

OPTIMALIZACE LAMELOVÉHO EXPANDÉRU PRO TEPELNÉ OBĚHY NÍZKÝCH VÝKONŮ

Autor: Ing. Václav Vodička

Studijní obor: Energetické stroje a zařízení

Školitel: Prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.

Školitel specialista: Ing. Jakub Maščuch, Ph.D.

ÚVOD

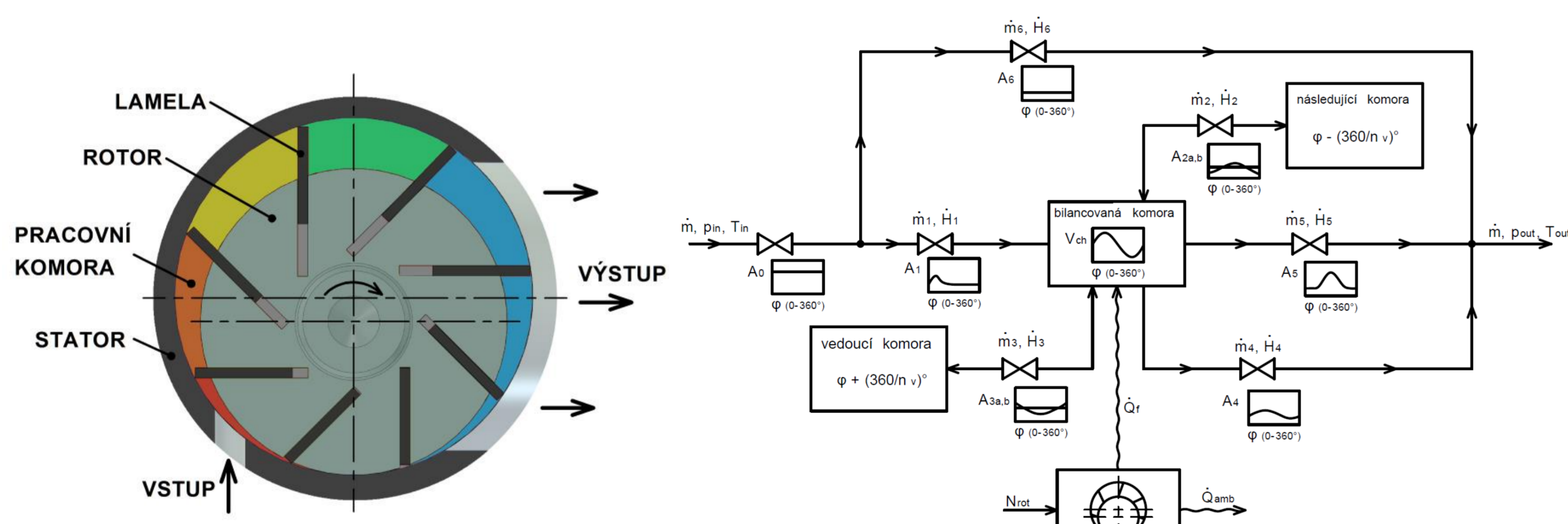
- Tepelné cykly s nízkým výkonem v řádu jednotek až desítek kW se jeví jako perspektivní v oblasti mikrokogenerace a využití odpadního tepla. V disertační práci je pozornost zaměřena na cykly s vnějším přívodem tepla, zejména ORC.
- Jedna z hlavních komponent – expandér – zásadně ovlivňuje účinnost celého cyklu, dosud však neexistuje komerčně dostupné řešení pro ORC s nízkým výkonem.
- Pro uvedené cykly jsou vhodné objemové expandéry, perspektivní je lamelový expandér (LE), který vyniká jednoduchou konstrukcí a nízkými výrobními náklady, jeho běžně uváděná isoentropická účinnost je však obecně nižší.
- Hlavní ztráty LE představují zejména vnitřní netěsnosti, v minulosti identifikován problém se ztrátou kontaktu lamel a statoru při nedostatečné odstředivé síle.
- Motivace práce: optimalizace a zvýšení účinnosti LE pro vyvíjené mikrokogenerační zařízení s ORC na UCEEB ČVUT v Praze s potenciálem komercializace.

CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- Sestavení matematického modelu lamelového expandéru vycházejícího z jeho geometrických charakteristik a založeného na popisu vnitřních termodynamických pochodů a ostatních fyzikálních dějů, který umožní predikci chování expandéru.
- Sestavení dynamického modelu lamel, který rozšíří prediktivní schopnosti termodynamického modelu lamelového expandéru.
- Návrh, konstrukce a realizace lamelového expandéru.
- Návrh a provedení experimentálních měření na autorem zkonstruovaném lamelovém expandéru, který je provozován v rámci experimentálního zařízení s ORC na UCEEB ČVUT v Praze, pro ověření sestavených matematických modelů a pro ověření problému ztráty kontaktu lamel a statoru.
- Analýza vlivu všech majoritních vnitřních netěsností včetně netěsnosti způsobené ztrátou kontaktu lamel a statoru na charakteristiky lamelového expandéru s využitím sestavených ověřených matematických modelů.
- Návrh obecné metodiky pro stanovení základních geometrických parametrů lamelového expandéru vycházející z obou zmíněných matematických modelů.

MATEMATICKÉ MODEL

- Termodynamický model LE (TMLE) bilancuje veškeré přítoky a odtoky pracovní látky z a do pracovní komory expandéru, včetně netěsností. Zahrnuje model tření. Opírá se o geometrické charakteristiky expandéru. Dokáže predikovat mj. hmotnostní průtok expandérem a jeho mechanický výkon.



Schematický řez LE

Konceptní schéma bilančního modelu prac. komory

- Bilance hmotových a entalpických toků pracovní látky:

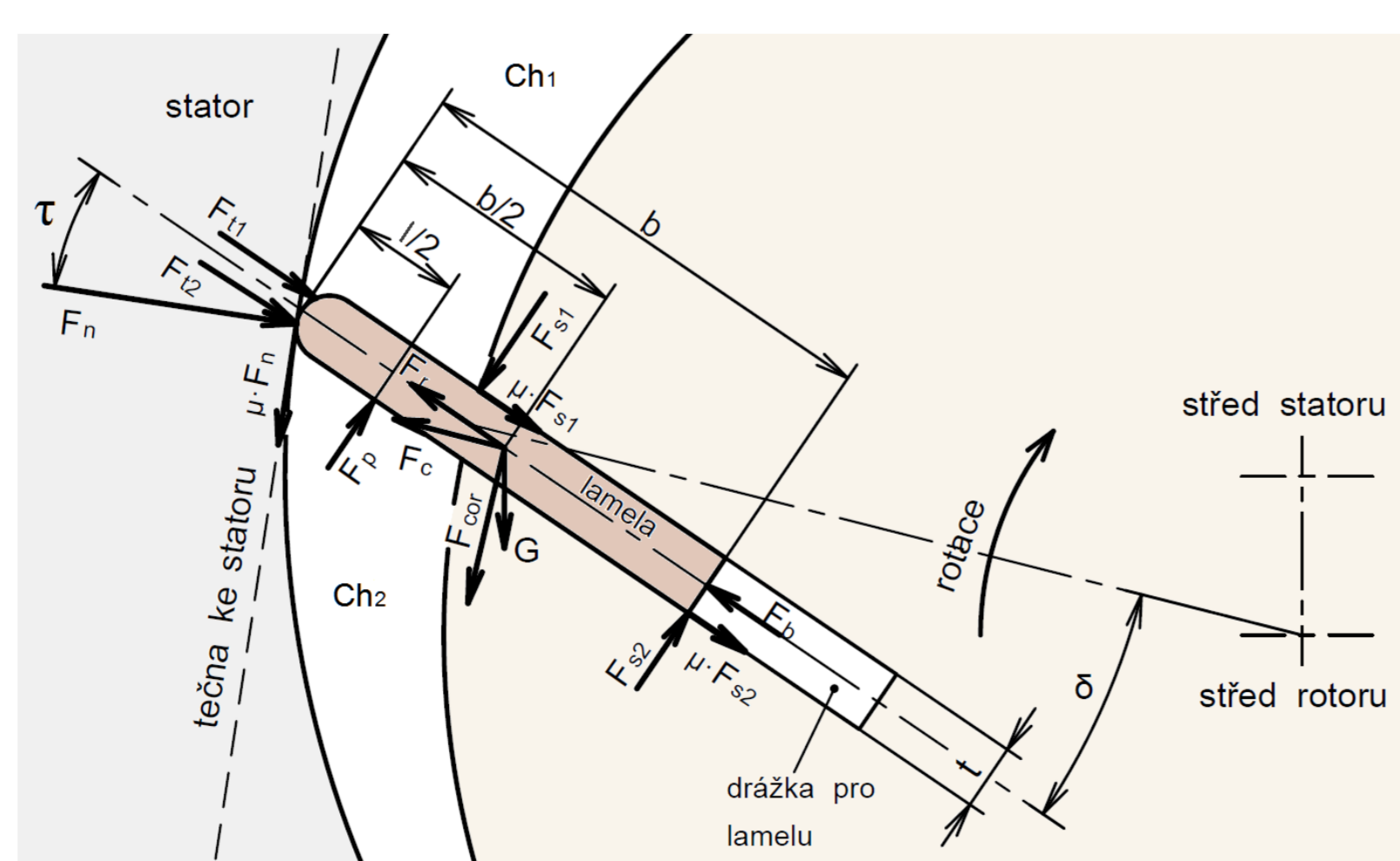
$$\frac{dm}{dt} = \frac{\sum dm_{in}}{dt} + \frac{\sum dm_{out}}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{\sum dH_{in}}{dt} + \frac{\sum dH_{out}}{dt} + \frac{dW_{ch}}{dt} + \frac{1}{n_v} \cdot \frac{d(Q_f - Q_{amb})}{dt} \quad (2)$$

