VÝZKUM A VÝVOJ HYDROSTATICKÉHO ULOŽENÍ NA BÁZI ADAPTIVNÍCH REGULAČNÍCH SMYČEK

Jan Foltýn, Ing.

Školitel: doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

Školitel specialista: Ing. Petr Šperka, Ph.D.

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

Brno, 31.01.2024

ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

OBSAH PREZENTACE

Motivace

Úvod

Současný stav poznání

Analýza a zhodnocení poznatků

Cíle disertační práce

Vědecké otázky a pracovní hypotézy

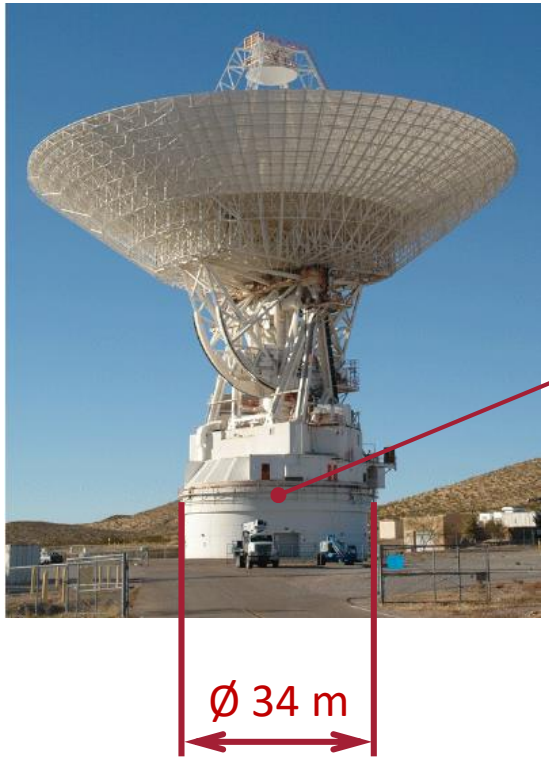
Materiál a metody

Současný stav řešení

Závěr

MOTIVACE

- Velkorozměrné aplikace
- Přesnost uložení
- Vysoké náklady na návrh a údržbu



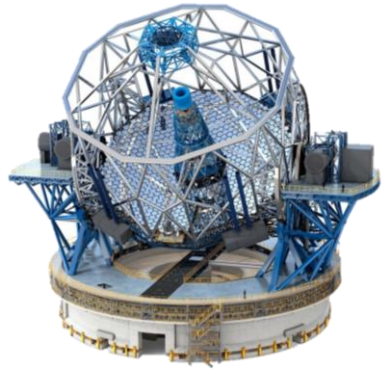
Antenna Goldstone, California
(www.researchgate.net)

1,5 roku příprav

7 měsíců realizace

10 tun jedna HS kapsa

1,25 mil USD



Ø D

50 m

20 m

8 m

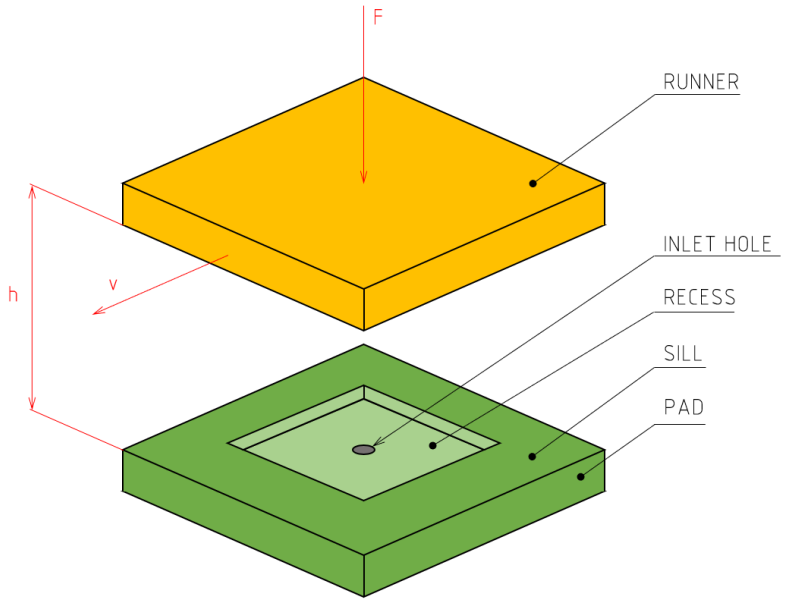
0,1 m

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

ÚVOD

HYDROSTATICKÁ LOŽISKA

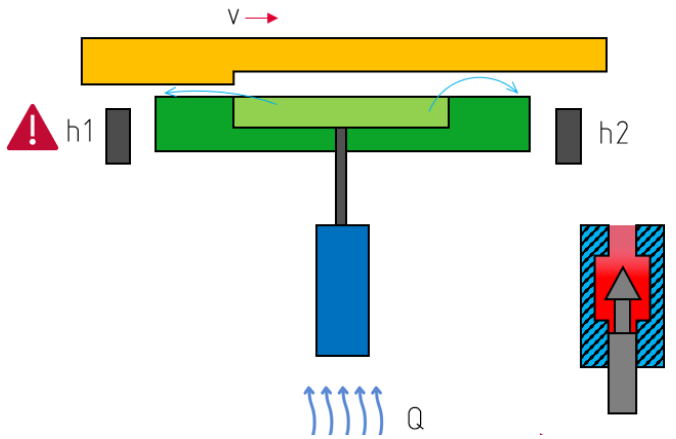
- Napájena mazivem z externího zdroje
- Kluzné povrchy odděleny i při nulové rychlosti
- Vysoké zatížení
- Nízké tření



