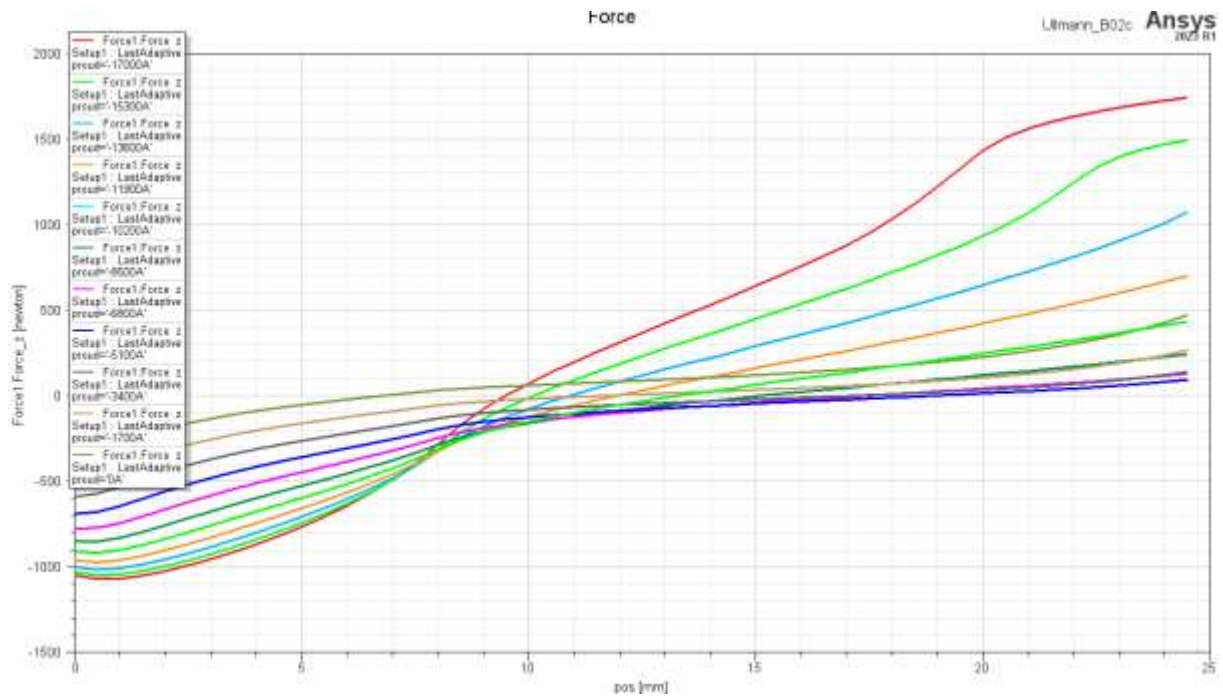


Obr. 13 Řešení, resp. výsledek řešení

S PM, 68mm šířka poloviny, 80mm výška



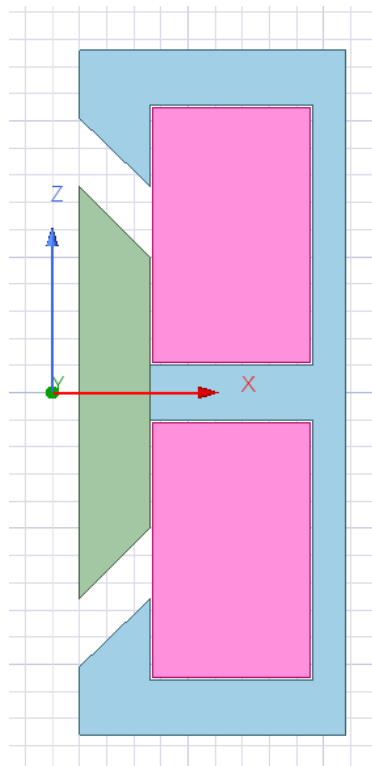
Obr. 14 Řešení, resp. výsledek řešení



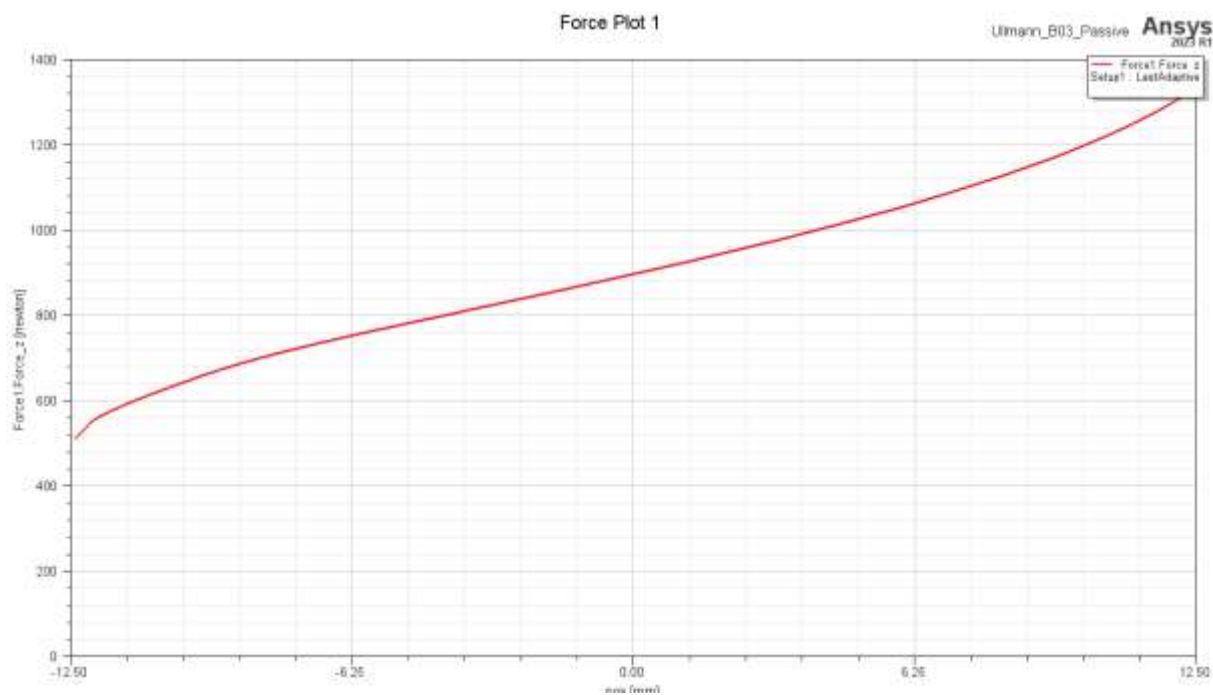
Obr. 15 Řešení, resp. výsledek řešení

