

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum I



Úloha č. 27

Název úlohy: Tepelné čerpadlo

Jméno: Jonáš Venc

Datum měření: 4. 3. 2024

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
Celkem	max. 17	

Posuzoval:

dne:

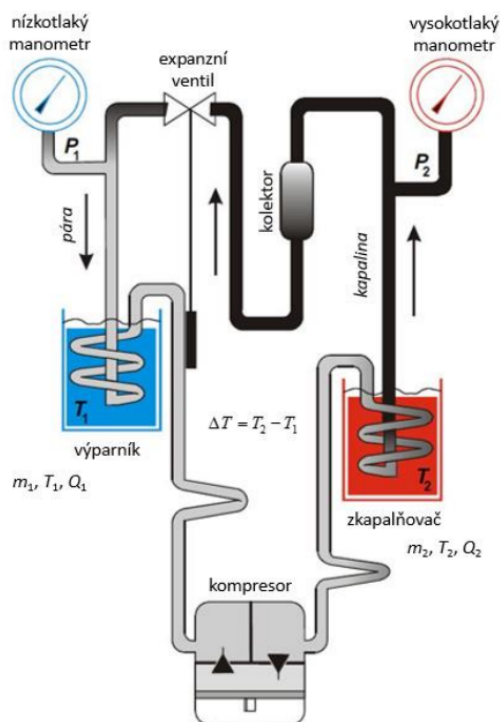
1 Pracovní úkoly

1. Při zapnutém kompresoru proměřte časovou závislost teplot v obou rezervoárech. Současně zaznamenávejte elektrický příkon kompresoru a časovou závislost tlaků v aparatuře. Graficky znázorněte.
2. Vyhodnotte chladicí a topný faktor zdroje tepla, graficky znázorněte závislosti $\dot{Q}_c = \dot{Q}_c(T)$ a $\dot{Q}_h = \dot{Q}_h(T)$.
3. Při vypnutém kompresoru proměřte časovou závislost teploty vody v obou rezervoárech. Graficky znázorněte a závislost fitujte exponenciálou. Diskutujte koeficienty naměřené závislosti.
4. Ze změny teploty rezervoáru po vypnutí kompresoru určete dolní odhad tepelných ztrát.

2 Teoretická část

Podstatou fungování tepelného čerpadla je předávání tepla z jednoho rezervoáru do druhého. Používají se různá média pro přenos tepla, v našem případě je v rezervoárech umístěna destilovaná voda, kde rezervoár, který se během fungování otepluje je označen červeně a druhý, který se ochlazuje má modrou barvu.

Tepelné čerpadlo je tvořeno uzavřeným okruhem, kde koluje pracovní látka 1,1,1,2- tetrafluorethan. V oblasti modrého kolektoru se v měděném potrubí chladivo nachází v plynné fázi. Odtud je přečerpáváno do kompresoru, kde je zvyšován tlak a tím dochází ke zkapalnění. Zde začíná vysokotlaká část čerpadla. Během tohoto procesu látka odevzdává část energie do červeného kolektoru, což způsobuje zvyšování teploty vody uvnitř kolektoru. Odtud putuje chladivo v kapalném stavu přes vysokotlaký manometr do kolektoru. Zde se látka hromadí a je regulovaně propouštěna do expanzního ventilu. Zde je snižován tlak a kapalina se tím vypařuje. Začíná tak nízkotlaká část čerpadla. Tím odebírá teplo z okolí a snižuje teplotu modrého rezervoáru. Je zde také umístěn nízkotlaký barometr. Následuje teplotní čidlo, které reguluje expanzní ventil proto, aby se do kompresoru dostávala pouze plynná fáze. Za čidlem se nachází již kompresor, který takto celý okruh uzavírá, jak je znázorněno na obrázku 1.



Obr. 1: Schéma tepelného čerpadla

Teplota v různých místech okruhu je snímána digitálním termometrem s výstupem do počítače. Teplota T1 je měřena v modrém rezervoáru a T2 v červeném. Uvnitř kbelíků jsou umístěna míchadla, díky kterým je teplota vody ve všech místech podobná. Dále je teplota T3 odečítána ze vzduchu v okolí a nakonec teplota T4 na povrchu kompresoru.

