

Západočeská univerzita v Plzni  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# NÁVRH INDUKČNÍHO LEVITAČNÍHO SYSTÉMU

Bakalářská práce

**Autor práce:**

**Jiří Prágr**

**Vedoucí práce:**

**Ing. Karel Slobodník**

# Cíl práce

- Studie teorie elektromagnetické levitace
- Návrh numerického modelu a jeho simulace
- Sestavení experimentálního modelu
- Měření na experimentálním modelu
- Porovnání výsledku teorie a praxe



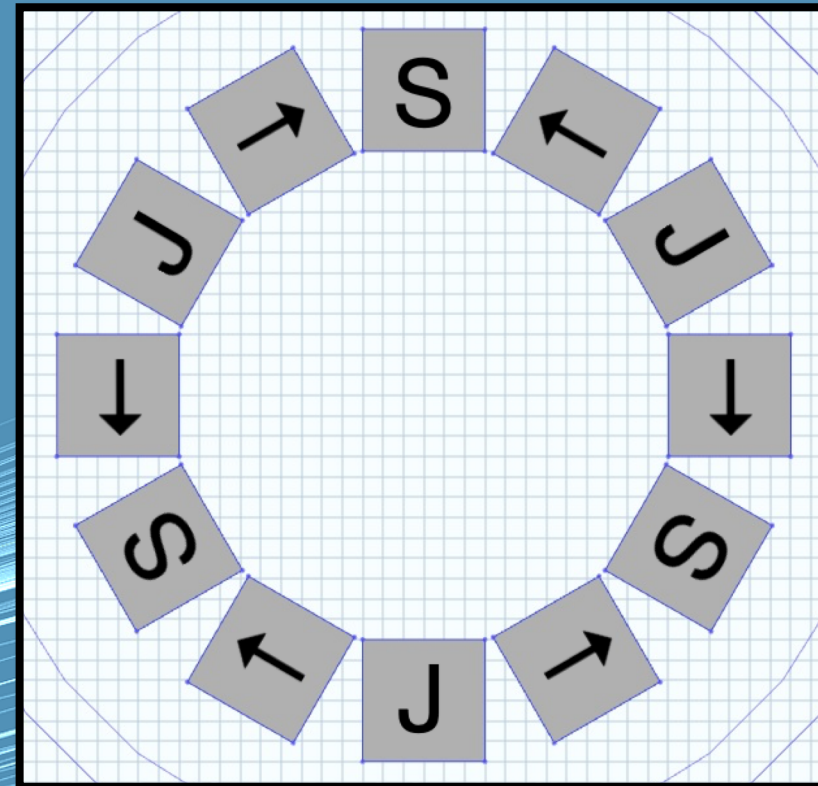
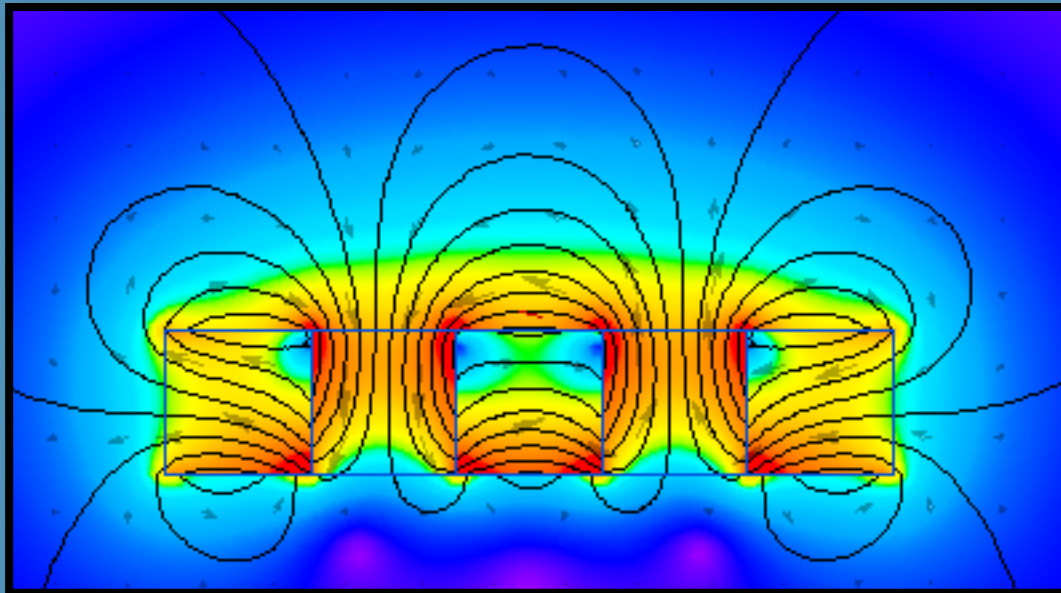
# Elektrodynamická levitace