ZPĚTNOVAZEBNÍ ŘÍZENÍ

- Schopnost pohltit montážní nepřesnosti na úrovni hydrauliky
- Reakce na asymetrické zatížení ložiska
- Akční člen = proporcionální ventil
- Řídící veličina = tloušťka mazacího filmu, tlak, průtok

$$h = \sqrt[3]{\frac{Q \cdot A \cdot \mu}{F \cdot q_f}}$$

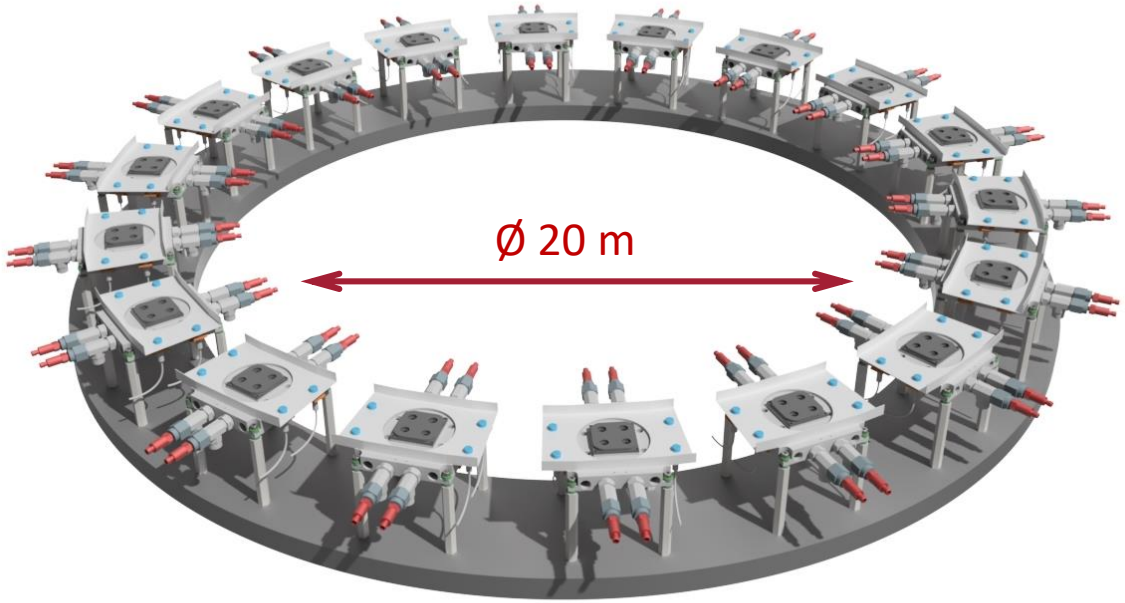


SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

VELKOROZMĚRNÁ HS LOŽISKA

NÁVRH

Pasivní pohlcování nepřesností



ŘÍZENÍ

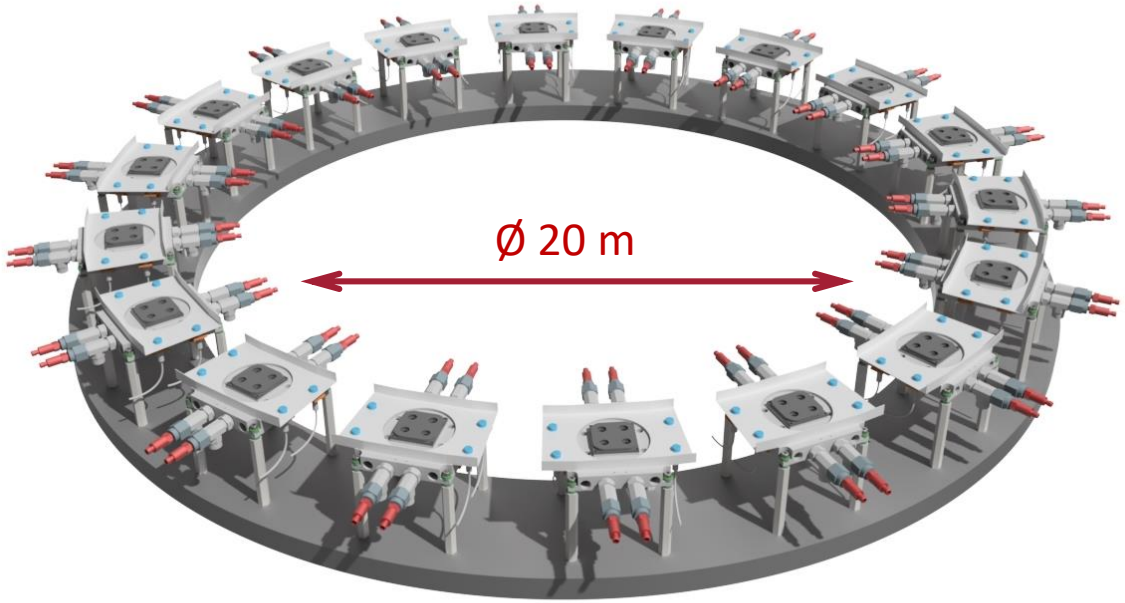
Aktivní pohlcování nepřesností

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

VELKOROZMĚRNÁ HS LOŽISKA

NÁVRH

Pasivní pohlcování nepřesností



ŘÍZENÍ

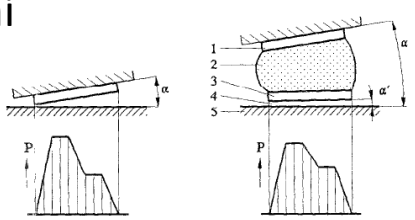
Aktivní pohlcování nepřesností

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

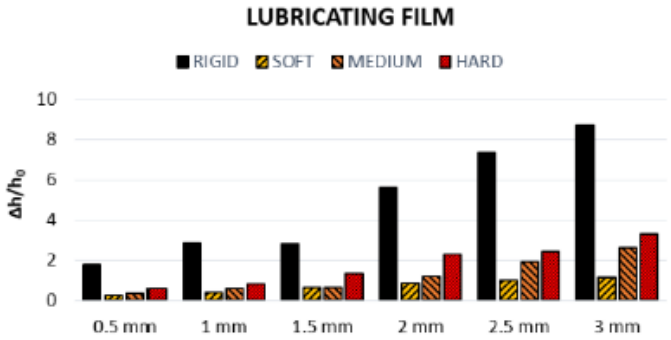
NÁVRH

PODDAJNÁ PODSTAVA

- Rovnoměrná tloušťka mazací vrstvy
- Nízká tuhost = nízká přesnost uložení



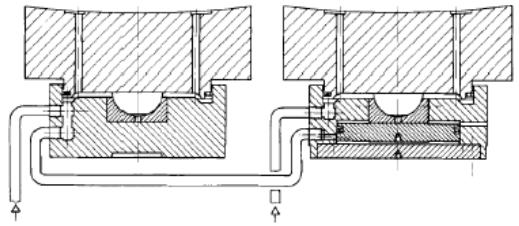
VAN BEEK, A. et. al. *Tribology International* (1997)