U ideálního tepelného čerpadla by platila rovnice zákona zachování energie

$$\Delta Q_1 + W = \Delta Q_2 \quad (1)$$

kde ΔQ_1 je odebrané teplo, W energie dodaná elektrickým proudem a ΔQ_2 teplo, které přijme červený rezervoár. Práce, kterou tepelný stroj vykonává, je rovna

$$W = P \cdot \Delta t \quad (2)$$

kde P je průměrný výkon za čas t . Dodané, popř. odevzdané teplo lze vyjádřit jako

$$\Delta Q_{1,2} = m_{1,2} c \Delta T_{1,2} \quad (3)$$

kde $m_{1,2}$ je hmotnost vody v rezervoáru, c měrné teplo vody a $\Delta T_{1,2}$ rozdíl teplot v daném rezervoáru. V reálném případě však do vztahu (1) vstupují tepelné ztráty ΔQ .

Abychom mohli určit kvalitu daného tepelného čerpadla a porovnat ho s jinými zavádí se tzv. chladicí faktor zdroje chladu, který je definován jako

$$\varepsilon(\Delta T) = \frac{\Delta Q_1}{P \Delta t} = \frac{cm_1 \Delta T_1}{P \Delta t} \quad (4)$$

Analogicky můžeme popsat topnou účinnost pomocí topného faktoru zdroje tepla

$$\tau(\Delta t) = \frac{cm_2 \Delta T_2}{P \Delta t} \quad (5)$$

Nejistoty měření jsou dány

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (6)$$

3 Výsledky a zpracování měření

3.1 Laboratorní podmínky

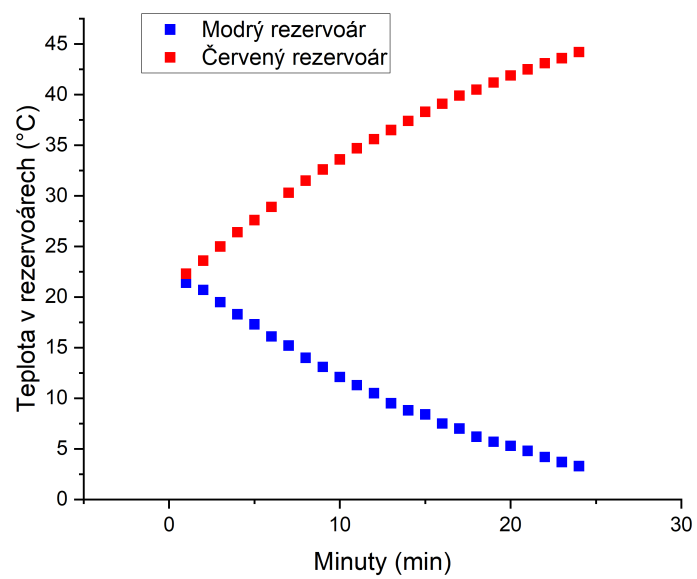
Měření bylo prováděno za laboratorních podmínek uvedených v tabulce 1.

t / °C	p / hPa	vlhkost / %RH
23,9(4)	981(2)	38,8(25)