$$u_{ip} = \oint \frac{(\vec{v} \times \vec{B})}{c} dl$$

- Pohyb vodiče v magnetickém poli
- Indukované napětí → vířivé proudy
- Vznik opačného magnetického pole
- Interakce polí

# Halbachova sestava

- Speciální uspořádání permanentních magnetů
- Na jedné straně silné, na druhé velice slabé pole

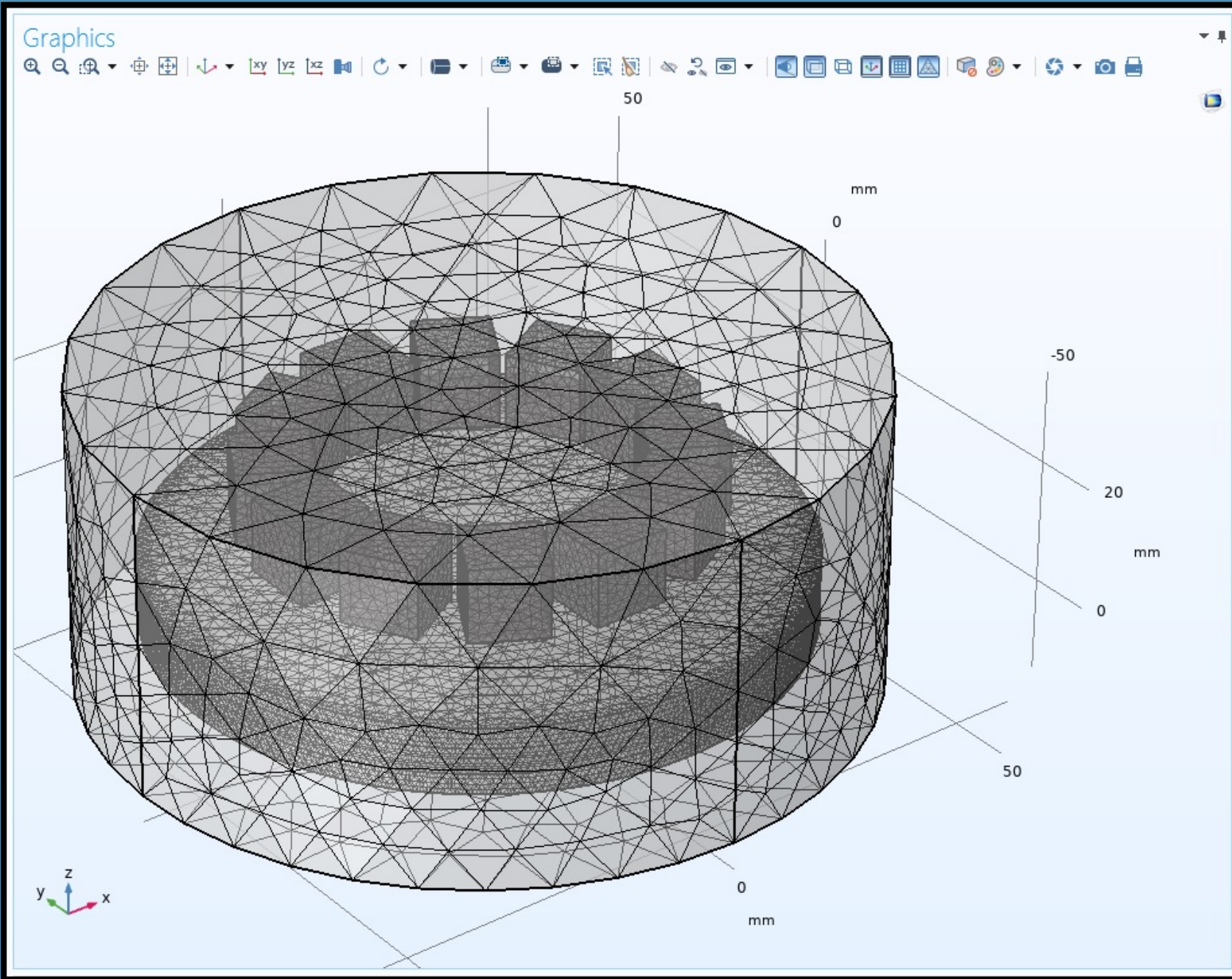




# Numerický model

- COMSOL Multiphysics
- Fyzikální prostředí: Rotating Machinery, Magnetic
- Geometrie modelu
- Definice Ampérovo zákona
- Vytvoření výpočtové sítě
- Zpracování výsledků