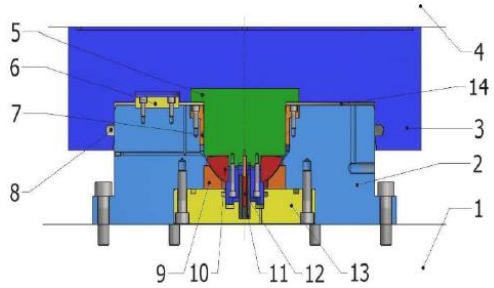
MICHALEC, M. et. al. *Precision Engineering* (2022)

NAKLOPITELNÁ PODSTAVA

- Konstrukční řešení výškového a úhlového přizpůsobení kapsy
- Složité na výrobu



BASSANI, R. et. al. Hydrostatic lubrication (1992)

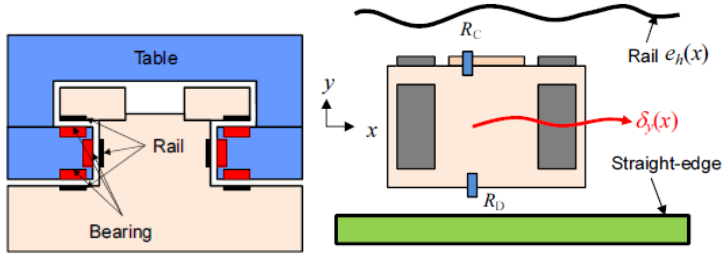


9-10 Spherical joint

MARCHIORI, G. et. al. *SPIE* (2018)

METODY PŘESNÉHO USTAVENÍ

- Metoda pro lineární HS vedení obráběcího stolu
- Sonda s negativním tvarem HS uložení opatřena snímači vzdálenosti
- Přesnost ± 0,001 mm



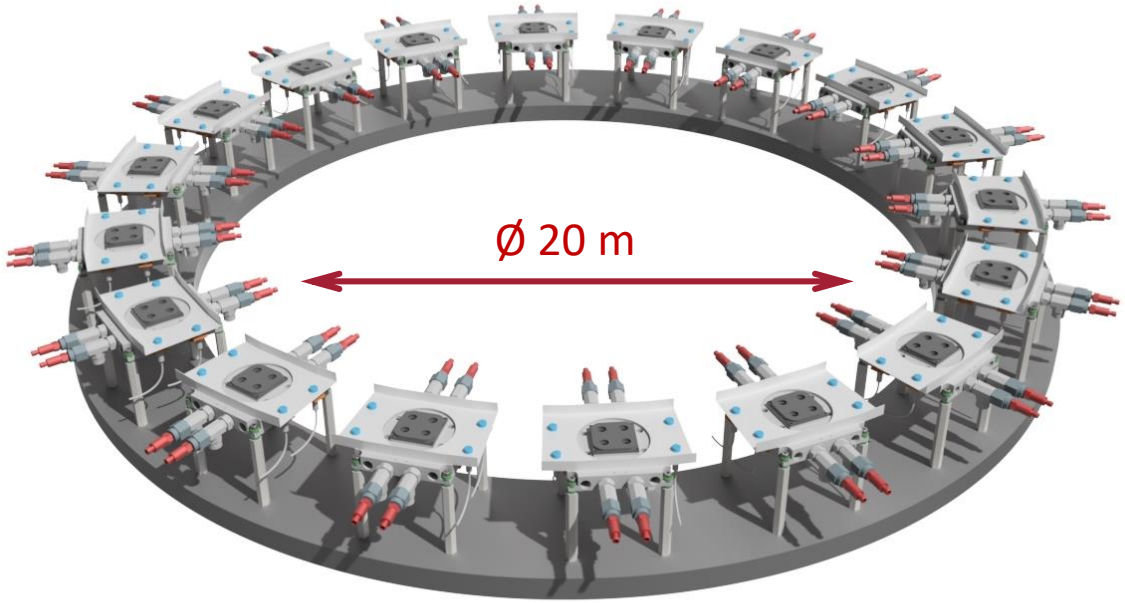
JEONG, S. et. al. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing* (2012)