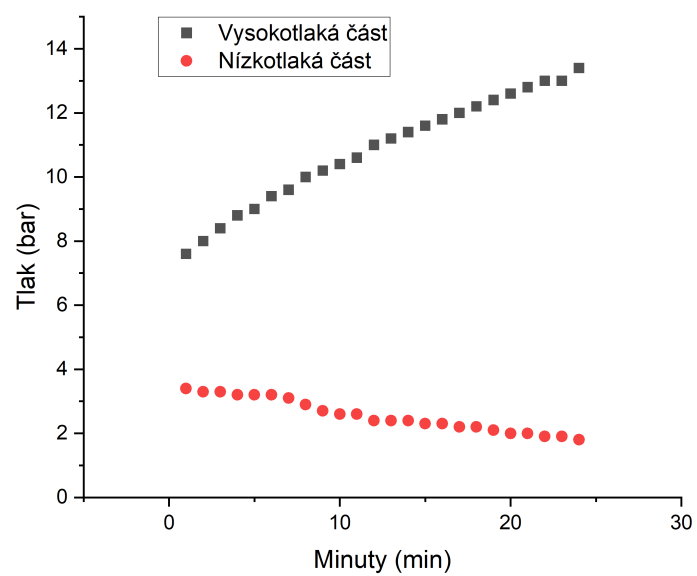
Tab. 1: Laboratorní podmínky

3.2 Zapnutý kompresor

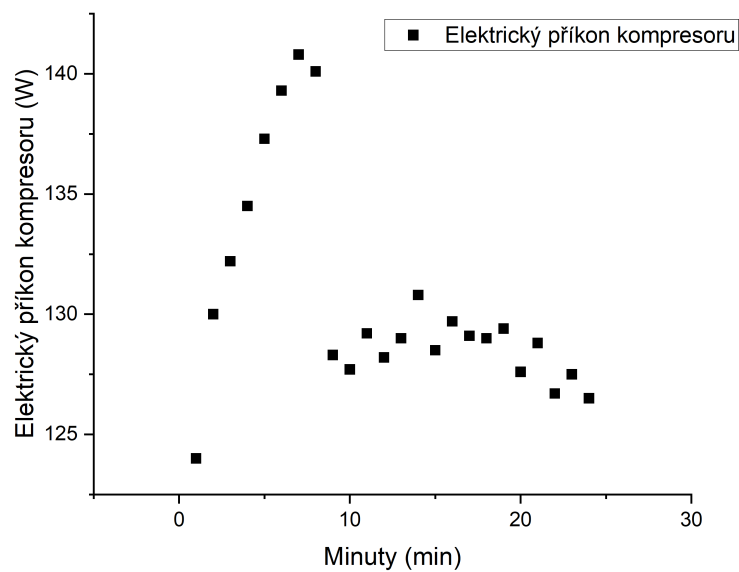
Při zapnutém kompresoru byly v minutovém intervalu zapisovány teploty T1 - T4, tlak v nízkotlaké a vysokotlaké části a příkon dodávaný kompresoru. Závislosti teploty v modrém a červeném rezervoáru na čase jsou znázorněny na obrázku 2. Dále je na obrázku 3 zobrazena závislost obou tlaků na čase. Nakonec na obrázku 4 je naměřena závislost příkonu na čase.



Obr. 2: Závislost teploty T1 a T2 na čase



Obr. 3: Závislost tlaků na čase



Obr. 4: Závislost příkonu na čase

Pro výpočet chladicího faktoru použijeme vztah (4). Pro výpočty budeme používat hodnoty uvedené v tabulce 2.

Měrné teplo vody	4180 J/kg·K
Hustota vody při 24 °C	997 kg · m ⁻³
Hmotnost m ₁	4 kg
Hmotnost m ₂	4 kg
Průměrný příkon	130,6 W
ΔT_1	18,1 K
ΔT_2	21,9 K
Δt	1380 s