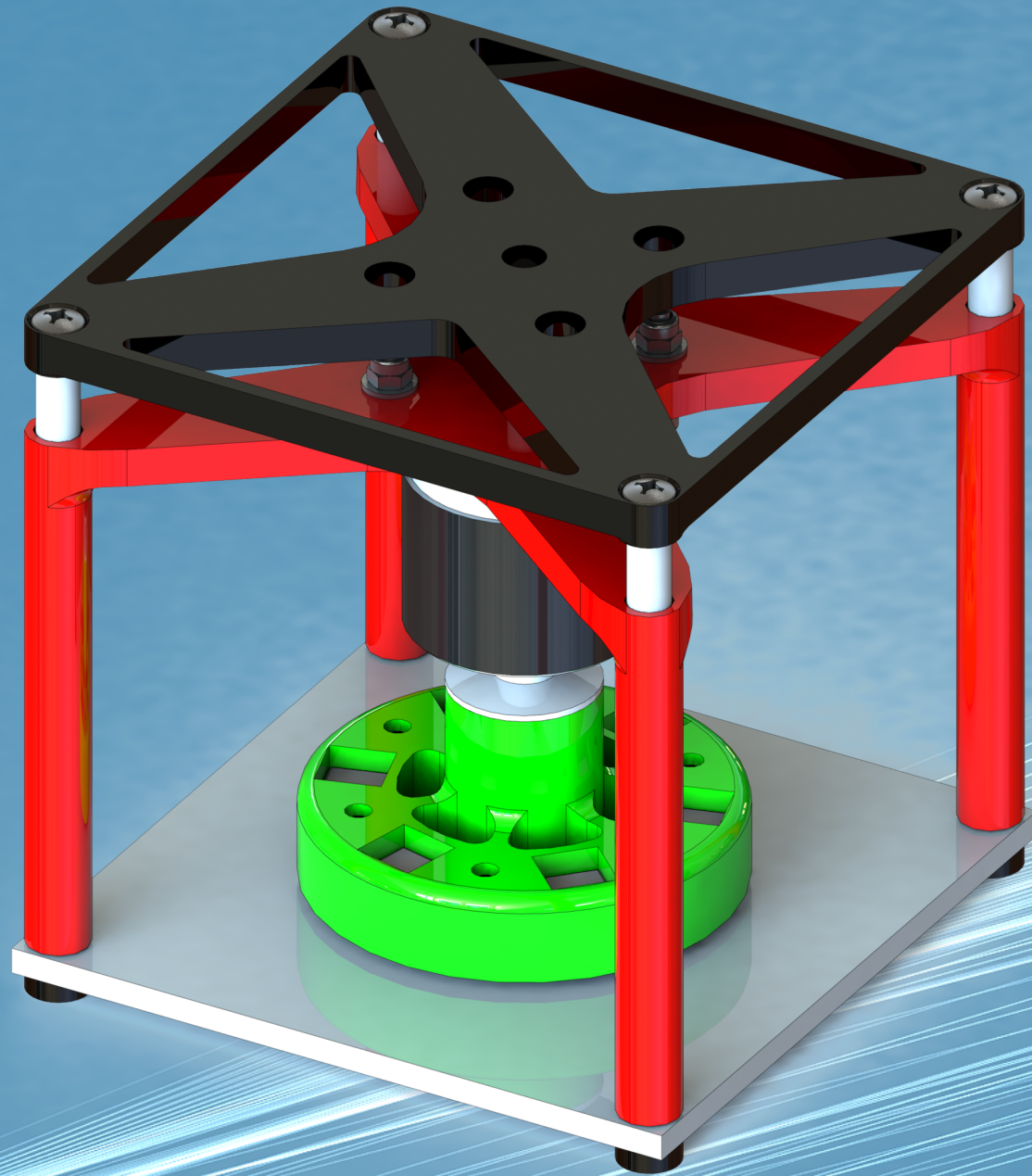






# Experimentální model

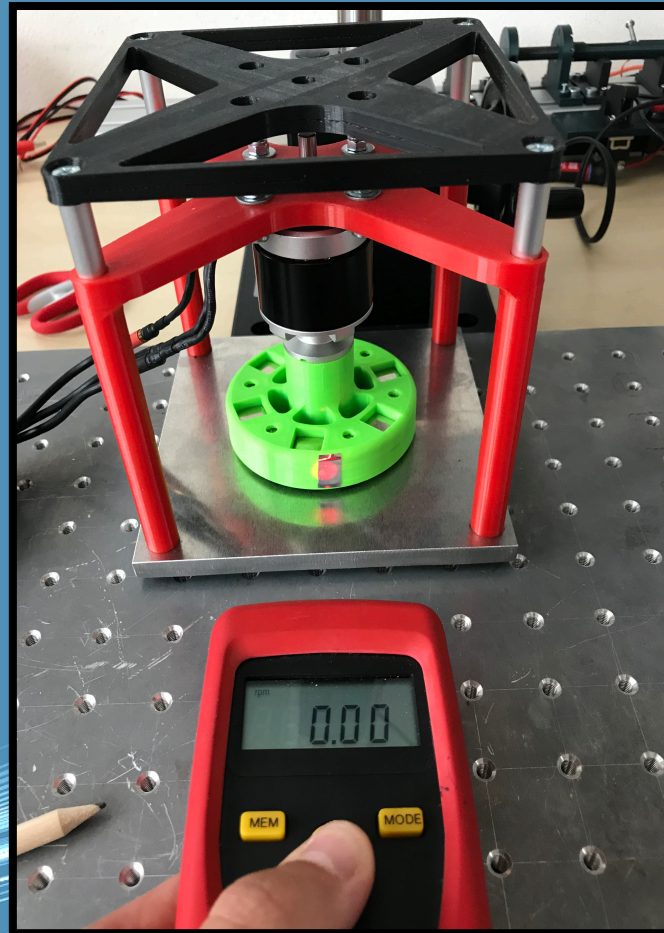
