



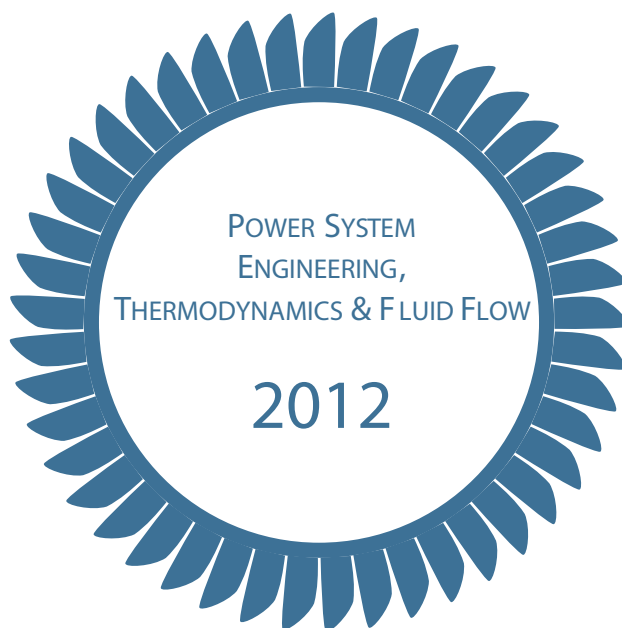
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ



KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI



JEDNOTLIVÝ PŘÍSPĚVEK ZE SBORNÍKU



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

ZAŘÍZENÍ MAGNETICKÉHO CHLAZENÍ NA ČVUT FAKULTĚ STROJNÍ

TĚTEK Jan (TechSoft Engineering), TUČEK Antonín (TechSoft Engineering),

In this paper we present actual results of designing, measurement and calculation for magnetocaloric cooling device at CTU in Prague. The magnetocaloric cooling system was designed as reciprocating system using two permanent magnets (up to 1 T), Gadolinium as content of active magnetic regenerators and ethanol as heat transfer substance. Device is successfully operating in the vicinity of room temperatures.

Klíčová slova: magnetické chlazení, Gadolinium, permanentní magnety

Úvod

V roce 2008 byl zahájen na ČVUT Fakultě strojní výzkum magnetokalorického jevu a to řešením grantu GA 101/07/1173 na téma „Výzkum vnitřních dějů ve výměnících pro magnetické chlazení při působení magnetokalorického jevu“. Tento grant byl řešen Doc. Otou (ČVUT FS) ve spolupráci s Prof. Sechovským (MFF UK). Výsledkem tohoto grantu je zařízení postavené v dílnách ČVUT FS (dále jen „zařízení“). Jedná se o zařízení pro ověření základních principů magnetokalorického jevu. Zařízení bylo navrženo na přelomu let 2008 a 2009 v několika variantách. Původně se počítalo s rotační variantou, později s posuvnou variantou (vzhledem k pohybu pístů). Finální varianta s klikovým mechanismem pístu a dvou magnetů byla dále propracována a realizována v roce 2010.

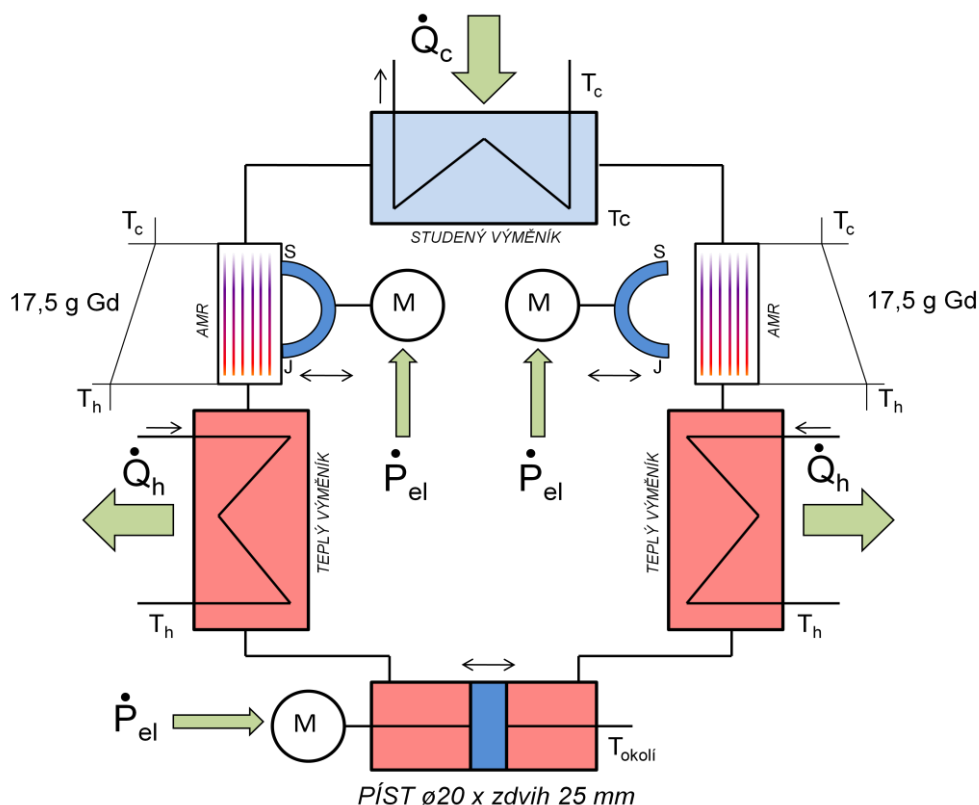
V roce 2011 došlo k obnovení výzkumu na zařízení a k osazení měřících zařízení. Výsledkem činnosti společnosti TechSoft je funkční zkušební zařízení, které má měřitelný chladicí výkon a které je v současné době plně připraveno na další výzkumné úkoly v oblasti magnetokalorického jevu. V této práci je představena konstrukce zařízení a hlavní výsledky činnosti za uplynulých 12 měsíců.