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

VELKOROZMĚRNÁ HS LOŽISKA

NÁVRH

Pasivní pohlcování nepřesností



ŘÍZENÍ

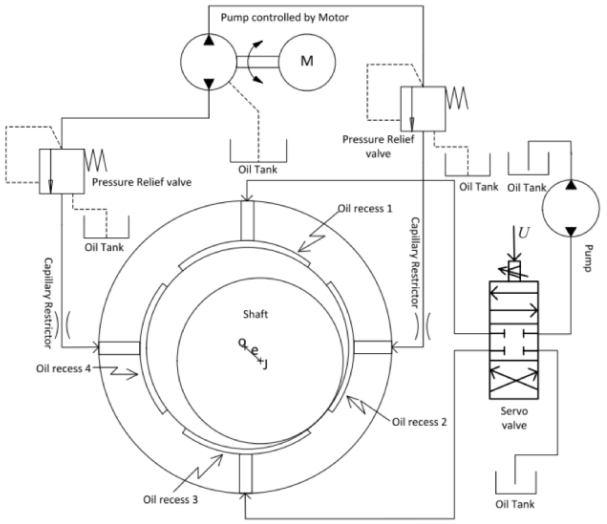
Aktivní pohlcování nepřesností

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

ŘÍZENÍ

ŘÍZENÍ PRŮTOKU

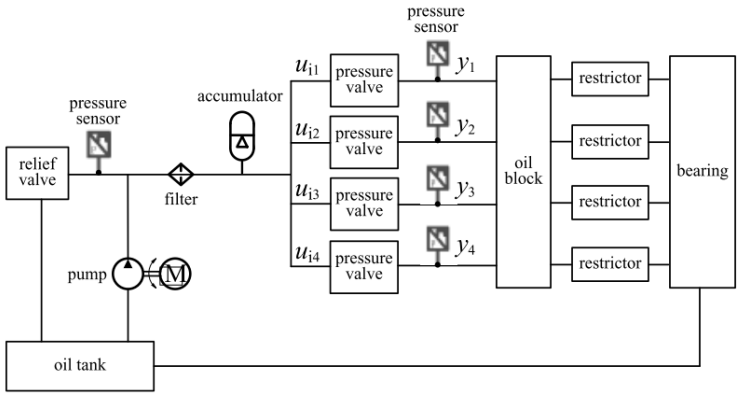
- Radiální HS ložisko
- Regulace průtoku servoventilem
- 1200 N max. zatížení



REHMAN, W. et. al. *Industrial Lubrication and Tribology* (2021)

ŘÍZENÍ TLAKU

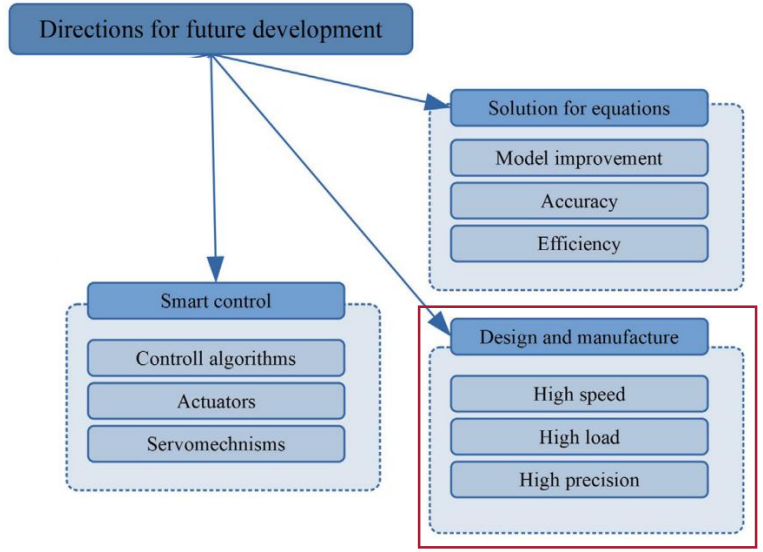
- Řízení více buněk radiálního ložiska nezávisle na sobě
- Proporcionální tlakový ventil
- 20 N max. zatížení



CHUANG, K. et. al. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers* (2021)

BUDOUCÍ SMĚŘOVÁNÍ

- Aktivní řízení HS ložiska při velkém zatížení a pro co největší přesnost uložení



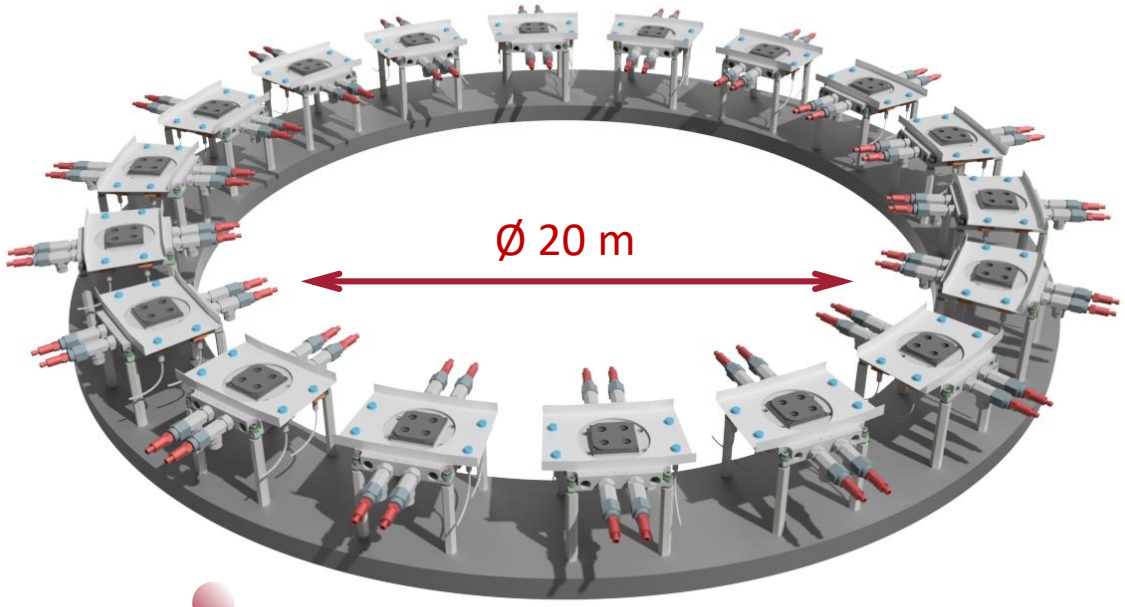
BREŃKACZ, L. et. al. *Mechanical Systems and Signal Processing* (2021)

ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

VELKOROZMĚRNÁ HS LOŽISKA

NÁVRH

- Poddajná podstava ✓
- Naklopitelná podstava ✓
- Zpětnovazební řízení ✗



ŘÍZENÍ

- Malá radiální HS ložiska ✓
- Strategie řízení HS ložiska ✗

PROVOZ

- Asymetrie zatěžování ✗
- Chod velkorozměrného HS ložiska ✗
- Vhodnost zpětnovazebního řízení ✗
- Metody ustavování HS ložisek ✗

CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

CÍL

- Hlavním cílem je rozšířit metodiku návrhu hydrostatických ložisek o možnosti řízení tloušťky mazacího filmu na úrovni hydraulického systému.