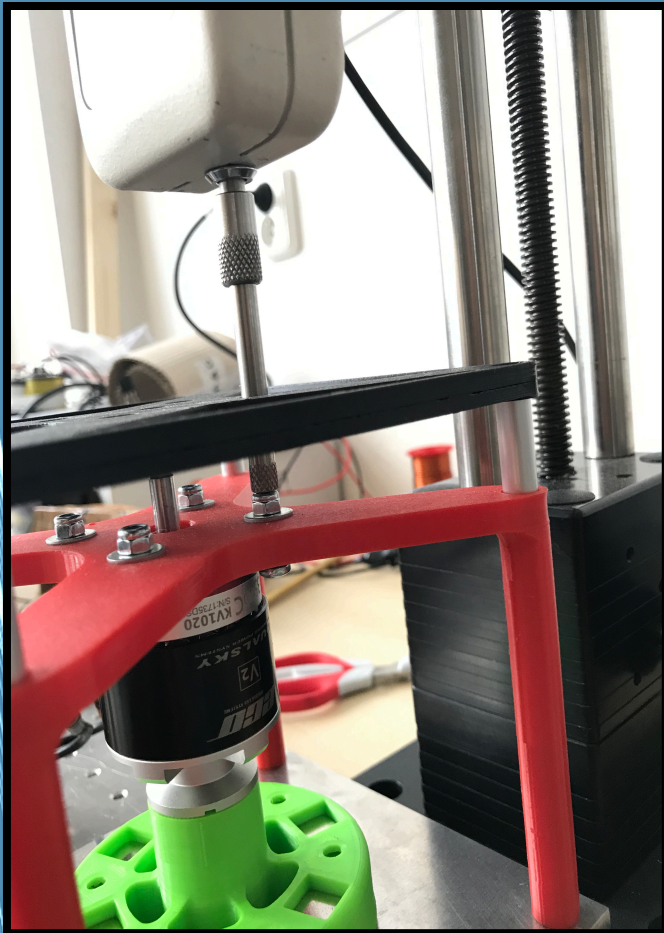
- Stabilizace pomocí vhodné konstrukce
- Pohyb jen ve směru osy Z
- BLDC motor + ESC obvod