2. Zařízení ČVUT Fakulty strojní

Zařízení je orientováno na výzkum výměny tepla v aktivních magnetických regenerátorech za existence magnetokalorického jevu a není proto uzpůsobeno pro dosahování vysokých výkonů a účinností. Naopak svojí konstrukcí je celková účinnost velmi malá (při porovnání získaného chladicího výkonu a vynaložené elektrické energie). Zařízení se skládá z následujících částí:

a) Výměňiková část

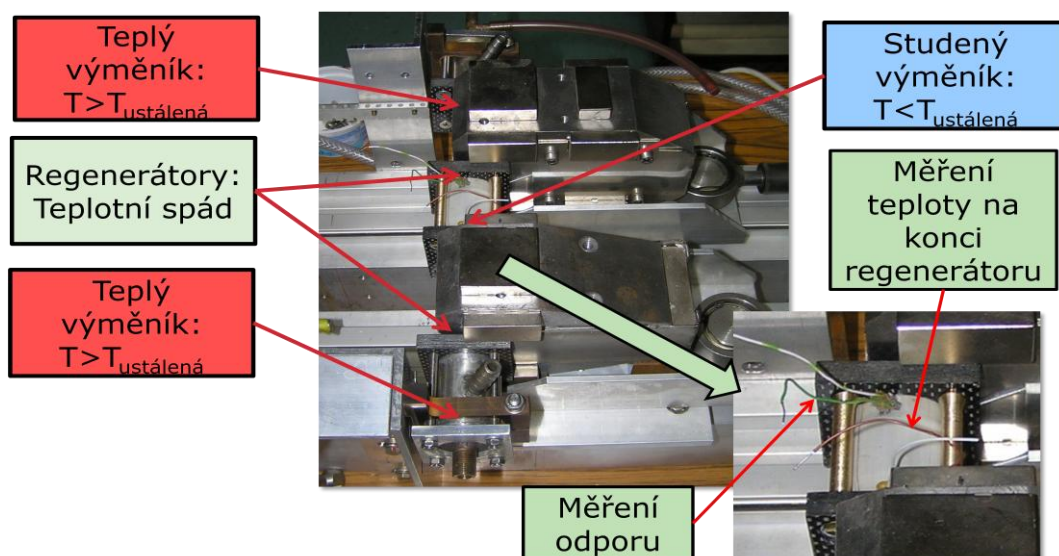
Hlavní část zařízení je realizována sestavou tří výměníků (2x „teplý“ výměníky a 1x „studený“ výměník) a z dvou aktivních magnetických regenerátorů (AMR) ve kterých jsou umístěny magnetokalorické destičky z Gadolinia. Označení „teplý“ výměník a „studený“ výměník je dáno smyslem chodu zařízení. Načasováním pohybu elektromotorů magnetů a elektromotoru pístu dochází k přenosu média o vyšší teplotě než je ustálená teplota teplotonosné látky do teplých výměníků a logicky obráceně k přenosu média o nižší teplotě do studeného výměníku. Schéma zapojení výměníků a regenerátorů je zobrazeno na Obr. 1.