DÍLČÍ CÍLE

- Navrhnout experimentální zařízení
- Navrhnout možné přístupy řídících strategií

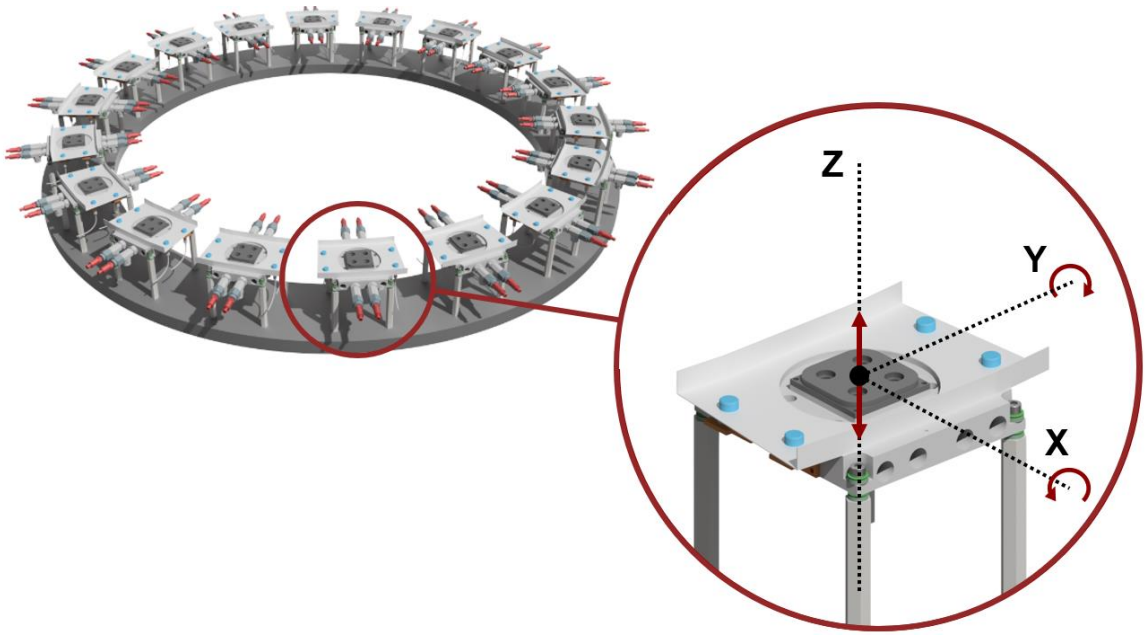
PŘÍNOS

- Díky získaným poznatkům budou rozšířeny možné přístupy k návrhu HS ložisek.
- Pokud bude možné pohlcovat montážní nepřesnosti na úrovni restriktoru, dojde k zjednodušení konstrukce ložiska a tím ke snížení nákladů na výrobu.

VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

O1: Jaká metoda ustavování nabízí nejvhodnější parametry s ohledem na velkorozměrná HS ložiska?

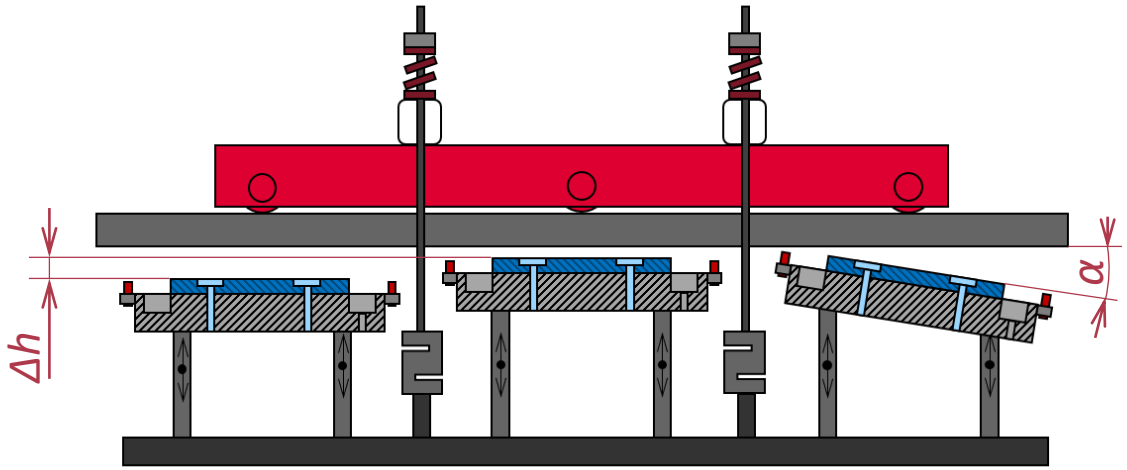
H1: Z pohledu hydrostatického ložiska je důležitá rovnoměrně rozložená tloušťka mazacího filmu po ploše kapsy. Pokud je toto rozložení stejné na všech kapsách, dá se usuzovat, že ložisko je vyrovnáno a je umožněno utvoření souvislého mazacího filmu.



VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

O2: Jak velké montážní nepřesnosti mohou být pohlceny zpětnovazebním řízením?

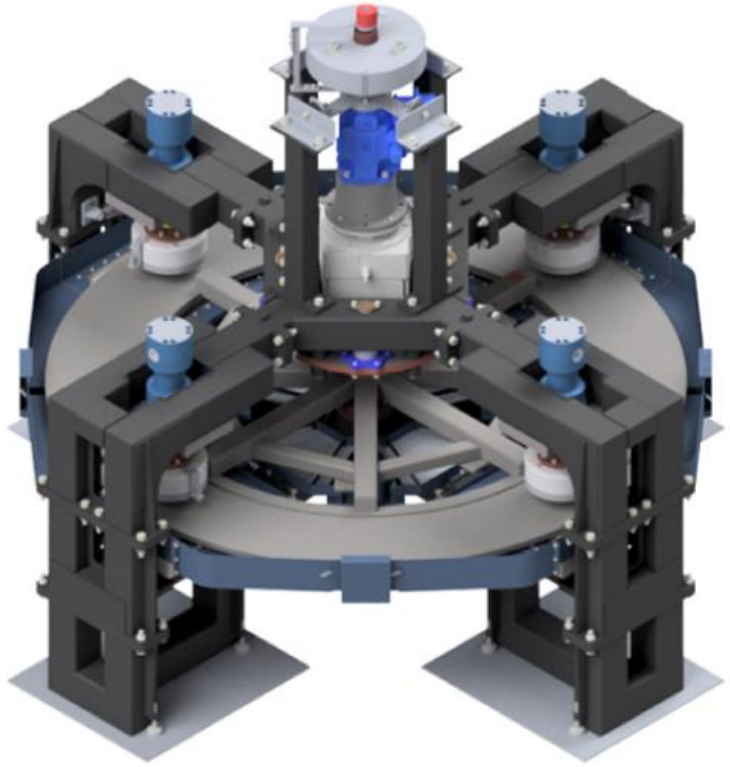
H2: Zpětnovazební řízení bude použito pro porovnání schopnosti ložiska pohlcovat nerovnosti. Předpoklad je, že řízení dokáže zajistit minimální tloušťku mazacího filmu pro bezpečný provoz ložiska.