## 7 Aktuátor, řešení verze v3, oboustranný

bez PM, 49mm šířka poloviny, 126mm výška



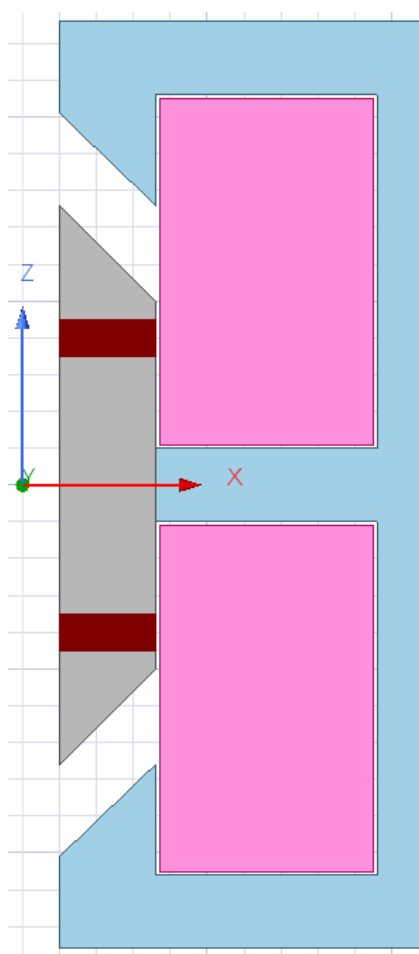
Obr. 16 Řešení, resp. výsledek řešení



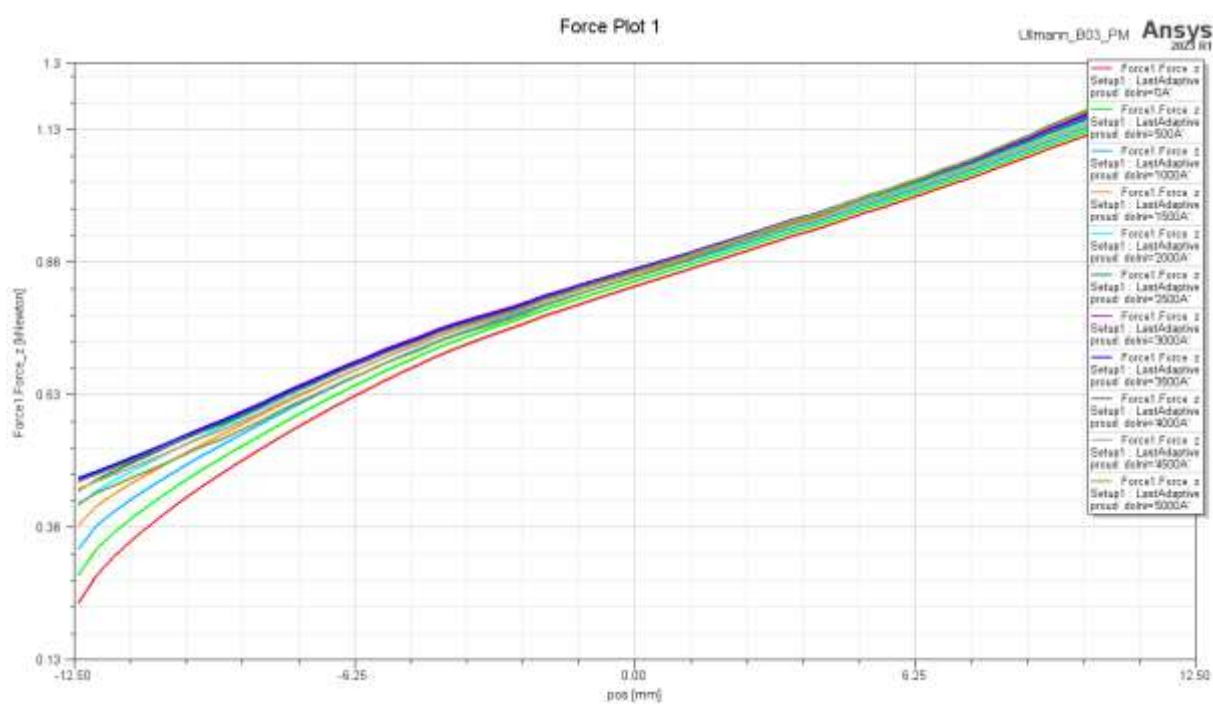
Obr. 17 Řešení, resp. výsledek řešení



S PM, 49mm šírka poloviny, 126mm výška



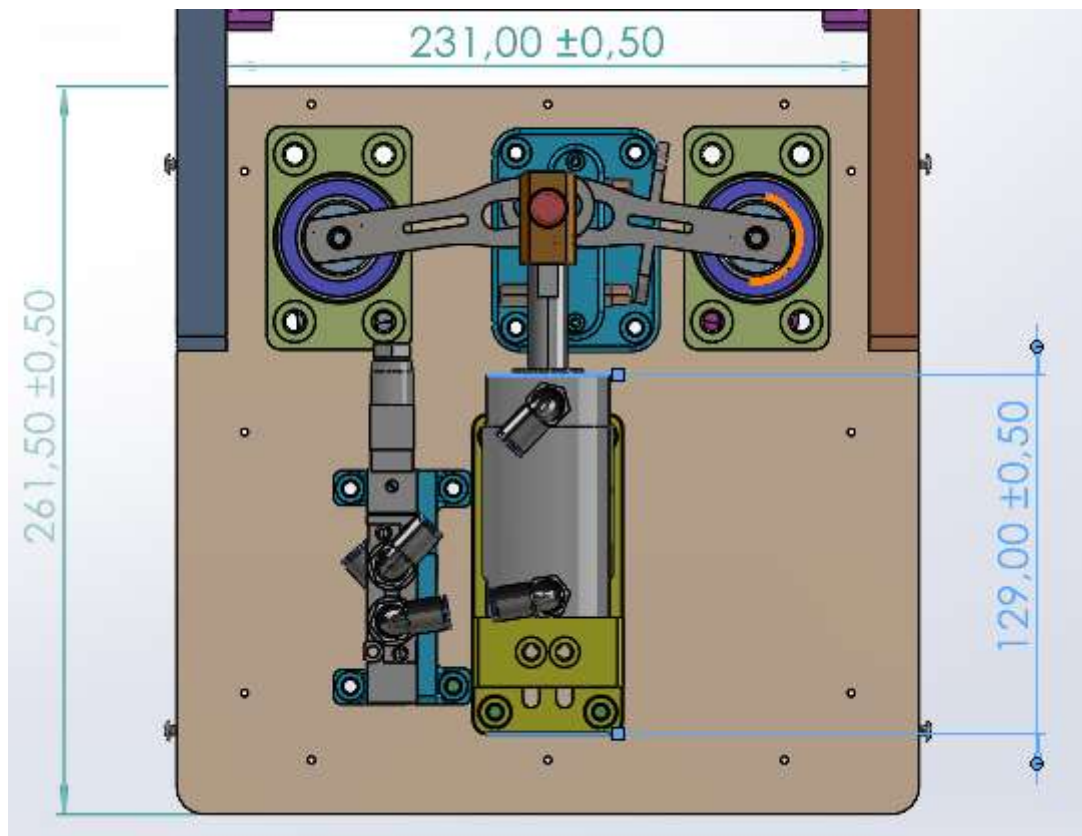
Obr. 18 Řešení, resp. výsledek řešení



Obr. 19 Řešení, resp. výsledek řešení

## 8 Aktuátor, řešení verze v4 – SRM

Tato verze je zatím další nápad na řešení problému, odpadlo by přepákování, moment cca 30Nm, přesazené uložení, na výšku není limitace, vyšší počet pólů. Maximální dostupný prostor mezi řádky je 30cm.