# Měření na modelu

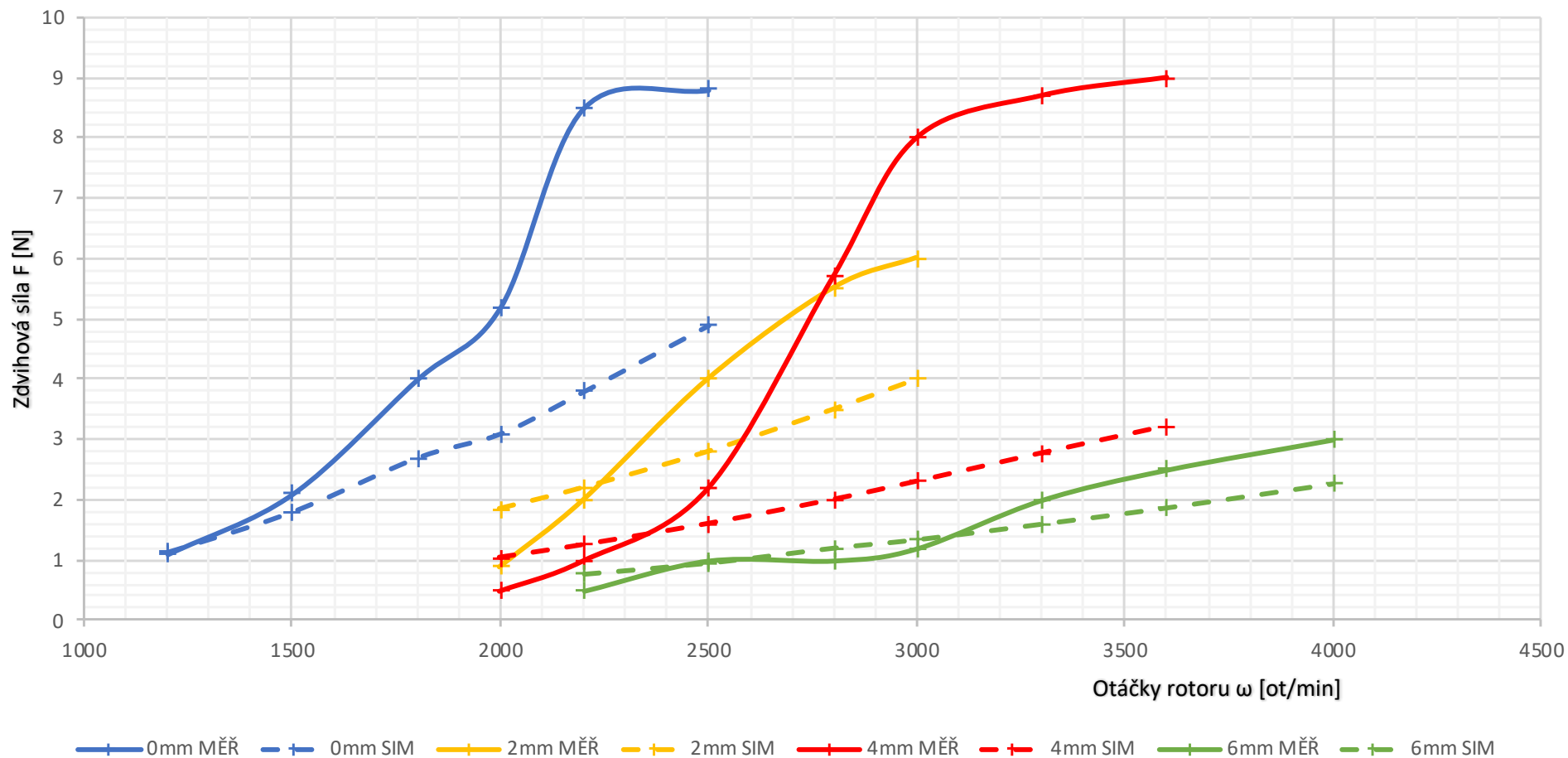
- Závislost zdvihové síly na otáčkách rotoru