- Vnitřní proudění modelováno jako isoentropické jednorozměrné; průtokové součinitele – kalibrační parametry modelu:

$$\frac{dm}{dt} = A(t) \cdot \rho_{thr}(t) \cdot \sqrt{2(h_{in}(t) - h_{thr}(t))} \cdot C_d \quad (3)$$

- Dynamický model lamel (DML) bilancuje veškeré síly působící na lamely, vypočítává tlak na dně drážky pod lamelou a dokáže predikovat ztrátu kontaktu lamely a statoru
- Výstupem dynamického modelu je průběh působících sil a polohy lamely



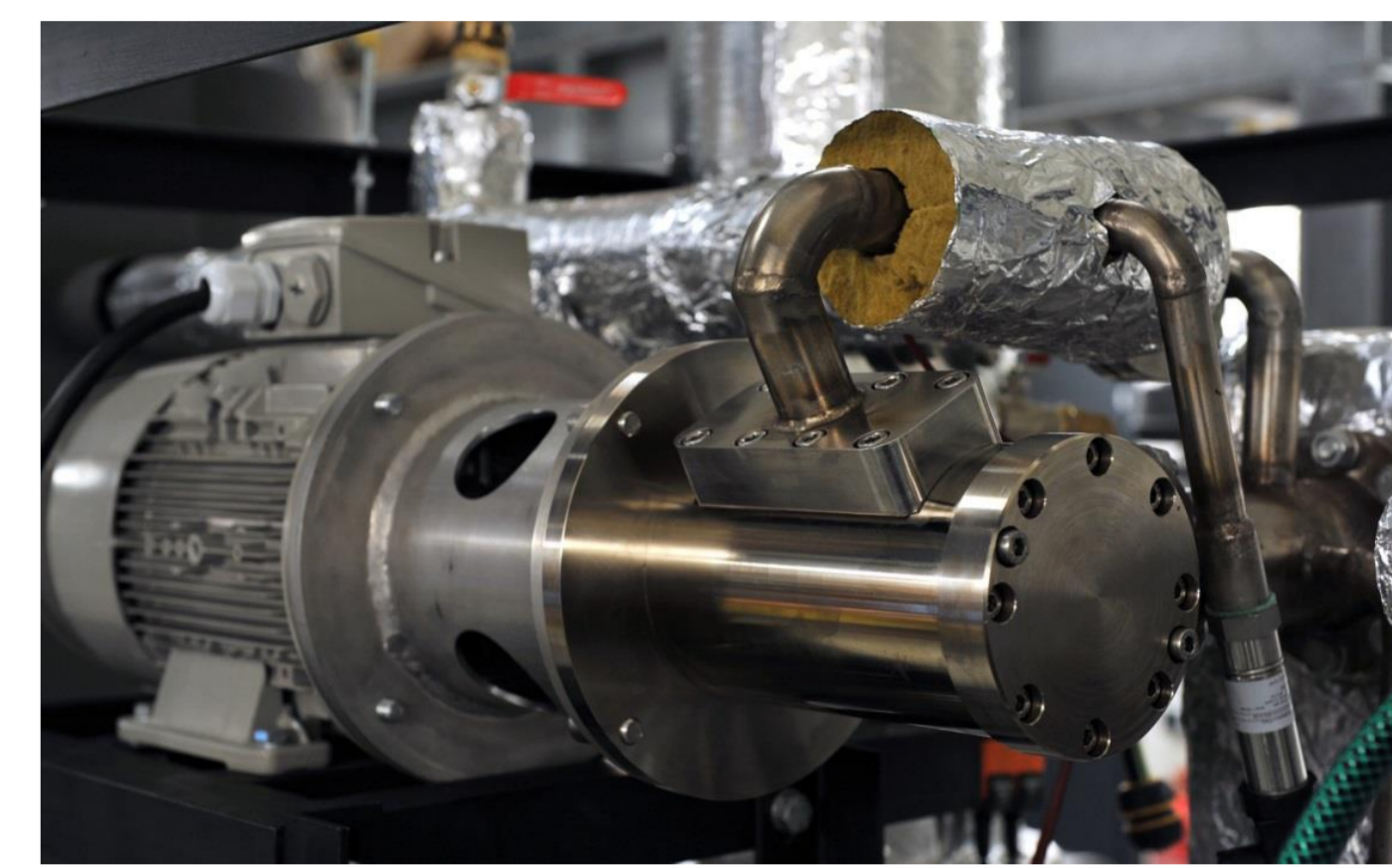
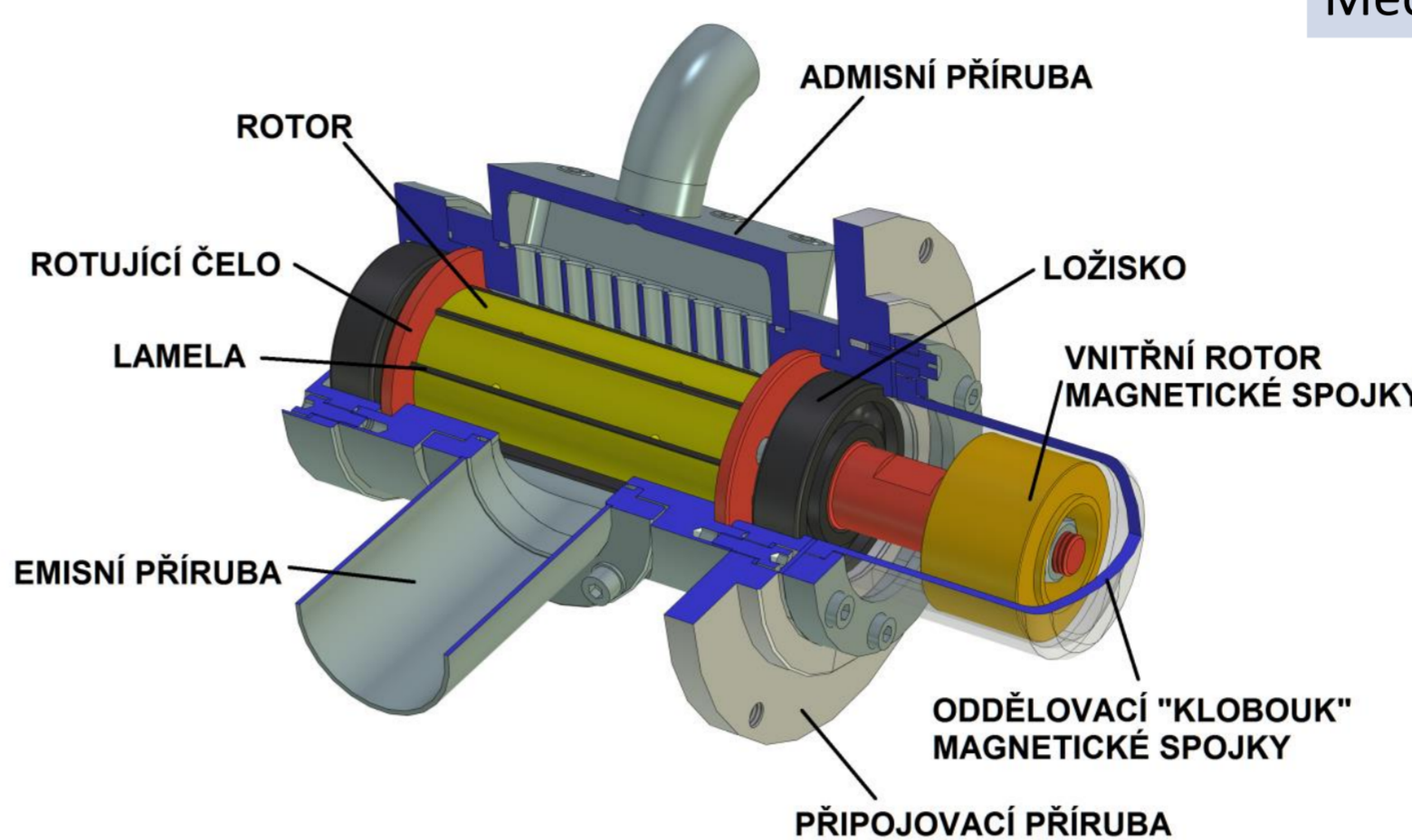
Rozbor sil působících na lamelu