Tab. 2: Použité hodnoty

Odtud získáme chladicí faktor

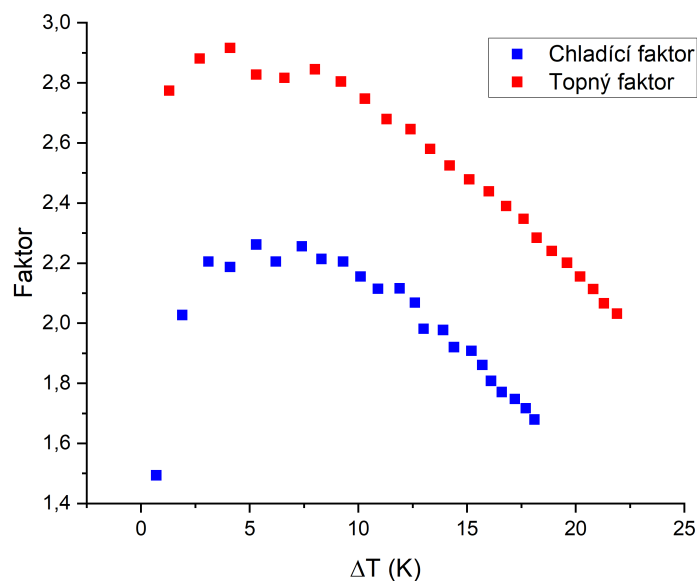
$$\varepsilon = 1,67$$

a topný faktor

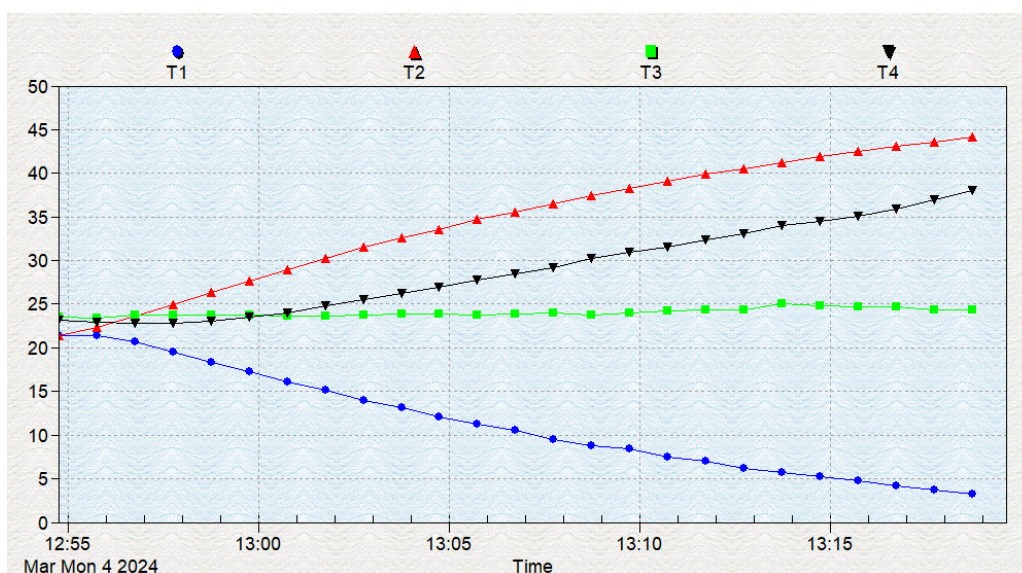
$$\tau = 2,03$$

Na grafu 5 jsou znázorněny závislosti topného a chladicího faktoru na ΔT .

Na obrázku 6 jsou zobrazeny závislosti teplot T1 - T4 na čase. Tento graf je exportovaný přímo z programu používaném pro sběr dat z termometru. Oproti předchozím grafům navíc porovnává teplotu T3 okolí čerpadla a T4 na povrchu kompresoru.



Obr. 5: Závislost topného a chladicího faktoru na ΔT



Obr. 6: Závislost teplot na čase

3.3 Vypnutý kompresor

Jakmile tepelné čerpadlo dosáhlo požadovaného rozdílu teplot mezi rezervoáry, kompresor byl odpojen od elektrického proudu a byla sledována změna teplot T1 - T4 a tlaků obou částí čerpadla. Na grafu 7 je průběh závislosti teplot obou rezervoárů na čase, který je fitovaný exponenciálou.

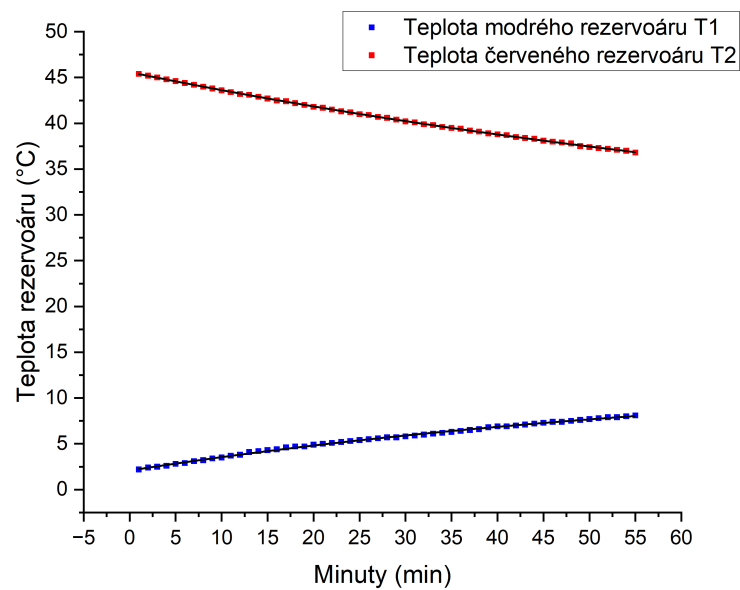
Exponenciála je daná rovnicí

$$y = y_0 + A \cdot e^{R_0 \cdot x}$$

Exponenciální křivky modrého a červeného rezervoáru mají následující koeficienty

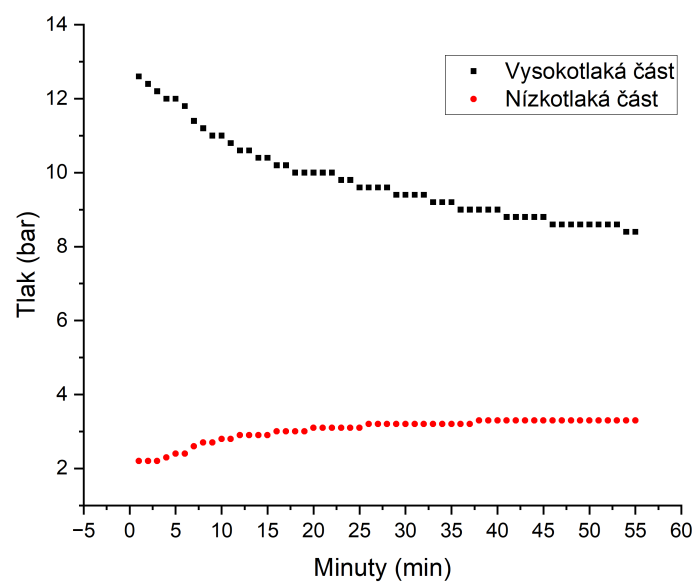
$$y_{\text{červená}} = 24,9 + 20,7 \cdot e^{-0,01x}$$

$$y_{\text{modrá}} = 12,8 - 10,6 \cdot e^{-0,01x}$$



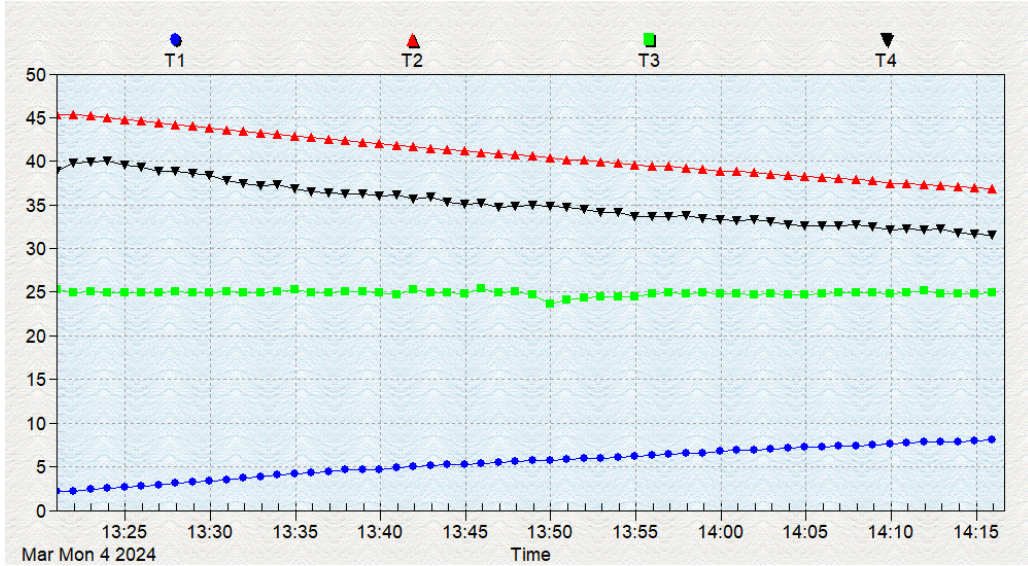
Obr. 7: Závislost teploty T1 a T2 na čase

Na grafu 8 je zobrazena závislost tlaků na čase při vypnutém kompresoru.



Obr. 8: Závislost tlaků na čase

Na obrázku 9 jsou opět vidět všechny čtyři teploty přímo z termometru



Obr. 9: Závislost teplot na čase

3.4 Tepelné ztráty

Podle (2) je práce, kterou čerpadlo vykoná, rovna

$$W = 188(9) \text{ kJ}$$

Podle (3) je odebrané a dodané teplo rovno

$$\Delta Q_1 = 4,87(4) \text{ MJ}$$

$$\Delta Q_2 = 4,93(4) \text{ MJ}$$

Celkové tepelné ztráty se vypočítají jako

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + W - \Delta Q_2$$

Odtud

$$\Delta Q = 125(60) \text{ kJ}$$

Nepřesnost teploměru je 1,09 °C, měřiče příkonu 0,05 W, vysokotlakého manometru 0,1 bar a nízkotlakého je 0,05 bar. Chyba určení hmotnosti rezervoáru je spočtena z jejího objemu a hustoty a je rovna 0,1 kg.