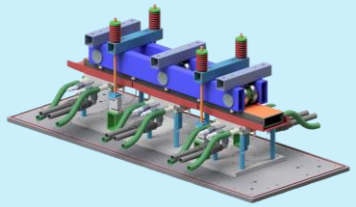
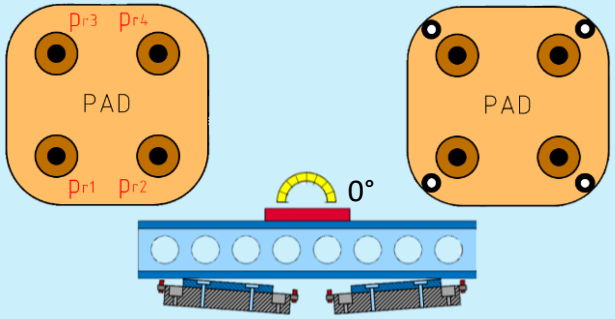
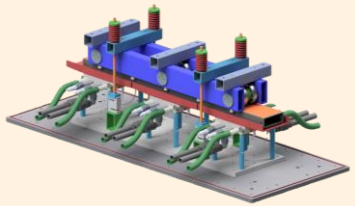
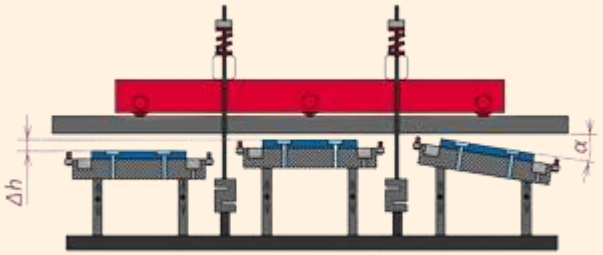
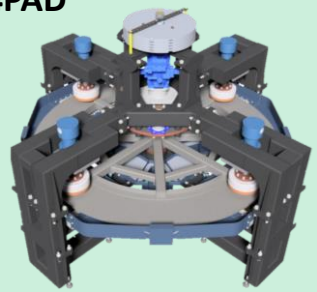
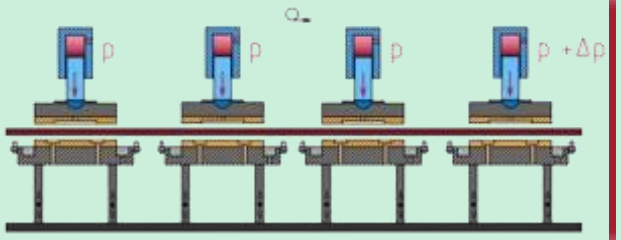
VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

VO3: Je zpětnovazební řízení vhodné pro dlouhodobý provoz ložiska?

H3: Při dlouhém chodu ložiska je očekáván nárůst teploty maziva a tím i pokles viskozity stejně jako nerovnoměrné zatížení kapes. Zpětnovazební řízení by mělo být schopné tyto rozdíly pohltit a zajistit bezpečnou tloušťku mazacího filmu.



MATERIÁL A METODY

NA ČEM	METODA		VSTUPY	CO ZÍSKÁM
3PAD 	**Metody ustavení** • Tlaková metoda • Optická metoda • Konvenční měřidla		**Experiment** • F = 30 kN • Q = 9 l/min **Predikce h** $h = \sqrt[3]{\frac{Q \cdot A \cdot \mu}{F \cdot q_f}}$	**Přesnost** • *h exp* vs. *h pred* • Rozložení h po kapse **O1**
3PAD 	**Návrh strategií řízení** • Strategie Q • Strategie Q-h • Strategie Q-F • Strategie Q-p		**Experiment** • F = 30 kN • Q = 9 l/min **Proměnné** • Δh = 0 … 0,5 … *max* Δh mm • α = 0 … 0,5 … *max* α °	**Bezpečnost** • Max. výškový rozdíl • Max. úhel **O2**
4PAD 	Asymetrické zatížení Vs. Strategie řízení		**Experiment** • h = 0,1 mm • Q = 8 l/min **Proměnné** • F = 120 … 10 … *max* F kN • t = 0,5 … 0,5 … 3 hod	**Ověření vhodnosti** • Rychlost odezvy • Kompenzace **O3**

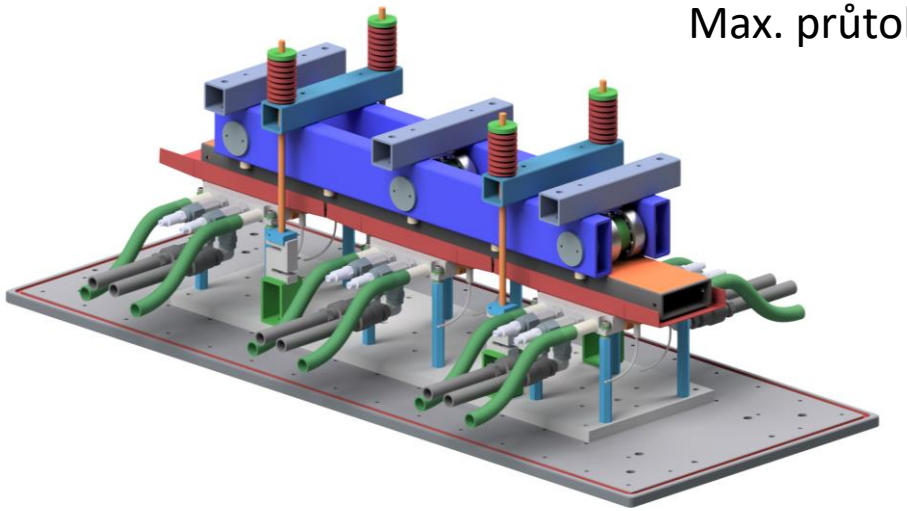
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