Obr. 1: Schéma zapojení zařízení ČVUT FS

b) Aktivní magnetické regenerátory (AMR)

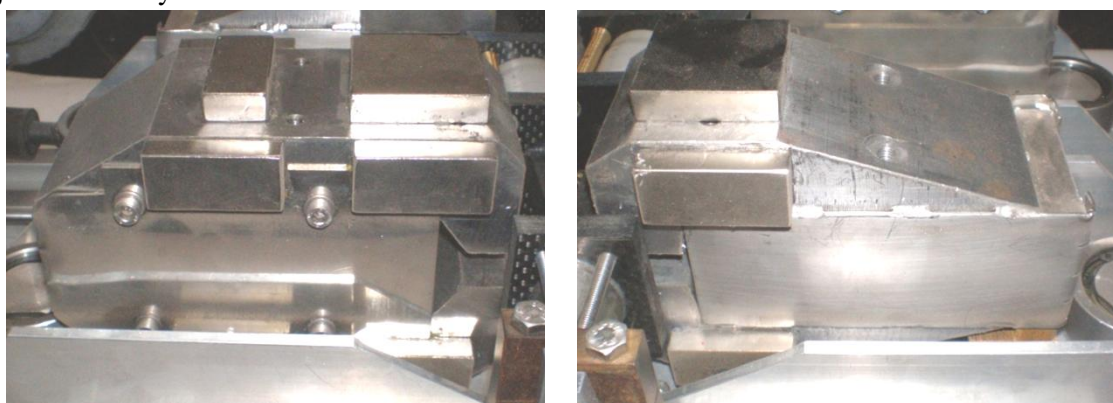
Aktivní magnetické regenerátory jsou tvořeny dutinou, ve které je umístěna série profilovaných destiček zajištěných proti pohybu a umístěných kolmo na směr siločar magnetického pole. V každém regenerátoru se nachází 25 destiček z Gadoliniového plechu o rozměru 0,15x10x20 a 0,15x10x40 mm. Celkem je v zařízení umístěno 35 g (2x 17,5 g) magnetokalorického materiálu Gadolinia s čistotou 99,99% (Gd/TREM). Materiál byl dodán společností Metall Rare Earth Limited z Číny. Sestava výměníků je zobrazena na Obr. 2.



Obr. 2: Výměníky a aktivní magnetické regenerátory

c) Magnety

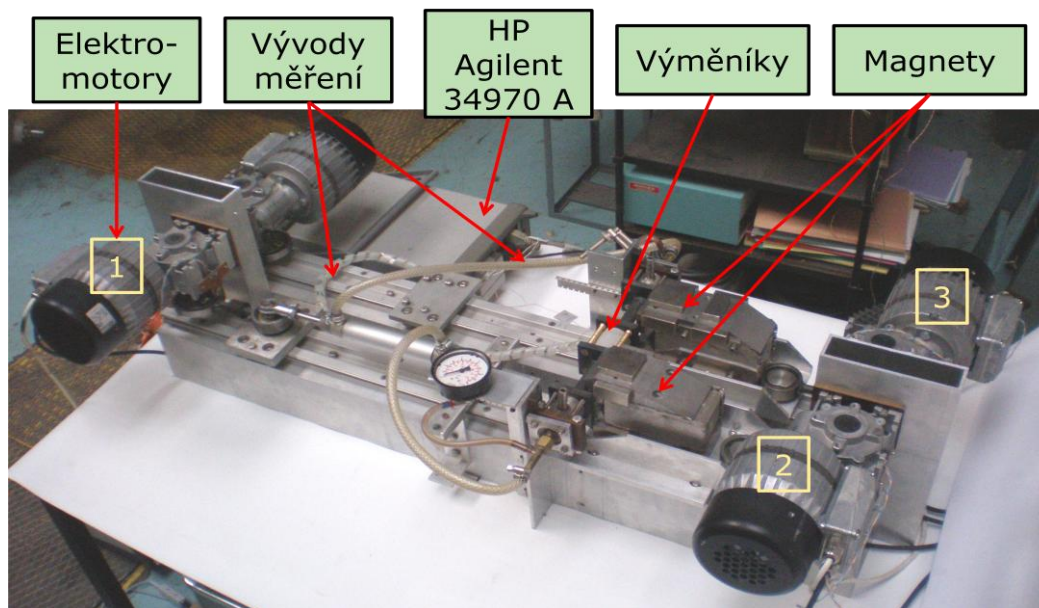
Magnety jsou provedeny ve dvou modifikacích. Jedná se o kopie konstrukce podle Zhenga (rok 2009). Výhodou těchto magnetů je soustředění relativně silného magnetického pole v mezeře. Nevýhodou je rušivé magnetické pole v přední části magnetu. Tento fakt negativně ovlivňuje magnetokalorický jev v Gadoliniových destičkách a způsobuje v našem případě ztrátu okolo 20%. Magnety ČVUT dosahují indukce magnetického pole: 0,95 T pro magnet č. 1 a 1,05 T pro magnet č. 2, přičemž využitelná změna indukce magnetického pole pro magnetokalorický jev je 0,85 T pro magnet č. 1 a 0,86 T pro magnet č. 2. Magnet konstrukce č. 2 má větší rušivé pole do přední části o asi 60%, ale dosahuje větší indukce magnetického pole v mezeře o 10%. Magnety jsou zobrazeny na Obr. 3.