Obr. 20 Rozměry dispozičního prostoru

| předpoklady        |             | SynRM ekvivalent    |                              | SRM                 |                     |
|--------------------|-------------|---------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|
| $U_{DC} =$         | 120 V       | $\alpha_{\delta} =$ | 0,637 -                      | $m_1 =$             | 3 -                 |
| $R_{max} =$        | 70 mm       | $A =$               | 30000 A/m                    | $K_1 =$             | 4 -                 |
| $f_{kmit} =$       | 28 Hz       | $B_{\delta} =$      | 0,90 T                       | $N_c =$             | 40 -                |
| $\varphi_{kmit} =$ | 60 °        | $k_{v1} =$          | 0,92 -                       | $N_r =$             | 10 -                |
| $M =$              | 30 Nm       | $k_B =$             | 1,00 -                       | $B_{\delta} =$      | 0,90 T              |
| $\eta =$           | 0,9 -       | $\cos$              |                              | $\alpha_{\delta} =$ | 0,637 -             |
| $k_d =$            | 0,7 -       | $\varphi =$         | 0,70 -                       | $k_{Fe} =$          | 0,95 -              |
| dopočtené veličiny |             | $C =$               | 2601,24 VA/m <sup>3</sup> ot | $B_z = B_j =$       | 1,6 T               |
|                    |             | $S_i =$             | 2792,53 VA                   | $k_d =$             | 0,5 -               |
|                    |             | $l_{Fe} =$          | 199,61 m                     | $J =$               | 6 A/mm <sup>2</sup> |
| $n_s =$            | 9,33 ot/s   |                     |                              | $\varepsilon =$     | 0,209 rad           |
| $n_{min} =$        | 560 ot/min  |                     |                              | $Q_1 =$             | 12                  |
| $\omega =$         | 58,64 rad/s |                     |                              | $\Phi =$            | 0,00268 Wb          |
| $P =$              | 1759,29 W   |                     |                              |                     |                     |
| $P_p =$            | 1954,77 W   |                     |                              |                     |                     |
| $D_e =$            | 140 mm      |                     |                              | $t_p =$             | 30,79 mm            |

$$D_1 = 98 \text{ mm}$$

$$l_{Fe} = 151,85 \text{ mm}$$

$$b_z = 11,61 \text{ mm}$$

$$\text{zaokr. } b_z = 12 \text{ mm}$$

$$h_j = 5,80 \text{ mm}$$

$$\text{zaokr. } h_j = 6 \text{ mm}$$

$$t_d = 25,66 \text{ mm}$$

$$b_d = 13,66 \text{ mm}$$

$$h_d = 15 \text{ mm}$$

$$S_d = 204,85 \text{ mm}^2$$

$$S_{Cu} = 102,42 \text{ mm}^2$$

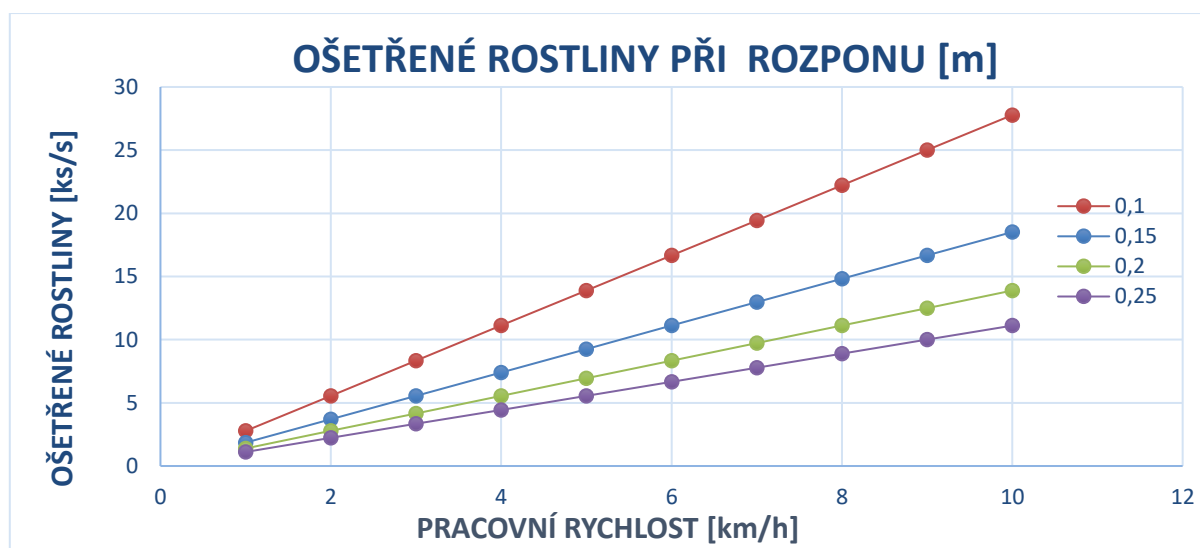
$$S_v = 2,56 \text{ mm}^2$$

$$I_v = 15,36 \text{ A}$$

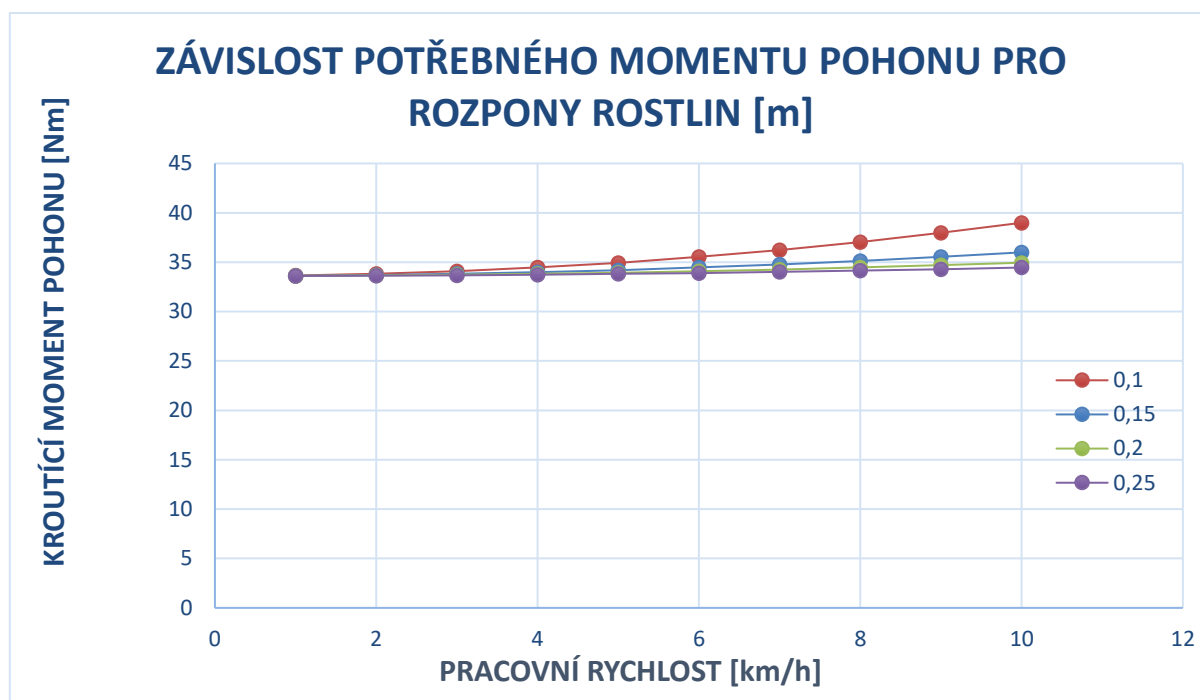
$$P_p = 1843,61 \text{ W}$$

## 9 Přímý servopohon rádla

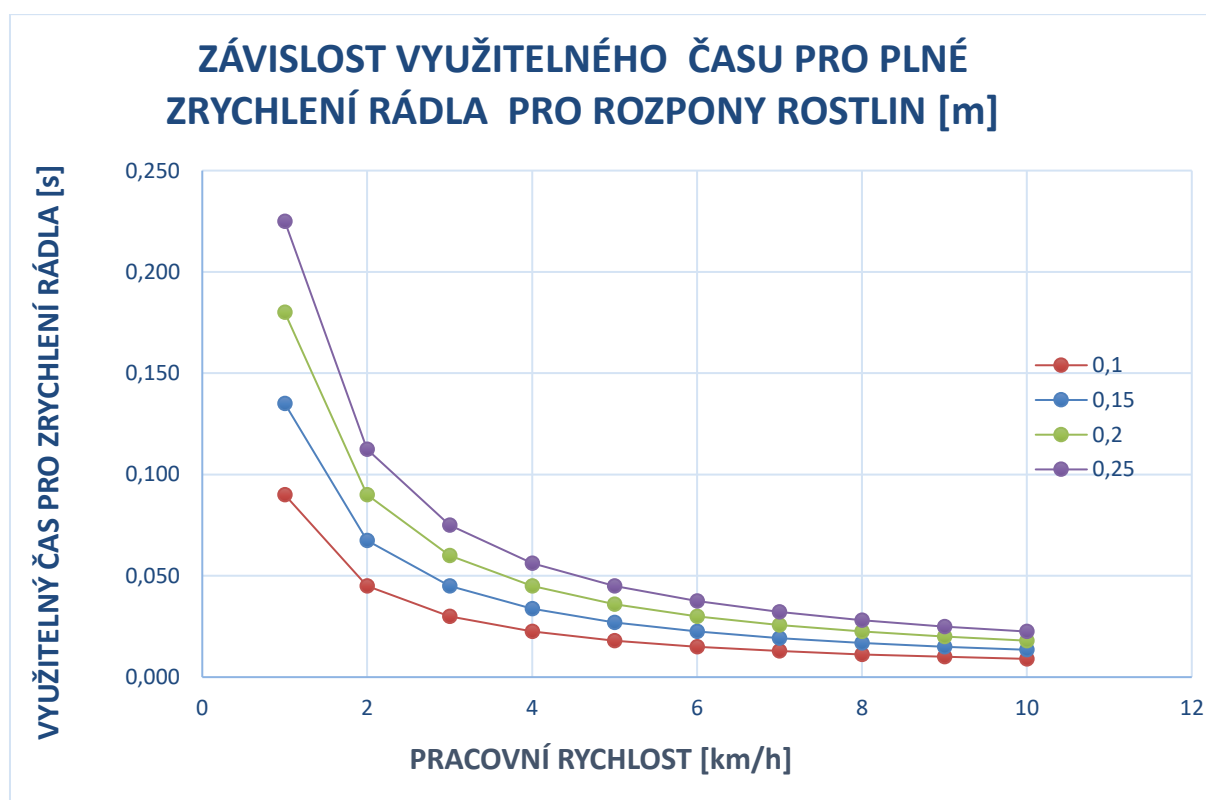
Předkládaná verze se zaměřuje na využití stávající kinematiky pohybu radel a jejich uložení v rámci pracovní platformy s minimálním dopadem na konstrukční změny. Byla zkoumaná závislost nutného špičkového kroutícího momentu v ose rotace rádla v závislosti