MATERIÁL A METODY

3PAD

- Lineární hydrostatické ložisko
- Testování montážních chyb na třech kapsách
- Hydraulický okruh s možností zpětnovazebního řízení

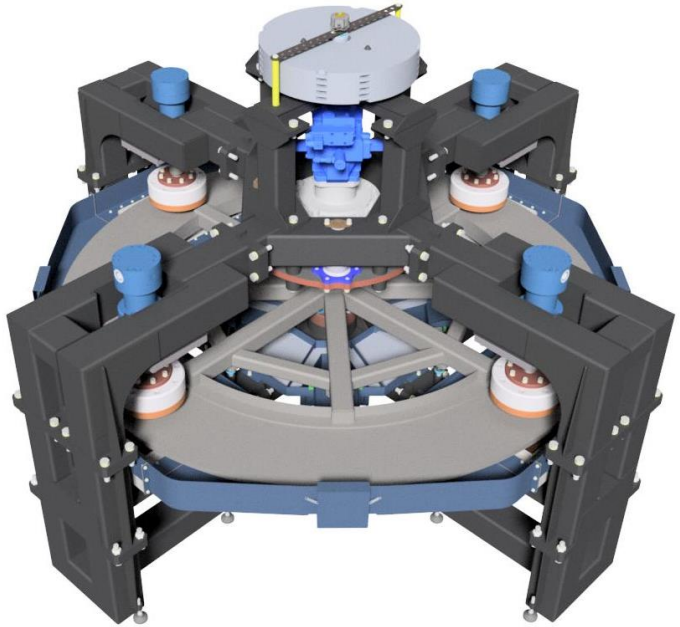
Max. zatížení: **9 t**
Max. tlak: **100 bar**
Max. průtok: **20 l/min**



4PAD

- Axiální hydrostatické ložisko o průměru 2 m
- Testování montážních chyb, asymetrie zatěžování
- Hydraulický okruh s možností zpětnovazebního řízení

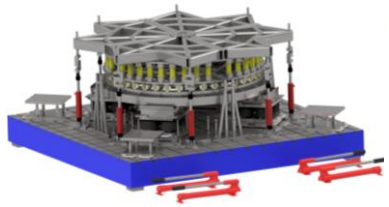
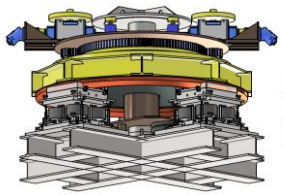
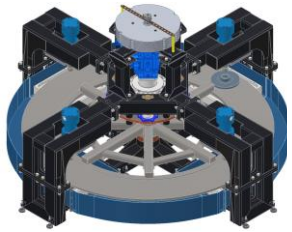
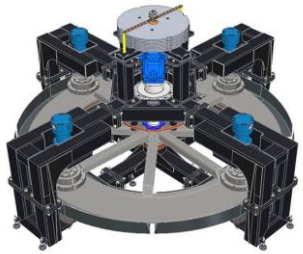
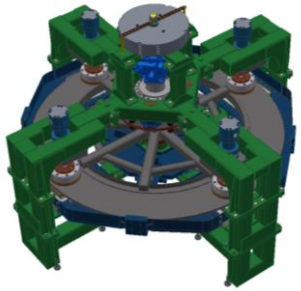
Max. zatížení: **24 t**
Max. tlak: **100 bar**
Max. průtok: **20 l/min**



SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

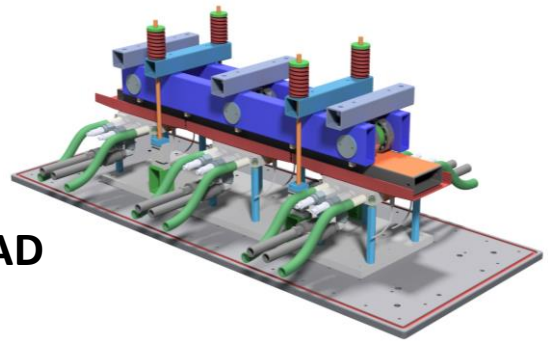
VÝVOJ

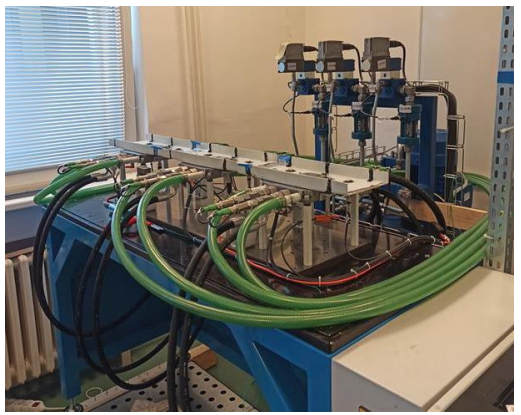
4PAD

2021 — 2022 — 2023 — 2024 — 31.1.2024

3PAD





SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

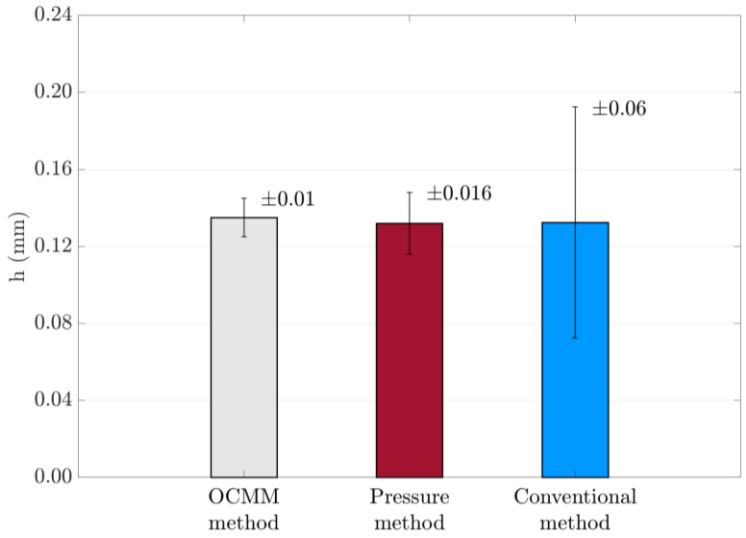
VÝZKUM

METODY USTAVOVÁNÍ HS LOŽISEK (VO1)