Obr. 3: Magnety: č. 1 na levém obrázku a č. 2 na pravém obrázku

d) Pohony a sestava zařízení

Pohon zařízení je realizován třemi elektromotory ATAS G66UF308. Tyto elektromotory mají v sobě integrovanou elektroniku a umožňují nastavit parametry chodu zařízení. Nastavitelné parametry jsou: zrychlení a zpomalení, otáčky, úhel otočení při pohybu, doba čekání motoru a moment motoru. Součástí elektromotorů je šneková převodovka s převodem 1:30. Náhled na celé zařízení je na Obr. 4.



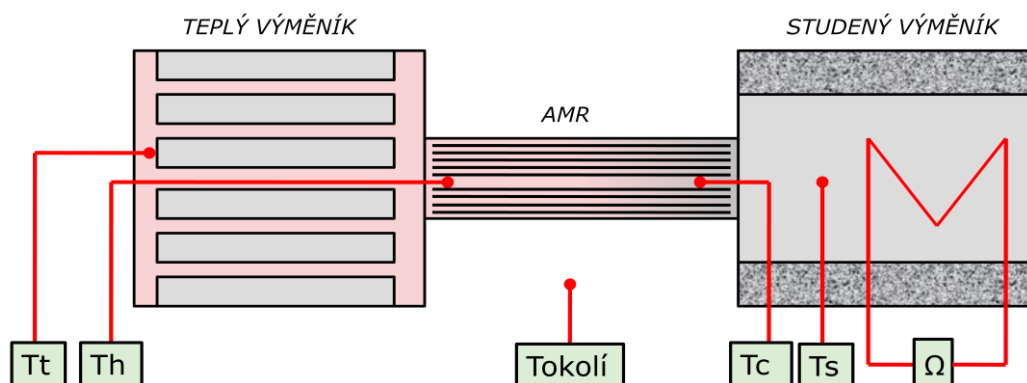
Obr. 4: Pohled na zařízení

3. Příprava měření

Cílem měření bylo získání základní představy o chování navrženého zařízení za různých provozních podmínek. Provozní podmínky byly zvoleny tyto:

- Pracovní médium líh 96%,
- Měření v laboratoři s okolní teplotou 15 až 19 °C, tedy v oblasti maxima magnetokalorického jevu pro materiál Gd,
- Rychlosti proudění teplotnosného média v závislosti na otáčkách elektromotoru zvoleny na 3,6,9,12 a 20 ot.min⁻¹,
- Zdvih pístu pro teplotnosnou látku byl zvolen na 100% a 10%. Tento velký rozdíl zdvihu byl zvolen za účelem vyvolání silně rozdílných provozních podmínek a pro ověření možnosti vyvolání velkého teplotního spádu na Gadoliniových destičkách i za malých zdvihů pístu.

Měření bylo provedeno záznamem dat z termočlánků typu J (FeKo) a T (CuKo) a dále záznamem odporu měděného drátku. Data z měřicích míst byla snímána měřicí ústřednou HP Agilent 34970A a zaznamenána programem v PC Agilent BenchLink Data Logger. Byly měřeny tyto veličiny: teplota na teplém konci regenerátoru (T_h – termočlánek J), teplota na studeném konci regenerátoru (T_c – termočlánek J), teplota ve studeném výměníku (T_c – termočlánek J), teplota za teplým výměníkem (T_t – termočlánek J), odpor měděného drátku svinutého ve studeném výměníku (Ω) a teplota okolí ($T_{okolí}$ – termočlánek T). Schéma zapojení měření je na Obr. 5.

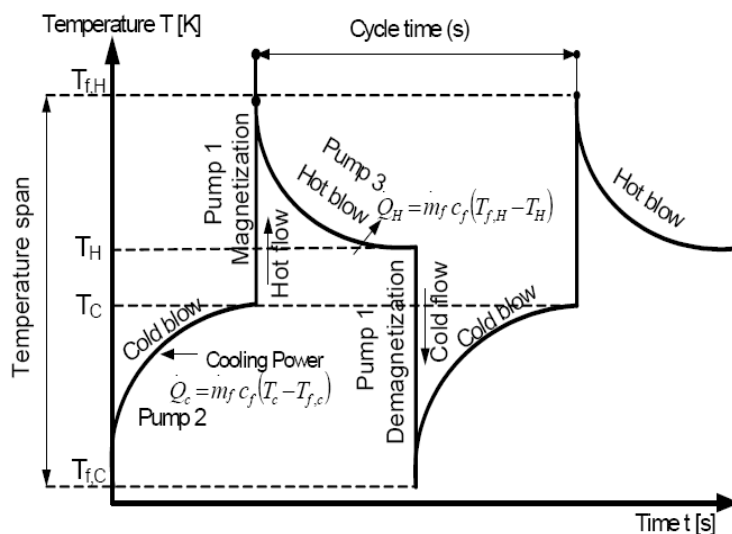


Obr. 5: Schéma zapojení měření

Pomocí programu v PC byly postupně navoleny konstanty pohybu pro elektromotory.

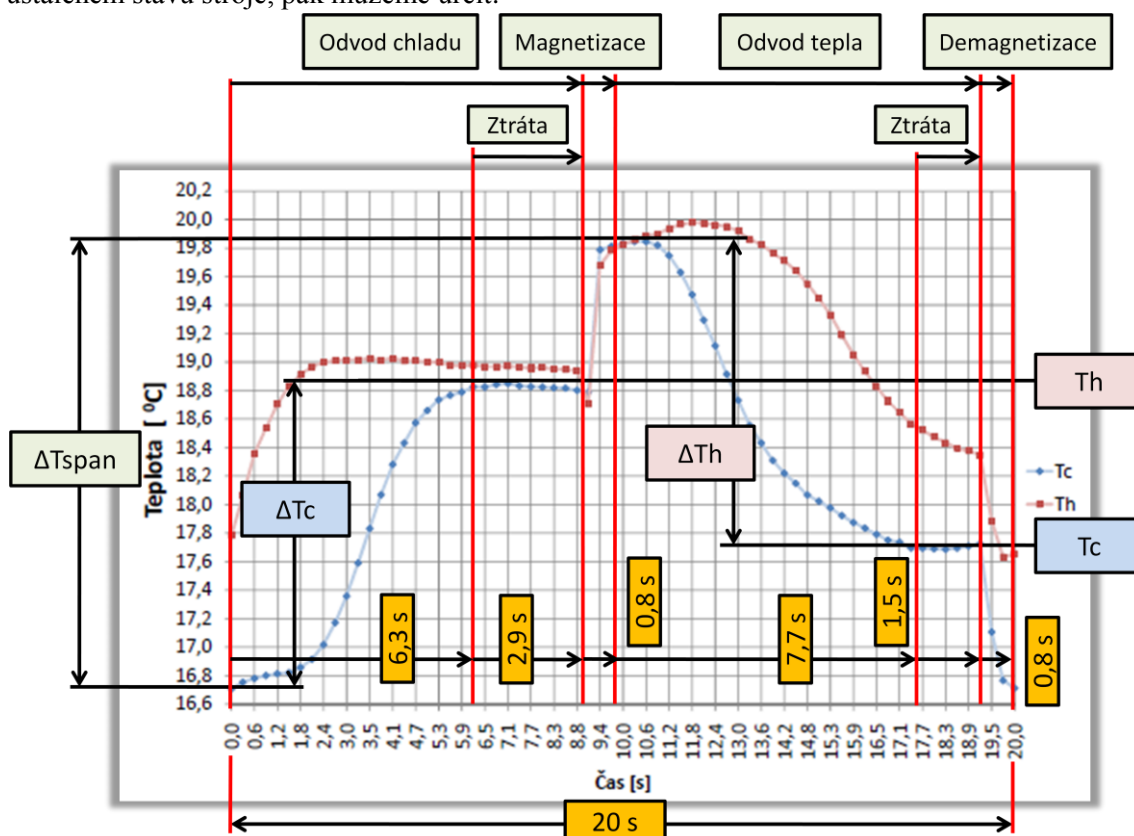
4. Experimentální výsledky

Dále uvažujeme průběh teplot na destičkách regenerátorů podle Obr. 6. Hlavní parametry jsou: Temperature span ΔT_{span} [K], doba cyklu [s] a teploty T_H [K] a T_C [K]. T_H představuje teplotu Gd destiček na teplém konci regenerátoru a T_C teplotu Gd destiček na studeném konci regenerátoru (jedná se současně přibližně o teplotu, kterou má teplotnosná látka v daném místě a v daný čas). Odvedený topný a chladicí výkon z Gadoliniových destiček během jednoho cyklu je $\dot{Q}_H = \dot{m} \cdot c_{liq} \cdot \Delta T_h$ a $\dot{Q}_C = \dot{m} \cdot c_{liq} \cdot \Delta T_c$, kde ΔT_h a ΔT_c představují maximální rozdíly teplot mezi stavem magnetizace, resp. demagnetizace a stavem odvedeného tepla, resp. chladu z Gadoliniových destiček. Studium naměřených hodnot bylo provedeno pouze pro studenou část regenerátoru a pro studený výměník. Tepelným cyklem je brán cyklus: pohyb pístu – magnetizace - pohyb pístu a demagnetizace. Těto sekvenci úkonů odpovídají v našem případě časy cyklů od 0,9 do 20 s.



Obr. 6: Schéma zapojení měření

Jestliže provedeme studium peaku pro první zvolenou rychlost, tj. 3 ot.min⁻¹ v teplotně ustáleném stavu stroje, pak můžeme určit:


 Obr. 7: Studium peaku pro 3 ot.min⁻¹

Z naměřených dat, Obr. 7, můžeme vyvozovat následující závěry:

- Čas cyklu je $T = 20$ s; přičemž studená část cyklu trvá 9,2 s, poté následuje magnetizace Gadolinia v trvání 0,8 s, dále teplá část cyklu 9,2 s a demagnetizace 0,8 s,
- Studená část cyklu (tj. proudění teplotnosné látky do studeného výměníku) obsahuje část trvající okolo 2,9 s ve které se již nepředává žádné teplo z destiček do proudící teplotnosné látky.

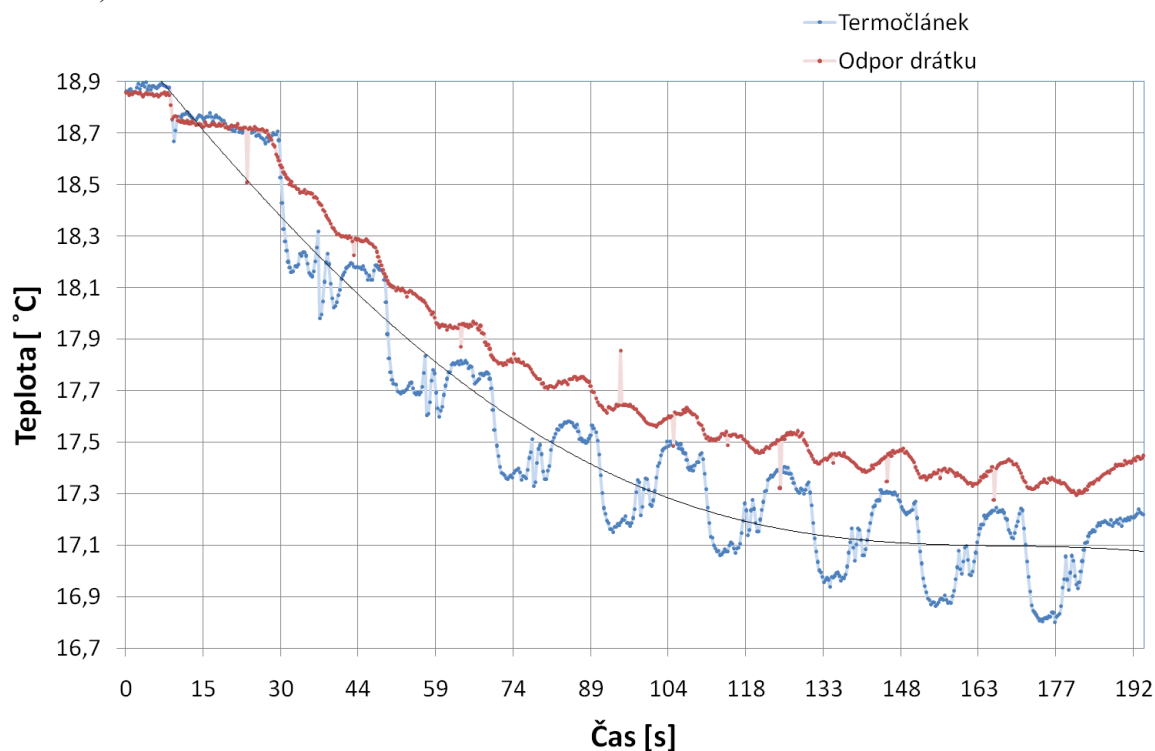
Tuto ztrátovou část obsahuje též teplá část cyklu v trvání 1,5 s. Můžeme učinit jednoduchý závěr – rychlost 3 ot.min⁻¹ je příliš malá a zároveň zdvih pístu je zbytečně velký, protože ke konci zdvihu nedochází k žádné výměně tepla.

c) $\Delta T_c = 18,8 - 16,7 = 2,1$ K. Elementární chladicí výkon odvedený z Gadoliniových destiček v jednom cyklu za ustáleného stavu stroje je

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot c_{liq} \cdot \Delta T_c = \frac{\rho_{liq} \cdot V_{pist}}{t_{zdvih}} \cdot c_{liq} \cdot \Delta T_c = \frac{789,7,85 \cdot 10^{-6}}{9,2} \cdot 2470 \cdot 2,1 = 3,5 \text{ W},$$

kde $t_{zdvih} = 9,2$ s představuje dobu zdvihu pístu o objemu $7,85 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

d) Elementární zisky chladu jsou schopny pokrýt tepelné ztráty studeného výměníku a výsledkem činnosti stroje je měřitelné ochlazení studeného výměníku z původního ustáleného stavu do nové ustáleného stavu o přibližně 1,7 K, Obr. 8. Naměřené teploty termočlánku a odporu drátku byly rozdílné při všech měřeních o přibližně 0,2 K (asi 10% naměřeného ochlazení).



Obr. 8: Ochlazení studeného výměníku pro 3 ot.min⁻¹

Pro zvolené provozní stavy byly naměřené a vypočtené následující hodnoty v Tab. 1 a Tab. 2.

Měření	ΔT_{span} [K]	T_H [K]	T_C [K]	Čas cyklu [s]	Elem. chladicí výkon [W]	Přibližný čas ustálení [s]	Ochlazení studeného výměníku [K]
3 ot.min ⁻¹	3,1	18,8	17,7	20	3,5	150	1,7
6 ot.min ⁻¹	3,4	18,8	17,3	10,4	7,8	185	1,4
9 ot.min ⁻¹	3,4	18,9	17,4	7,4	11,5	150	1
20 ot.min ⁻¹	3,2	18,2	17	3,6	28	45	2,1
6 ot.min ⁻¹ (1/10)	-	19,4	16,8	1,8	cca 0,9	200	0,6
12 ot.min ⁻¹ (1/10)	-	20	16,9	1,2	cca 1,2	300	(1,7)
20 ot.min ⁻¹ (1/10)	-	19,6	17	0,9	cca 3	200	1,2

Tab. 1: Naměřené a vypočítané hodnoty

Na základě naměřených teplot teplého a studeného výměníku můžeme uvažovat dosažený střední teplotní spád mezi výměníky jako $\Delta T = T_H - T_C$ podle Tab. 2.

Měření	ΔT [K]
3 ot.min ⁻¹	1,1
6 ot.min ⁻¹	1,5
9 ot.min ⁻¹	1,5
20 ot.min ⁻¹	1,2
6 ot.min ⁻¹ (1/10)	2,6
12 ot.min ⁻¹ (1/10)	3,1
20 ot.min ⁻¹ (1/10)	2,6

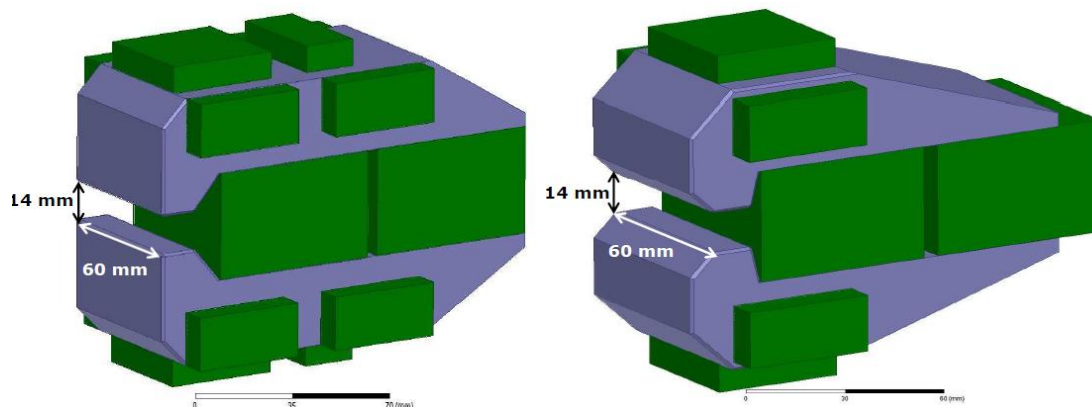
Tab. 2: Rozdíl teplot mezi výměníky

5. Matematický model

Součástí řešení úlohy magnetického chlazení byla tvorba matematického modelu zařízení. Matematickým modelem byly ověřeny naměřené výsledky indukce magnetického pole a přenosu tepla.