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

- Experimentální měření na autorem navrženém a zkonstruovaném lamelovém expandéru pro ověření matematických modelů.

Základní parametry měřeného expandéru

Průměr statoru / délka pracovní části	[mm]	70 / 150
Objemový expanzní poměr	[1]	2,4
Počet lamel (resp. komor)	[1]	8
Nominální otáčky	[min ⁻¹]	3000
Mechanický výkon	[kW]	2,5



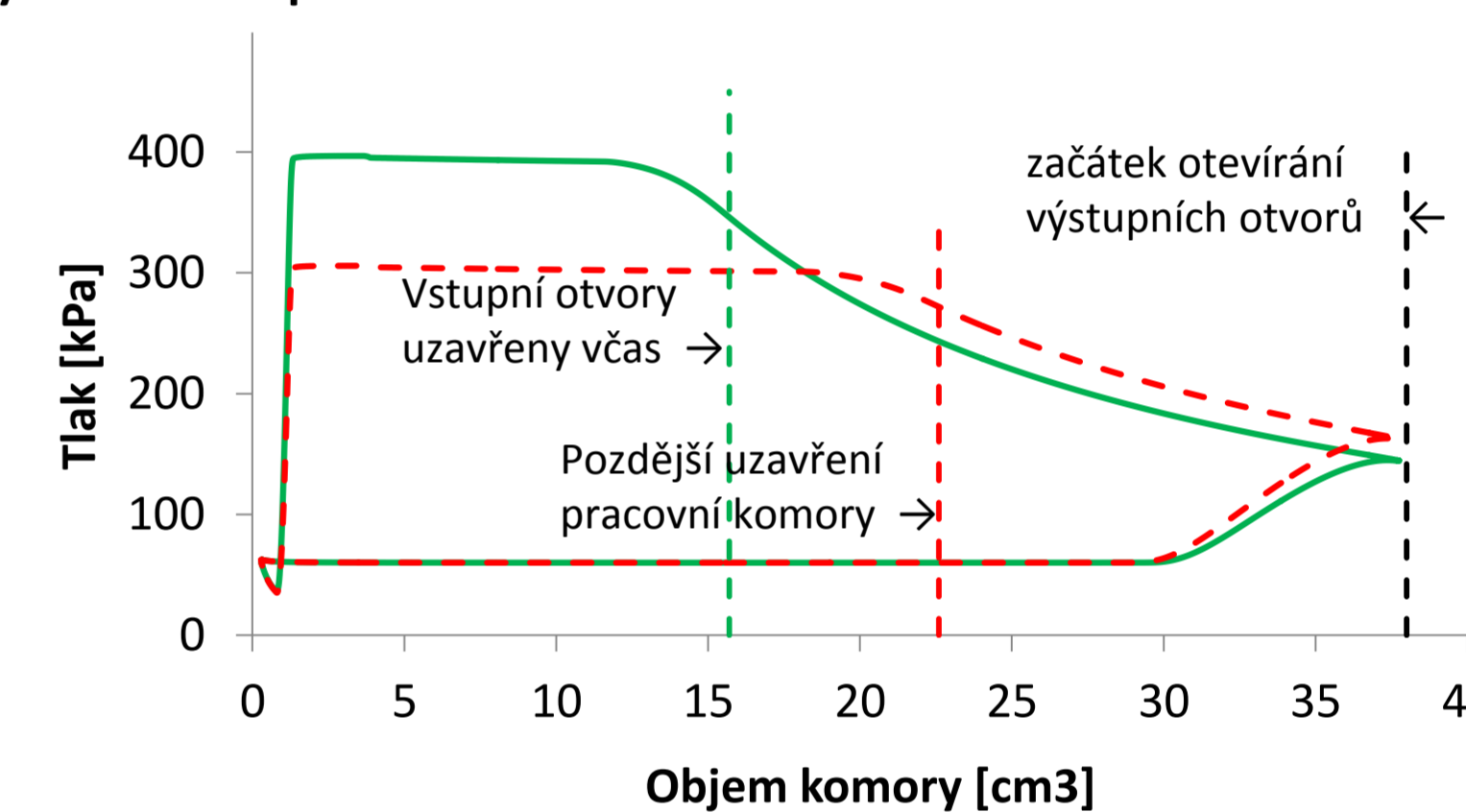
Konstrukce měřeného LE a fotografie LE připevněného k asynchronnímu generátoru

- Unikátní systém nastavení vnitřních vůlí – měření se zvýšenými axiálními a radiálními vůlemi v rozsahu +(0 ÷ 0,5) mm.
- Měření vlivu odstředivé síly působící na lamely (různé otáčky a hmotnost lamel)

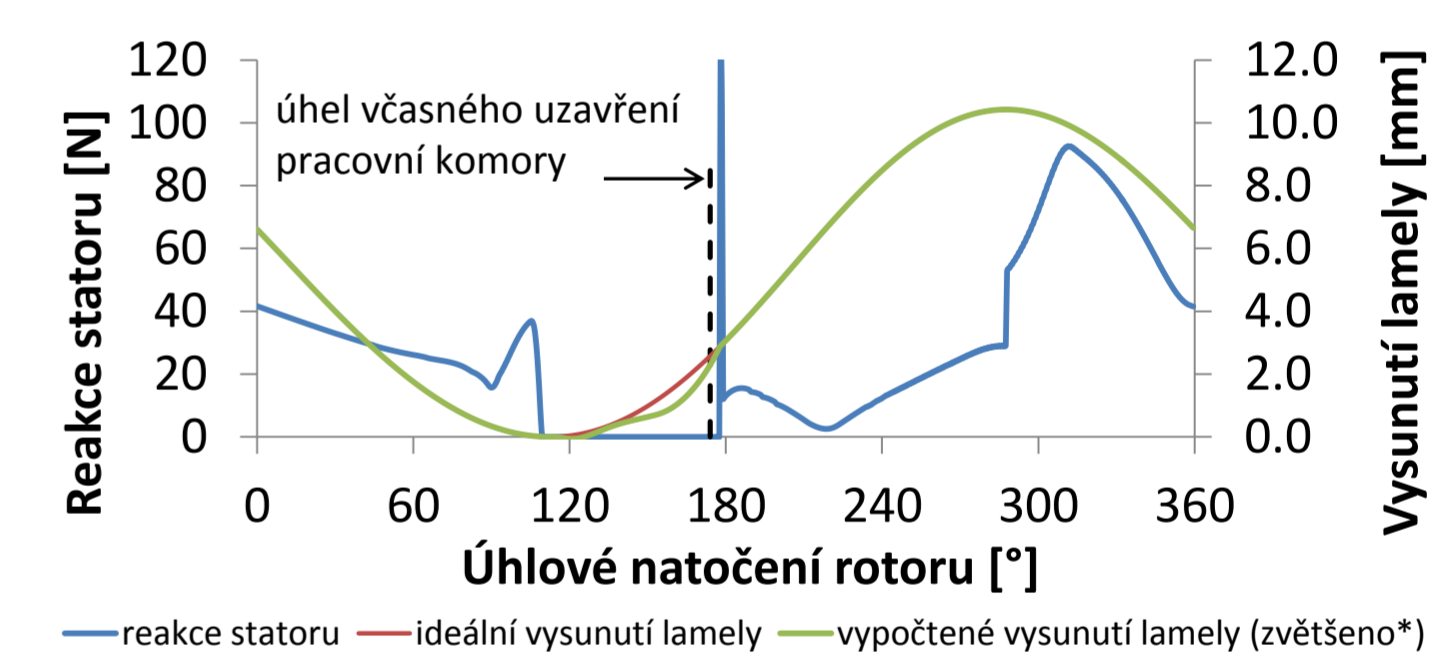
VÝSLEDKY

- Termodynamický model LE po kalibraci dosahuje přesnosti +- 5 % v predikci hmotnostního toku a mechanického výkonu expandéru.

- Na základě kalibrovaného modelu byl stanoven vliv axiální i radiální vůle a vliv pozdějšího uzavření pracovní komory vinou ztráty kontaktu lamel se statorem – hlavní projev zejména pokles admisního tlaku a snížení isoentropické účinnosti.

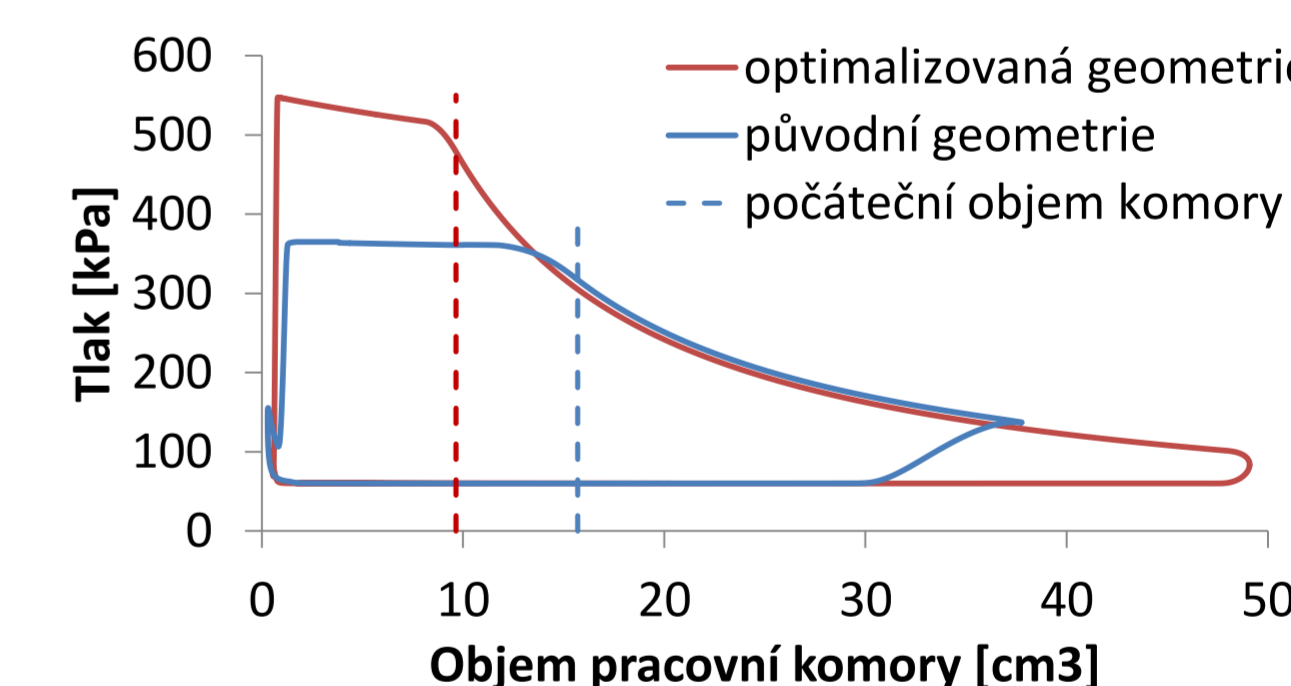


- DML použit k výpočtu průběhu polohy lamely. Predikce ověřeny měřeními s dobrou shodou.



- Z analýz pomocí DML vyplynulo zjištění, že ke ztrátě kontaktu lamely a statoru dochází ve všech měřených režimech před dosažením úvrati. Obnovení kontaktu je závislé na odstředivé síle.

- Sestavena metodika návrhu s využitím publikovaných modelů. Navržena optimalizovaná geometrie LE s vyšším mechanickým výkonem (+40 %) a isoentropickou účinností (+15 %b.).



ZÁVĚR

V práci byl předložen komplexní termodynamický model lamelového expandéru, který v kombinaci s dynamickým modelem lamel dokáže predikovat chování LE i za situací, kdy dochází ke ztrátě kontaktu lamel s povrchem statoru, což je významný negativní jev. Dále byl autorem navržen, zkonstruován a experimentálně měřen LE v rámci experimentálního ORC na UCEEB ČVUT v Praze. Měření sloužila ke kalibraci a ověření matematických modelů, které byly následně použity k analýzám vlivu netěsností. Dynamický model lamel potvrdil ztrátu kontaktu lamel se statorem ve všech měřených stavech. V závěru byla sestavena metodika návrhu LE s využitím publikovaných modelů a navržena optimalizovaná geometrie LE s vyšším výkonem i účinností.

VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

- I. VODICKA, Vaclav, et al. Theoretical and experimental investigations on the radial and axial leakages within a rotary vane expander. *Energy*, 2019, 189: 116097, pp. 1-12. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116097.
- II. VODICKA, Vaclav, et al. Rotary Vane Expander – Analyses and Prediction of Delayed Chamber Closure. In: *Proceedings of ORC2019*. Paper ID: 32, pp.1-10. ISBN: 978-90-9032038-0.
- III. MASUCH, Jakub et al. Experimental development of a kilowatt-scale biomass fired micro-CHP unit based on ORC with rotary vane expander. *Renewable Energy*, 2018. ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.113.
- IV. VODICKA, Vaclav, et al. Impact of major leakages on characteristics of a rotary vane expander for ORC. *Energy Procedia*, 2017, 129: pp. 387-394. ISSN: 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.249.