# Výsledky z měření

Závislost zdvihové síly na otáčkách levitačního systému pro různé výšky vertikálně pohyblivé části





# Závěr

- Zdvihová síla se s otáčkami zvětšuje
- Levitace začíná při 1800ot/min
- Maximální výška 20mm při 4000ot/min
- Levitace bez stabilizační konstrukce

**Děkuji za pozornost**



# Otázky oponenta

- Popište podrobněji matematický a numerický model uvedený v bakalářské práci.

# Model Builder

- Union 1 (uni1)
- Work Plane 1 (wp1)
  - Plane Geometry
    - Rectangle 1 (r1)
    - Rotate 1 (rot1)
  - xy View 2
  - Extrude 1 (ext1)
  - Union 2 (uni2)
  - Form Assembly (fin)
- Materials
  - Air (mat1)
  - Aluminum [solid,bulk] (mat4)
  - N35 (Sintered NdFeB) (mat3)
- Rotating Machinery, Magnetic (mmm)
  - Electric Field Transformation 1
  - Ampère's Law 1
  - Mixed Formulation Boundary 1
  - Magnetic Insulation 1
  - Initial Values 1
  - Air, formulation for nonconducting
  - Permanent magnet, formulation for
  - Permanent magnet, formulation for
  - Permanent magnet, formulation for
  - Permanent magnet, formulation for
  - Gauge Fixing for A-field 1
  - Continuity 1
  - Zero Magnetic Scalar Potential 1
  - External Current Density 1
  - Force Calculation 1
  - Electric Currents (ec)
    - Current Conservation 1
    - Electric Insulation 1
    - Initial Values 1
    - External Current Density 1
    - Electric Potential 1
    - Force Calculation 1
  - Mesh 1
  - Solid copper disk
    - Step 1: Stationary
    - Step 2: Time Dependent

# Settings

## Magnetic Flux Conservation

Label: Permanent magnet, formulation for nonconducting d

Domain Selection

Selection: Manual

	3
	8
	11

Override and Contribution

Equation

Material Type

Material type: Solid

Coordinate System Selection

Coordinate system: Cylindrical System 2 (sys2)

Constitutive Relation B-H

Magnetization model: Remanent flux density

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_{rec} \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad \mathbf{B}_r = \|\mathbf{B}_r\| \frac{\mathbf{e}}{\|\mathbf{e}\|}$$