na předpokládané pracovní rychlosti tažného prostředku a závislost potřebné časové dotace kmitu rádla opět na očekávané pracovní rychlosti tažného prostředku. V obou analýzách je také zahrnut typický interval secích rozponů ošetřovaných rostlin.



Obr. 21 Počet ošetřených rostlin



Obr. 22 Potřebný špičkový kroutící moment rádla



Obr. 23 Řešení, resp. výsledek řešení

Z výsledků provedených analýz vyplývá, že většinový podíl potřebného kroutícího momentu pro zajištění kmitu rádla je využit pro překonání odporu pohybu rádla v půdě

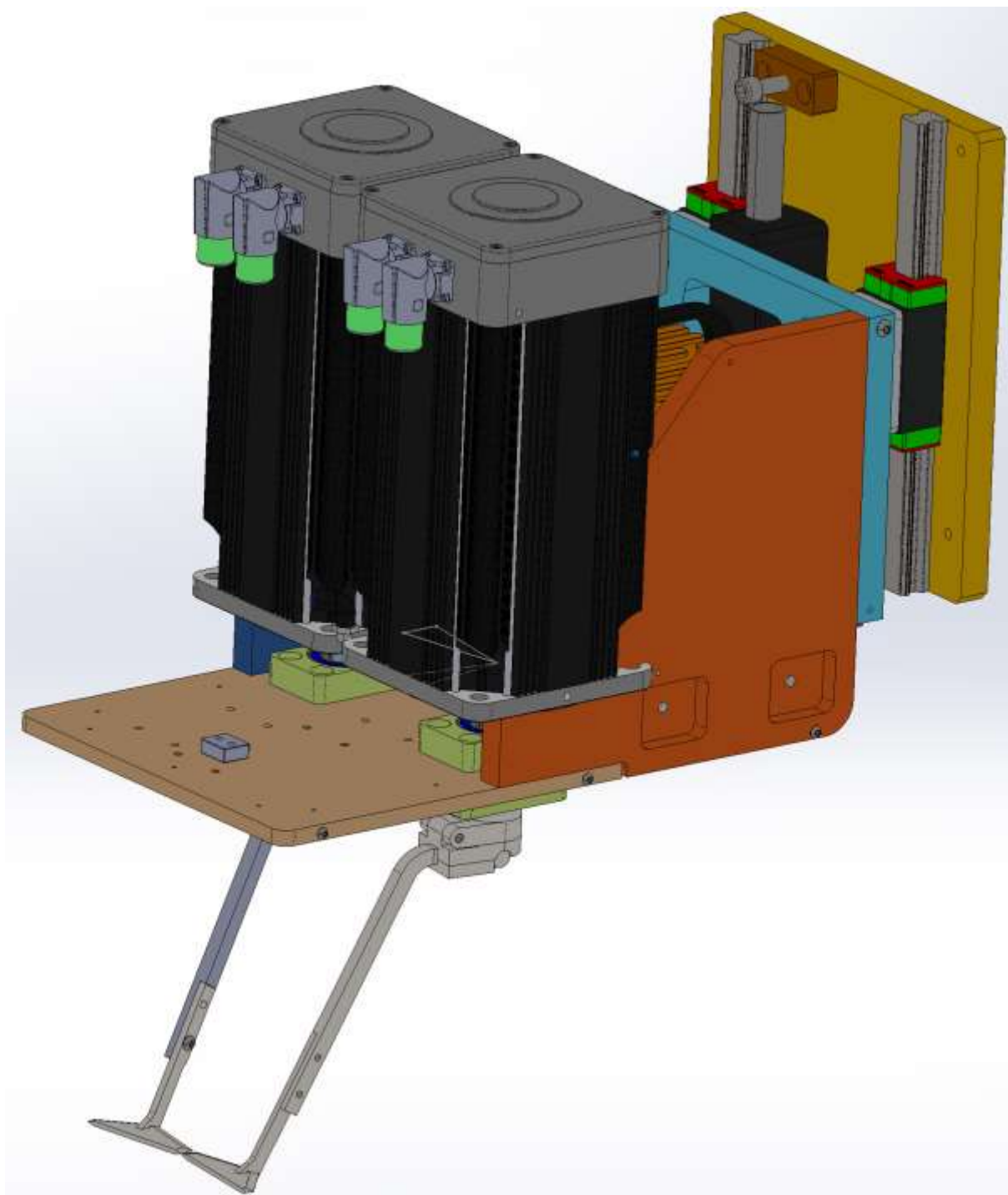
(hodnota odporu pohybu experimentálně změřena), podíl krouťicího momentu pro překonání dynamických účinku rádla při pohybu je minoritní, nicméně roste se zvyšující se pracovní rychlostí tažného prostředku a se snižující se rozponem rostlin.

Při aplikaci komerčně dostupných typických představitelů servopohonů bez přídavné převodovky by bylo na základě předběžného odhadu jmenovitého krouťicího momentu nutno volit řádově výkonové řady 3,5 kW+, např. TETRA 142-21-17 fy Motor Power Company, viz níže.

| <b>TETRA 142 RATINGS AND SPECIFICATIONS Sizes 21 - 25,5</b>                                   |               |                                                                                                                    |                                                                                        |                                     |                                                         |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------|
| TIME RATING<br>INSULATION CLASS<br>ENCLOSURE<br>PROTECTION CLASS<br>INSULATION SYSTEM UL /CSA |               | Continuous<br>F<br>Totally enclosed, Self-cooled<br>IP 65 standard on the body<br>cULRus , DV155J File nr.:E216686 | AMBIENT TEMPERATURE<br>AMBIENT HUMIDITY<br>POLES<br>THERMAL PROTECTION<br>CE certified |                                     | 0 to 40 °C<br>5 to 85% (non-condensing)<br>6<br>PT 1000 |              |
|                                                                                               |               |                                                                                                                    | T142 21 15                                                                             | T142 21 17                          | T142 25,5 15                                            | T142 25,5 17 |
| Continuous stall torque                                                                       | $M_0$         | Nm                                                                                                                 | 18                                                                                     | 18                                  | 21                                                      | 21           |
| Peak torque                                                                                   | $M_{max}$     | Nm                                                                                                                 | 55                                                                                     | 55                                  | 65                                                      | 65           |
| Nominal torque                                                                                | $M_n$         | Nm                                                                                                                 | 13,1                                                                                   | 13,1                                | 15,9                                                    | 15,9         |
| Rated voltage                                                                                 | $U_n$         | Vac                                                                                                                | 230                                                                                    | 400                                 | 230                                                     | 400          |
| Nominal power                                                                                 | $P_N$         | W                                                                                                                  | 4100                                                                                   | 4100                                | 5000                                                    | 5000         |
| Continuous stall current                                                                      | $I_0$         | Arms                                                                                                               | 19,8                                                                                   | 11,2                                | 23,1                                                    | 13,1         |
| Maximum current                                                                               | $I_{max}$     | Arms                                                                                                               | 60,5                                                                                   | 34,3                                | 71,4                                                    | 40,5         |
| Nominal current                                                                               | $I_N$         | Arms                                                                                                               | 15,1                                                                                   | 8,5                                 | 18,4                                                    | 10,4         |
| Nominal working speed                                                                         | $n_N$         | rpm                                                                                                                | 3000                                                                                   | 3000                                | 3000                                                    | 3000         |
| Maximum working speed 230VAC                                                                  | $n_{max}$     | rpm                                                                                                                | 3900                                                                                   | 2200                                | 3900                                                    | 2200         |
| Maximum working speed 400VAC                                                                  | $n_{max}$     | rpm                                                                                                                | 4400                                                                                   | 3900                                | 4400                                                    | 3900         |
| Torque constant                                                                               | $k_t$         | Nm/Arms                                                                                                            | 0,91                                                                                   | 1,60                                | 0,91                                                    | 1,60         |
| Voltage constant                                                                              | $K_{ec-v}$    | Vrms/Krpm                                                                                                          | 55                                                                                     | 97                                  | 55                                                      | 97           |
| Winding resistance                                                                            | $R_{20-v}$    | Ohm                                                                                                                | 0,25                                                                                   | 0,8                                 | 0,24                                                    | 0,8          |
| Winding inductance                                                                            | $L_{20-v}$    | mH                                                                                                                 | 1,4                                                                                    | 4,5                                 | 1,3                                                     | 4,2          |
| Electrical time constant                                                                      | $T_e$         | ms                                                                                                                 | 5,6                                                                                    | 5,6                                 | 5,4                                                     | 5,5          |
| Thermal resistance                                                                            | $^{\circ}C/W$ | $^{\circ}C/W$                                                                                                      | 0,46                                                                                   | 0,45                                | 0,36                                                    | 0,34         |
| Mechanical time constant<br>HL = high/low rotor inertia                                       | $T_m$         | ms                                                                                                                 | 2,8/1,6                                                                                | 2,9/1,7                             | 3,0/1,8                                                 | 3,1/1,8      |
| High rotor inertia (as an option) (*)                                                         | $J_M$         | Kg cm <sup>2</sup>                                                                                                 | 61,2                                                                                   | 61,2                                | 68,9                                                    | 68,9         |
| Low rotor inertia (standard) (*)                                                              | $J_M$         | Kg cm <sup>2</sup>                                                                                                 | 36,1                                                                                   | 36,1                                | 40,5                                                    | 40,5         |
| Mass without holding brake                                                                    | $m$           | Kg                                                                                                                 | 18,5                                                                                   | 18,5                                | 20,5                                                    | 20,5         |
| Mass with holding brake                                                                       | $m$           | Kg                                                                                                                 | 20,7                                                                                   | 20,7                                | 22,7                                                    | 22,7         |
| Maximum axial shaft load                                                                      |               | N                                                                                                                  |                                                                                        | 240 (applied on the shaft's center) |                                                         |              |
| Maximum radial shaft load                                                                     |               | N                                                                                                                  |                                                                                        | 800 (applied on the shaft's center) |                                                         |              |