Podle (6) je chyba $\Delta Q_{1,2}$ rovna

$$\sigma_{Q1,2} = c\sqrt{\Delta T^2 \sigma_m^2 + m^2 \sigma_{\Delta T}^2} \quad (7)$$

Nepřesnost Q je také dána metodou přenosu chyb pro součet.

4 Diskuse výsledků

Při zapnutí kompresoru je z grafu 2 patrné, že závislost teploty na čase není lineární. S postupem času je změna teplot v obou rezervoárech menší než za předchozí časový úsek. Znamená to tedy, že tepelný stroj je nejvíce účinný na začátku činnosti. Tuto skutečnost potvrzuje obrázek 5, kde topný i chladicí faktor je nejvyšší ze začátku a poté klesá. Prvních několik minut se tepelný stroj teprve dostává do svého optimálního provozního stavu, proto oba faktory rostou.

Na grafu 4 závislosti elektrického příkonu na čase vidět, že příkon odebíraný kompresorem ze začátku pravidelně roste, až dosáhne svého maxima přibližně ve 140 W. Po prvních 10 minutách je již stabilizovaný a jeho hodnota až do konce provozu osciluje přibližně mezi 126-130 W.

Obrázek 6 srovnává teploty T3 okolí a T4 na povrchu kompresoru. Je vidět, že teplota T3 nepatrně vzrostla, což je způsobeno tepelnými ztrátami do okolí. Výrazněji vzrostla teplota T4 na povrchu kompresoru způsobená energetickými ztrátami při přeměně elektrické energie na práci kompresoru.

Při vypnutí kompresoru bylo třeba sledovat jednotlivé závislosti déle, abychom získali data během pomalého procesu samovolné vychládání čerpadla. Teplotní závislost rezervoáru byla fitována exponenciálou. Z jejího předpisu vidíme, že koeficient R_0 u proměnné x je téměř nulový, což znamená, že tato křivka je velmi podobná přímce. I přes to, že jsme hodnoty měřili téměř hodinu po minutových intervalech, je pravděpodobné, že exponenciální průběh bychom získali až za delší časový úsek. Samotné tepelné čerpadlo se vrátí do původního stavu až za mnoho hodin. Znaménko koeficientu A udává orientaci exponenciály.

Graf 8 znázorňuje závislost tlaků v potrubí obou částí čerpadla. Vidíme, že obě hodnoty mají tendenci se vrátit do rovnovážného stavu. Závislost může působit schodovitě, což je dáno způsobem měření a nejmenším dílkem manometru.

Také obrázek 9 zobrazují tendenci všech teplot vyrovnat teplotu v okolí. U teploty T3 v čase 13:50 se nachází výchylka, která je velmi pravděpodobně způsobena momentálním podnětem z okolí.

Nakonec byly spočteny tepelné ztráty, které jsou přijatelné vzhledem k celkové energii. Znamená to tedy, že takto sestrojené tepelné čerpadlo typu voda-voda je poměrně účinné.

5 Závěr

V tomto měření jsme změřily tepelné čerpadlo během provozu i po něm. Získaly jsme data, popisující práci tohoto stroje, které jsme graficky znázornili v závislosti na čase.

Vyhodnotili jsme i účinnost čerpadla pomocí topného a chladicího faktoru, jenž jsme také graficky znázornili.

Při vypnutí čerpadla jsme navíc závislost teplot v rezervoárech fitovali exponenciálou a diskutovali její koeficienty.

Na konec jsme spočítali odhad tepelných ztrát čerpadla.

6 Použitá literatura

- [1] MFF. *Studijní text*: [Online]. [cit. 10. března 2024].
https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_127.pdf7
- [2] MIKULČÁK, Jiří; KLIMEŠ, Bohdan; ŠIROKÝ, Jaromír; ŠŮLA, Václav a ZEMÁNEK, František. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 5. vydání. Pomocné knihy pro žáky (Prometheus). Praha: Prometheus, 2020. ISBN 978-80-7196-481-0. [cit. 10. března 2024].
- [3] ČÍŽEK, Jakub. *Přenos chyb*: [Online]. [cit. 10. března 2024].
<https://physics.mff.cuni.cz/kfnt/vyuka/upf/cizek/prednaska8.pdf>
- [4] MFF. *Pracovní úkol*: [Online]. [cit. 10. března 2024].
<https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/127>