5.1 Výpočet magnetického pole

Výpočet magnetů byl proveden v software ANSYS Maxwell. Vstupem výpočtu byla geometrie magnetů, která odpovídá vyrobenému stavu. Modely magnetů jsou na Obr. 9.

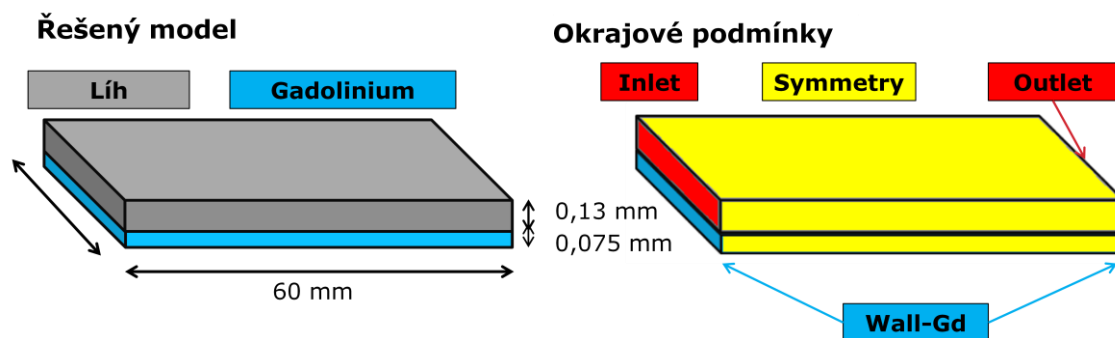


Obr. 9: Modely magnetů pro ANSYS Maxwell

Výsledky výpočtů a naměřených hodnot v laboratořích ČVUT FS se liší o přibližně 20%. Matematický model predikoval slabší magnetické pole v mezeře než bylo ve skutečnosti změřeno.

5.2 Výpočet přenosu tepla

Matematický model aktivních magnetických regenerátorů byl řešen v software ANSYS Fluent R13 a ANSYS Structural s následující geometrií: regenerátor byl rozdělen na 25 destiček o tloušťce 0,15 mm a 24 vrstev teplotnosné látky – lihu. Z těchto vrstev byla pak řešena jedna půlvrstva Gd destičky a jedna půlvrstva lihu, Obr. 10.



Obr. 10: Model regenerátoru pro ANSYS Fluent [1]

Matematickým modelem byly získány následující výsledky:

- Ideální doba přenosu tepla je okolo 1 s (pro zvolené rozměry a parametry zařízení), výpočet byl potvrzen i měřením,
- Odhad součinitele přestupu tepla mezi teplotonosnou látkou a destičkami Gd při proudění teplotonosné látky.

Výpočet celého cyklu a výpočet z počátečního stavu do nového ustáleného stavu zařízení nebyl zatím proveden.

Závěr

Na zařízení ČVUT FS byla ověřena existence magnetokalorického jevu. Zařízení je v současné době plně funkční, nicméně bez většího chladicího výkonu. Pro pokračování studia magnetokalorického jevu na ČVUT FS je potřeba další výzkum výměny tepla i za jiných provozních podmínek a s více náplněmi aktivních magnetických regenerátorů. Dále by bylo potřeba řešit podrobnější matematické modely. Na zařízení byly dosaženy následující výsledky:

- Magnetokalorický jev vyvolaný změnou indukce magnetického pole $\Delta B = 0,85 \text{ T}$ na úrovni okolo 1°C ,
- Maximální teplotní spád mezi výměníky $3,1^\circ\text{C}$,
- Maximální $\Delta T_{\text{span}} = 3,4^\circ\text{C}$.

Literatura

- [1] LEGAIT, U.; KEDOUS-LEBOUC, A.; RONDOT, L.: Numerical simulation and analysis of the refrigerant bed behavior using Fluent software. Thermag III. Des Moines, USA, 2009.
- [2] Konference Thermag I až Thermag III. Montreaux, Switzerland. 2005, Portoroz, Slovinsko. 2007, Des Moines, USA. 2009.
- [3] OTA, Josef: Magnetokalorický jev a termodynamické oběhy. ČVUT FS, 2008.