Rated output with 350 x 350 x 20 mm stainless steel sink flange coupling - Couplings must be considered if the oil seal is applied - IP 54 standard shaft bearing  
(\*) without brake and without feedback

Obr. 24 Technické parametry TETRA 142-21-17



Obr. 25 Náhled zástavby při použití TETRA 142-21-17

## 10 Návrhy k řešení

- Fixovat napájecí napětí
- Vyřešit možnosti kontroly polohy a řízení
- Ekonomicky; poptat motůrky s převodovkami,

## Literatura

[1] <https://www.ullmanna.eu/>



## Seznam obrázků

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 Schematický náčrtek řešeného problému .....    | 7  |
| Obr. 2 Foto z měření .....                            | 8  |
| Obr. 3 Foto z měření .....                            | 8  |
| Obr. 4 Foto z měření .....                            | 9  |
| Obr. 5 Foto z měření .....                            | 9  |
| Obr. 6 Foto z měření .....                            | 10 |
| Obr. 7 Výsledky tepelného modelu .....                | 15 |
| Obr. 8 Výsledky tepelného modelu .....                | 15 |
| Obr. 9 Výsledky tepelného modelu .....                | 16 |
| Obr. 10 Analýza problému .....                        | 17 |
| Obr. 11 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 19 |
| Obr. 12 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 20 |
| Obr. 13 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 20 |
| Obr. 14 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 21 |
| Obr. 15 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 21 |
| Obr. 16 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 22 |
| Obr. 17 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 22 |
| Obr. 18 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 23 |
| Obr. 19 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 23 |
| Obr. 20 Rozměry dispozičního prostoru .....           | 24 |
| Obr. 21 Počet ošetřených rostlin .....                | 25 |
| Obr. 22 Potřebný špičkový krouticí moment rádlu ..... | 26 |
| Obr. 23 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 26 |
| Obr. 24 Technické parametry TETRA 142-21-17 .....     | 27 |
| Obr. 25 Řešení, resp. výsledek řešení .....           | 28 |

## Historie revizí

| Rev. | Kapitola | Popis změny                    | Datum      | Jméno                 |
|------|----------|--------------------------------|------------|-----------------------|
| 0    | 01       | Základní technická specifikace | 13.03.2023 | L. Veg, T. Glasberger |
| 1    | Všechny  | Doplnění o elmag. výpočty      | 12.5.2023  | L. Veg                |
| 2    | Všechny  | Doplnění                       | 1.12.2023  | L. Veg                |
| 3    | Všechny  | Souhrnné úpravy                | 1.12.2024  | L.Veg                 |
|      |          |                                |            |                       |
|      |          |                                |            |                       |
|      |          |                                |            |                       |
|      |          |                                |            |                       |
|      |          |                                |            |                       |
|      |          |                                |            |                       |
|      |          |                                |            |                       |