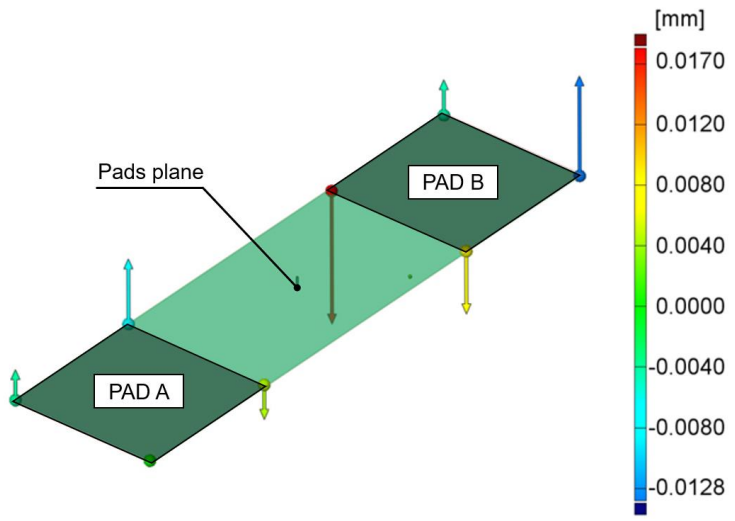
- Sledováno rozložení tloušťky mazacího filmu po ploše ložiska
- Optická metoda vs. tlaková metoda vs. konvenční měřidla

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN
ITC Fukuoka 2023
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Influence of Alignment Methods on Hydrostatic Bearing Performance



Rozložení tloušťky mazacího filmu po ploše HS kapsy



Vyhodnocení posunu krajních bodů kapsy

Přenositelnost na velká ložiska (4PAD)

FOLTÝN, J.; HURNÍK, J.; MICHALEC, M.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Pad alignment methods and their impact on large hydrostatic bearing precision. Measurement Science and Technology **(Under review)**

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

VÝZKUM

ZPĚTNOVAZEBNÍ ŘÍZENÍ (VO2)

Neveřejná data

SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ

APLIKOVANÉ VÝSTUPY A PUBLIKACE

APLIKOVANÉ VÝSTUPY

- **FOLTÝN, J.**; POLNICKÝ, V.; MICHALEC, M.; SVOBODA, P.; MARTINEK, J.; ROBENEK, V.: Experimentální zařízení 3PAD; Hydrostatické ložisko se zpětnovazebním řízením tloušťky mazacího filmu. **(Funkční vzorek)**
- **FOLTÝN, J.**; POLNICKÝ, V.; MICHALEC, M.; SVOBODA, P.; MARTINEK, J.; ROBENEK, V.: Experimentální zařízení 4PAD; Hydrostatická točna s mechatronickými systémy na bázi adaptivních regulačních smyček. **(Funkční vzorek)**
- **FOLTÝN, J.**; POLNICKÝ, V.; MICHALEC, M.; SVOBODA, P.; MARTINEK, J.; ROBENEK, V.: Zařízení k testování provozních stavů hydrostatického uložení. **(Užitný vzor)**

PUBLIKACE

- **FOLTÝN, J**.; HURNÍK, J.; MICHALEC, M.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Pad alignment methods and their impact on large hydrostatic bearing precision. Measurement Science and Technology **(Under review)**
- MICHALEC, M.; POLNICKÝ, V.; **FOLTÝN, J.**; SVOBODA, P.; ŠPERKA, P.; HURNÍK, J. The prediction of large-scale hydrostatic bearing pad misalignment error and its compensation using compliant support. PRECISION ENGINEERING-JOURNAL OF THE INTERNATIONAL SOCIETIES FOR PRECISION ENGINEERING AND NANOTECHNOLOGY, 2022, roč. 75, č. May 2022, s. 67-79. ISSN: 0141-6359.
- MICHALEC, M.; HURNÍK, J.; **FOLTÝN, J.**; SVOBODA, P. Contactless measurement of hydrostatic bearing lubricating film using optical point tracking method. PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART J-JOURNAL OF EN, 2023, roč. 237, č. 1, s. 76-84. ISSN: 2041-305X.
- MICHALEC, M.; **FOLTÝN, J.**; DRYML, T.; SNOPEK, L.; JAVORSKÝ, D.; ČUPR, M.; SVOBODA, P. Assembly Error Tolerance Estimation for Large-Scale Hydrostatic Bearing Segmented Sliders under Static and Low-Speed Conditions. Machines 2023, 11, 1025. https://doi.org/10.3390/machines11111025

ZÁVĚR

NÁVRH
- 3PAD ✓
- 4PAD ✓
- Ustavování HS ložisek ✓

TU Gdansk
- Prof. Wodtke

ŘÍZENÍ
- Příprava strategií řízení ✓
- Úvodní testy řízení ↻
- Pohlcování montážních chyb ↻

University of Bolzano
- Prof. Concli

PROVOZ
- Asymetrie zatěžování ↻
- Dlouhodobý provoz ↻

ESO Chile
- Prof. Mario Tapia

NÁVRH ZMĚNY NÁZVU

Řízení tloušťky mazacího filmu velkorozměrných hydrostatických ložisek

ZMĚNA ROZLOŽENÍ

70% vývoj

30% výzkum

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Jan Foltýn, Ing.

Jan.Foltyn@vut.cz

ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

www.ustavkonstruovani.cz