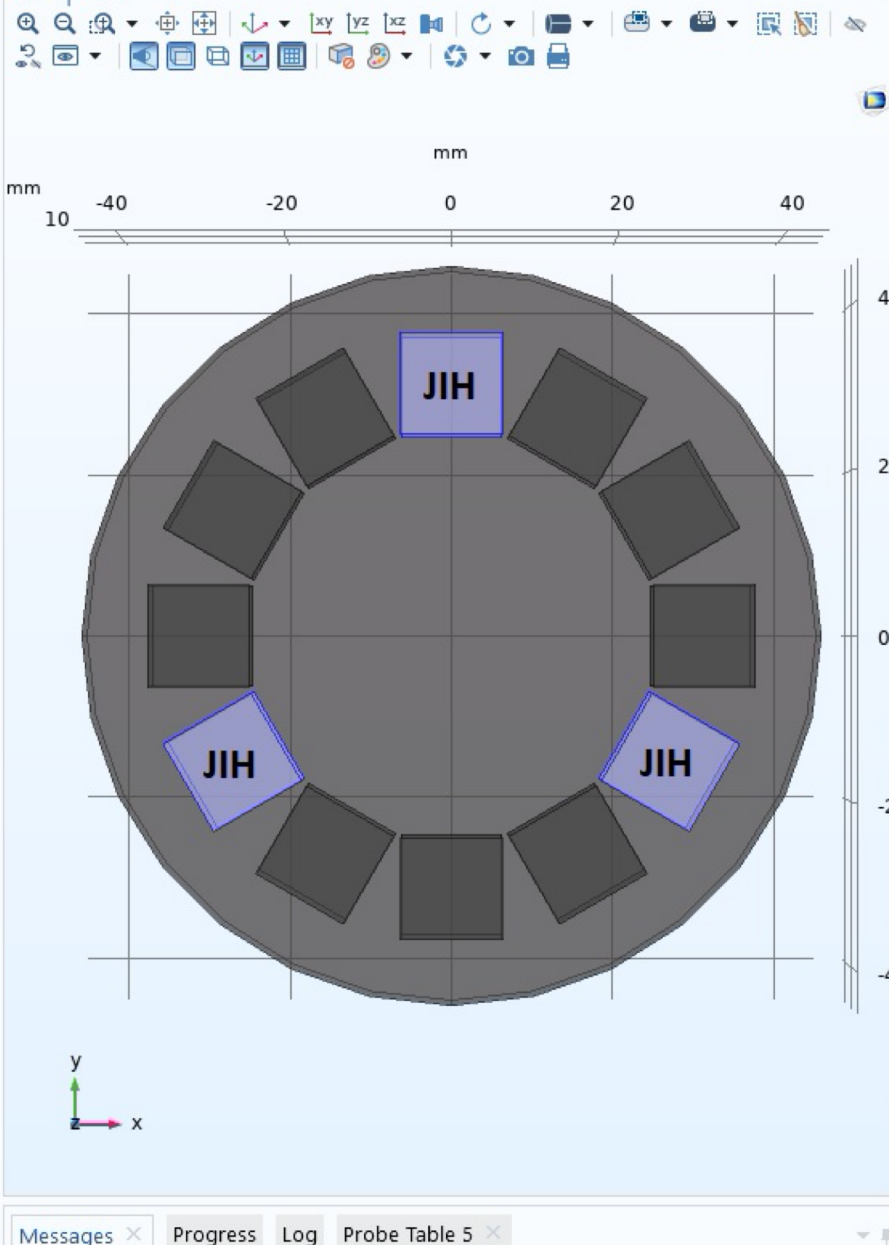
Recoil permeability:  $\mu_{rec}$  From material

Remanent flux density norm:  $\|\mathbf{B}_r\|$  From material

Remanent flux direction:

0	r
0	phi
-1.30	a

# Graphics





# Otázky oponenta

- Jakým způsobem by šlo zabránit vibracím, které podle Vás způsobují rozdíl mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami?