



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## NÁVRH A OTESTOVÁNÍ ZPĚTNOVAZEBNÉHO ŘÍZENÍ PRO TERMOSTATIZOVANOU KOMORU

DESIGN AND VERIFICATION OF A FEEDBACK CONTROL FOR THERMOSTATIZED CHAMBER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Fridrich

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Šimon Řeřucha, Ph.D.

BRNO 2023

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Martin Fridrich</b>
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Mgr. Šimon Řeřucha, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh a otestování zpětnovazebného řízení pro termostatizovanou komoru

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V oblasti přesného měření délky pomocí laserů a laserové interferometrie je jedním z aktuálních témat důsledná charakterizace teplotně mechanických vlivů na tato velice přesná měření. Úkolem studenta bude sestavit model termostatizační komory (podle vzoru existující) a na tomto modelu zrealizovat, optimalizovat a charakterizovat zpětnovazební řízení teploty uvnitř této komory.

### Cíle bakalářské práce:

- Seznámit se se stávajícím řešením termostatizační komory na ÚPT, jednotlivými moduly a principy sběrnice CANopen
- Navrhnout a zrealizovat model termostatizační komory
- Navrhnou a aplikovat vhodný přístup pro zpětnovazební řízení teploty uvnitř komory
- Charakterizovat dosaženou stabilitu vnitřní teploty, teplotní gradienty a vliv okolních podmínek.

### Seznam doporučené literatury:

- P. Herout, Učebnice jazyka C. Kopp, 2008, ISBN: 978-80-7232-351-7
- Embedded Systems: Building and Programming Embedded Devices. Dostupné online: [http://en.wikibooks.org/wiki/Embedded\\_Systems](http://en.wikibooks.org/wiki/Embedded_Systems)
- M. Mareš, T. Valla, Průvodce labyrintem algoritmů, ISBN: 9788088168638. Dostupné online: <https://knihy.nic.cz/>
- ST Microelectronic, STM32MCU basics. Dostupné online: [https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:STM32MCU\\_basics](https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:STM32MCU_basics)

- ST Microelectronic, Getting started with STM32: STM32 step-by-step. Dostupné online:  
[https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:Getting\\_started\\_with\\_STM32:\\_STM32\\_step\\_by\\_step](https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:Getting_started_with_STM32:_STM32_step_by_step)

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Zmeny teploty majú veľký vplyv na presné meranie dĺžky prostredníctvom laserovej interferometrie. Pre charakterizáciu a kompenzáciu týchto vplyvov je dôležité prostredie s riadenou teplotou. Táto práca sa zaoberá realizáciou spätnoväzobného riadenia pre testovaciu komoru, ktorá má za úlohu toto kontrolované prostredie vytvoriť. Prvá časť je venovaná rešerši techník riadenia, základným princípom laserovej interferometrie, komunikačnému protokolu CANopen a súčasnému riešeniu termostatizovanej komory využívajúcej na oddelení koherenčnej optiky ÚPT AVČR. Ďalšia časť popisuje konštrukciu novej komory, vytvorenie riadiaceho softwaru, implementáciu riadenia a jeho optimalizáciu pomocou niekoľkých metód. V poslednom rade práca obsahuje charakterizáciu podmienok v komore. Porovnanie s pôvodným stavom ukazuje viac ako dvojnásobné zlepšenie stability teploty a takmer trojnásobné zmenšenie vplyvov okolia na teplotu v komore.

## Summary

Temperature variations have a great influence on the accurate length measurement by laser interferometry. An environment with controlled temperature is important to characterize and compensate for these effects. This thesis is concerned with the implementation of feedback control for a test chamber to create this controlled environment. The first part is devoted to a survey of control techniques, the basic principles of laser interferometry, the CANopen communication protocol, and the current design of the thermostatic chamber used at the Department of Coherent Optics of the Institute of Scientific Instruments of the CAS. The next part describes the design of the new chamber, the creation of the control software, the implementation of the control, and its optimization using several methods. Finally, the thesis contains a characterization of the conditions in the chamber. Comparison with the original condition shows more than a twofold improvement in temperature stability and an almost threefold reduction in the environmental influences on the temperature inside of the chamber.

## Kľúčové slová

Termostatizovaná komora, laserová interferometria, metrológia dĺžky, spätnoväzobné riadenie, CANopen, stabilita teploty, teplotný gradient

## Keywords

Thermostatic chamber, laser interferometry, length metrology, feedback control, CANopen, temperature stability, temperature gradient

## Bibliografická Citácia

FRIDRICH, M. *Návrh a otestování zpětnovazebného řízení pro termostatizovanou komoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 56 s.,  
Vedoucí diplomové práce: Mgr. Šimon Řeřucha, PhD.

Prehlasujem, že som tento text napísal sám, na základe vlastnej práce, pripomienok môjho vedúceho a nižšie uvedených zdrojov.

**Martin Fridrich**

Brno . . . . .

. . . . .

Chcel by som sa poďakovať svoju vedúcemu Mgr. Šimonovi Řeřuchovi, PhD za ochotu a vedenie pri písaní tejto práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať svojim blízkym za ich podporu.

**Martin Fridrich**

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
1.1	Motivácia . . . . .	9
1.2	Formulácia problému . . . . .	10
1.3	Ciele práce . . . . .	10
1.4	Organizácia práce . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Rešerš</b>	<b>11</b>
2.1	Spätnoväzobné riadenie . . . . .	11
2.1.1	On-Off Riadenie: . . . . .	11
2.1.2	PID riadenie . . . . .	12
2.1.3	Inkrementálny model PID regulátoru . . . . .	13
2.1.4	Ladenie PID regulátorov . . . . .	14
2.1.5	Požiadavky na reguláciu . . . . .	18
2.2	Interferometria . . . . .	19
2.2.1	Aplikovaná interferometria . . . . .	20
2.3	CANopen . . . . .	20
2.3.1	Základy fungovania CANopen . . . . .	21
2.3.2	CANopen v rámci modelu OSI . . . . .	23
2.3.3	Implementácia CANopen pre vedeckú inštrumentáciu (ÚPT) . . . . .	24
2.4	Súčasná realizácia teplotnej komory . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Postup a výsledky riešenia</b>	<b>30</b>
3.1	Realizácia novej teplotnej komory . . . . .	30
3.2	Návrh a implementácia experimentálneho riadiaceho softwaru . . . . .	31
3.2.1	Funkčné a užívateľské požiadavky . . . . .	31
3.2.2	Architektúra experimentálneho riadiaceho softwaru . . . . .	31
3.2.3	Čítanie dát z komory cez CAN . . . . .	32
3.2.4	Zapisovanie dát cez CAN . . . . .	32
3.3	PID regulátor . . . . .	34
3.3.1	Vytvorenie triedy a štruktúry PID regulátora . . . . .	34
3.3.2	Ladenie PID regulátora . . . . .	34
3.3.3	Prídavné funkcie . . . . .	39
3.3.4	Návrh a implementácia ovládacieho SW pre riadenie komory . . . . .	40



3.4	Testovanie teplotnej komory . . . . .	40
3.4.1	Test stability teploty v ustálenom stave . . . . .	41
3.4.2	Test skokovej zmeny setpointu . . . . .	42
3.4.3	Test postupnej zmeny setpointu . . . . .	43
3.4.4	Meranie teplotného gradientu . . . . .	44
3.4.5	Porovnanie s pôvodným stavom . . . . .	45
3.5	Zhrnutie . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Záver</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>Prílohy</b>	<b>50</b>

# 1 Úvod

## 1.1 Motivácia

### Meranie vzdialenosti

Jednou z najpresnejších metód merania vzdialenosti je optická interferometria. Ide o metódu merania založenú na superpozícii (interferencii) svetla. Svetlo sa považuje za elektromagnetické vlnenie, pričom ktorého elektrické pole sa šíri pozdĺž meracej dráhy (definovanej ako smer  $z$ )[1]:

$$E(z, t) = A \cos(\phi) = A \cos(\omega \cdot t - k \cdot z + \delta) \quad (1.1)$$

kde  $A$  je amplitúda,  $\phi$  je fáza,  $\omega$  uhlová frekvencia,  $k$  vlnové číslo a  $\delta$  je počiatková fáza. Závislosť medzi parametrami  $\omega$  a  $k$  s vlnovou dĺžkou  $\lambda$  a frekvenciou  $f$  je daná vzťahmi  $k = 2\pi/\lambda$  a  $\omega = 2\pi \cdot f$ [1].

Vlnoplochy prejdú vzdialenosť jednej vlnovej dĺžky počas jednej periódy kmitania  $T$  ( $T = 1/f$ )[1]. Z toho vyplýva, že rýchlosť monochromatickej svetelnej vlny  $c$  sa rovná fázovej rýchlosti  $c = f \cdot \lambda$ [1].

Zatiaľ čo priemerná intenzita  $I$  jednej monochromatickej svetelnej vlny súvisí len s kvadrátom jej amplitúdy, interferencia dvoch svetelných vln rovnakej frekvencie vedie k detekovateľnej intenzite[1]:

$$I = I_0(1 + \gamma \cdot \cos[\phi_1 - \phi_2])$$

Táto intenzita súvisí s fázovým rozdielom medzi vlnami. V praxi, sa interferujúce vlny generujú pomocou optických interferometrov, o ktorých je viac napísané v sekcii 2.2.1. Táto technika je uprednostňovaná pre čo najpresnejšiu realizáciu dĺžky vo všeobecnosti. Jednotka dĺžky 1m je totiž popísaná pomocou rýchlosti svetla a určitého časového intervalu. Keďže tento interval je veľmi krátky, je problematické zmerať ho dostatočne presne priamou metódou. Interferometria tak obchádza práve tento nedostatok a pomáha nám realizovať jednotky dĺžky čo najpresnejšie.[1]

### Zero-drift

Dlhodobá stabilita merania v meracích scenároch a aplikáciách založených na interferometrii sa nazýva zero-drift. Dobre charakterizovaný a kompenzovaný zero-drift v takejto aplikácii naberá na význame s použitím v menej kontrolovanom prostredí a tiež s rastúcim časovým rámcom merania, ako napríklad dlhé skenovania v mikroskopickej nanometrológii, dlhé expozície v elektrónovej litografii alebo kalibrácie s interferometrickou

referenciou s väčším počtom kalibračných bodov alebo opakovaní.[2]

Cieľom súčasného výskumu na ÚPT AVČR je komplexne preskúmať chybové vplyvy a príspevky k neistote merania súvisiace so zero-driftom v aplikáciách založených na laserovej interferometrii, s osobitným zameraním na teplotné vplyvy (keďže sa zvyčajne javia ako dominantný príspevok) a prístupy na ich potlačenie. Toto úsilie zahŕňa niekoľko vzájomne sa dopĺňajúcich smerov.[2]

Prvým identifikovaným problémom bolo zistenie, že prípadné rozváženie dĺžok ramien interferometra spôsobí výraznejšiu citlivosť na zmeny teploty prostredia než len v dôsledku geometrických zmien spôsobených tepelnou rozťažnosťou: rádovo väčší vplyv na výstupnú fázu interferencie majú zmeny indexu lomu prostredia (čo ovplyvňuje efektívnu vlnovú dĺžku)[3]. Principiálnym riešením je prepracovanie usporiadania optickej dráhy nevyváženého interferometra, čím sa zmierni nulový drift v časovej škále niekoľkých hodín až niekoľkých týždňov a napriek teplotným zmenám prostredia.[2]

Počiatkové experimentálne práce ukázali potrebu dlhodobjších testov stability dĺžkových údajov z interferometrov a interferometrických zostáv, v prvom rade na účely vývoja samotnej inovovanej optiky a následne ako diagnostický nástroj vo všeobecnosti, a to na systematickú kontrolu optických zostáv a na testovanie väčších zostáv. Prvým mílnikom v tejto oblasti bola konštrukcia jednoduchej tepelnej izolačnej komory, ktorá umožnila merania stability v časovom rozsahu dní a týždňov s obmedzeným vplyvom okolitej teploty a vibrácií.[2]

## 1.2 Formulácia problému

Problematikou práce je navrhnutie regulátora pre termostatizovanú komoru s cieľom zmenšiť výkyvy teploty spôsobené vonkajšími zmenami, zmenšiť odchýlku v ustálenom stave a riadiť teplotu podľa potreby buď na ustálenú hodnotu alebo na požadovaný priebeh. Momentálne je na riadenie teploty použitý len P regulátor, ktorý nezaručuje potrebnú stabilitu a veľkosť odchýlky v ustálenom stave. Našou úlohou je teda nahradiť momentálne používaný P regulátor PID regulátorom, za účelom odstránenia niektorých nedostatkov. Viac o súčasnom riešení riadenia teploty možno nájsť v kapitole 2.4.

## 1.3 Ciele práce

Cieľom je zoznámiť sa so súčasným riešením termostatačnej komory na ÚPT, jednotlivými modulmi a princípmi zbernice CANopen. Následne vykonať rozbor techník spätnoväzobného riadenia, navrhnúť a aplikovať vhodný prístup k riadeniu teploty a po dosiahnutí výsledkov charakterizovať dosiahnutú stabilitu vnútornej teploty, teplotné gradienty a vplyv podmienok okolia.

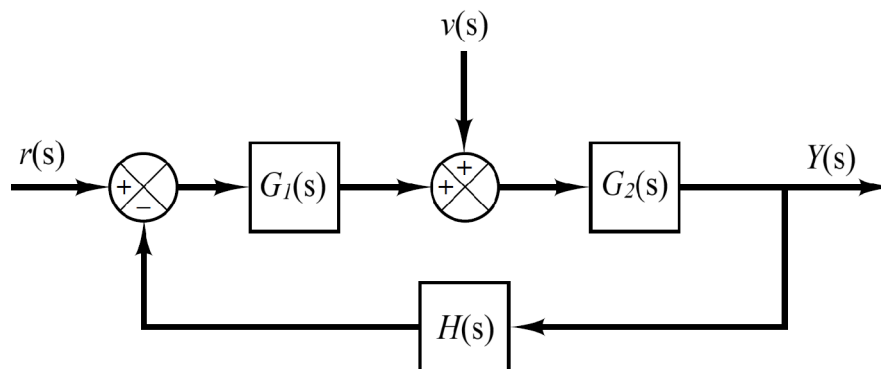
## 1.4 Organizácia práce

Touto časťou boli ujasnené problematika a ciele práce. Nasledujúce kapitoly sa budú venovať potrebnej teórii o spätnoväzobnom riadení (2.1), meraní pomocou interferometrie (2.2), protokole CANopen (2.3) a súčasnému riešeniu regulácie teploty v komore (2.4). Nasledovať budú kapitoly venované realizácii novej teplotnej komory (3.1), vytvoreniu experimentálneho riadiaceho softwaru (3.2), ladeniu PID regulátora (3.3) a výsledkom, ktoré sa týmto riešením podarili dosiahnuť (3.4).

## 2 Rešerš

### 2.1 Spätnoväzobné riadenie

Pri spätnoväzobnom riadení hovoríme o systémoch, ktoré si zachovávajú predpísanú závislosť medzi výstupom a referenčným vstupom tak, že ich porovnávajú a používajú rozdiel medzi nimi na riadenie sústavy. Správne navrhnutý regulátor má potom za úlohu zmenšovať rozdiel medzi výstupom a vstupom s ohľadom na požadované vlastnosti systému. Na dosiahnutie tohto cieľa je možné použiť niekoľko techník. [4]



Obr. 2.1: Bloková schéma regulačného obvodu so spätnou väzbou [4, 5]

Na obrázku 2.1 je bloková schéma regulačného obvodu so spätnou väzbou, kde  $G_1(s)$  je prenos regulátoru,  $G_2(s)$  prenos sústavy,  $v(s)$  poruchová veličina,  $H(s)$  prenos člena slúžiaceho na upravenie výstupnej veličiny tak, aby ju bolo možné porovnať so vstupom,  $r(s)$  vstupná referenčná veličina a  $Y(s)$  výstupná veličina.

#### 2.1.1 On-Off Riadenie:

On-off riadenie patrí medzi základné techniky regulácie. Funguje na základe zapínania a vypínania výstupu v závislosti na rozdieli medzi vstupnou a výstupnou veličinou.[4]

Tento druh riadenia je výhodný najmä z dôvodu svojej jednoduchosti a nízkej ceny. Z tohto dôvodu je veľmi často používaný pre domáce a priemyselné účely.[4]

K nevýhodám on-off riadenia patrí najmä menšia presnosť spôsobená tým, že výstup je buď vypnutý alebo zapnutý bez možnosti citlivejšieho riadenia. Táto presnosť sa ešte ďalej zhoršuje zavedením hysterézie, za účelom limitovania množstva zapnutí/vypnutí napríklad z dôvodu predĺženia životnosti systému.[4]

### 2.1.2 PID riadenie

PID riadenie (proporcionálne-integračne-derivačné) patrí v praxi medzi najčastejšie spôsoby riadenia. Fungovanie týchto regulátorov môže byť popísané rovnicou[6]:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

Kde  $u$  je riadiaca veličina,  $e$  je regulačná odchýlka. To znamená, že riadiaca veličina je súčtom troch zložiek: P zložky, ktorá je proporcionálna k odchýlke, I zložky, ktorá je proporcionálna k integrálu odchýlky a D zložky, ktorá je proporcionálna k derivácii odchýlky.

Parametre regulátora sú proporcionálne zosilnenie  $K$ , integračný čas  $T_i$ , a derivačný čas  $T_d$ . [6]

#### P zložka

V prípade čisto proporcionálneho riadenia sa rovnica regulácie zredukuje na:

$$u(t) = Ke(t) + u_b$$

Ako môžeme vidieť, riadiaca veličina je proporcionálna k regulačnej odchýlke. Premenná  $u_b$  je posunutie. Ak je regulačná odchýlka nulová, tak riadiaca veličina získava hodnotu  $u(t) = u_b$ . Posunutie  $u_b$  sa často nastavuje na hodnotu  $(u_{max} + u_{min})/2$ , ale môže byť aj prispôsobené manuálne, aby odchýlka v ustálenom stave bola nulová.[6]

#### I zložka

Hlavnou funkciou integračnej zložky je zaistiť, aby sa výstup zhodoval s požadovanou hodnotou v ustálenom stave. Pri proporcionálnej regulácii je pri ustálenom stave bežná odchýlka. S I zložkou, malá pozitívna odchýlka bude vždy viesť k zvyšujúcej sa riadiacej veličine, pretože integráciou sa s pribúdajúcim časom stále zvyšuje hodnota riadiacej veličiny, až pokiaľ je dostatočne veľká na vynulovanie regulačnej odchýlky.[6]

Nasledujúca rovnica nám poskytuje jednoduchý dôkaz, že odchýlka v ustálenom stave bude pri integračnej zložke vždy nulová. Predpokladáme, že systém je v ustálenom stave s konštantným riadiacim signálom ( $u_0$ ) a konštantnou odchýlkou ( $e_0$ ).[6]

$$u_0 = K \left( e_0 + \frac{e_0}{T_i} t \right) \quad (2.2)$$

Pokiaľ  $e_0 \neq 0$ , toto jasne protirečí predpokladu, že riadiaci signál  $u_0$  je konštantný. Regulátor s integračnou zložkou tým pádom vždy bude mať nulovú odchýlku v ustálenom stave. [6]

Integračnú zložku je vlastne možné si predstaviť ako zariadenie, ktoré automaticky resetuje posunutie  $u_b$  proporcionálnej zložky.[6]

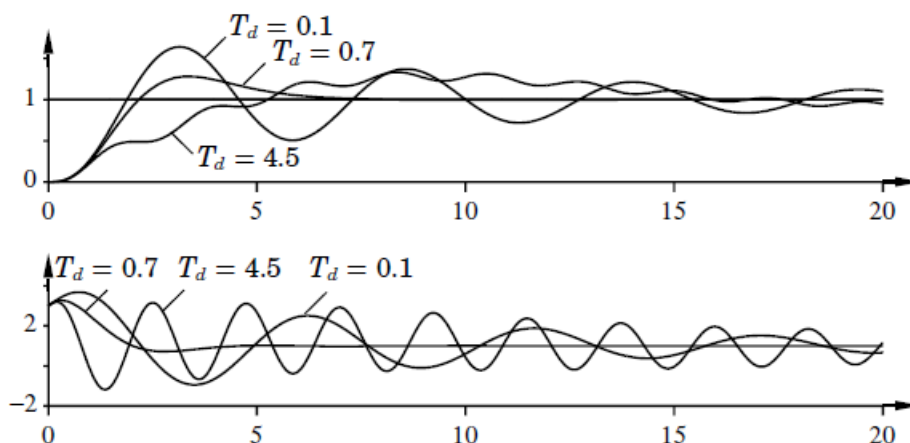
**D zložka**

Účelom derivačnej zložky je zlepšiť stabilitu spätnoväzobného systému. Mechanizmus nestability môžeme intuitívne popísať nasledovne. Kvôli dynamike systému potrvá nejaký čas, kým zmena v riadiacej veličine bude pozorovateľná na výstupe systému. To znamená, že riadiaci systém bude príliš pomalý na to, aby včas dorovnával odchýlky.[6]

Funkciu regulátoru s proporcionálnou a derivačnou zložkou môžeme popísať tak, že regulácia je proporcionálna k predpokladanému výstupu systému, pričom predpoveď získavame extrapoláciou odchýlky pomocou dotýčnice ku krivke odchýlky. Základná štruktúra PD regulátora je nasledovná[6]:

$$u(t) = K \left( e(t) + t \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.3)$$

Vlastnosti derivačnej zložky môžeme vidieť na obr. 2.2, ktorý ukazuje simuláciu systému s PID reguláciou. Zosilnenie a integračný čas sú konštantné,  $K = 3$ ,  $T_i = 2$  a derivačný čas  $T_d$  sa mení. Pre  $T_d = 0$  ide o PI reguláciu. Tento systém so zvolenými parametrami osciluje. So zväčšujúcim sa derivačným časom sa tmenie zvyšuje, avšak znova sa začne znižovať, keď derivačný čas dosiahne prívelkú hodnotu.[6]



Obr. 2.2: Simulácia spätnoväzobného systému s meniacimi sa hodnotami derivačného času  $T_d$ , ukazujúca význam derivačnej zložky v systéme [6]

**2.1.3 Inkrementálny model PID regulátoru**

Vyššie popísaný algoritmus PID regulátoru sa nazýva priamy alebo polohový (position) algoritmus, pretože jeho výstupom je riadiaca veličina. V digitálnych implementáciách je však bežné používať tiež rýchlostné (velocity) algoritmy. Diskrétna verzia takéhoto algoritmu sa nazýva inkrementálny algoritmus. Túto formu získame výpočtom časových rozdielov vo výstupe regulátora a sčítaním inkrementov. Časový rozdiel vypočítame nasledovne[6]:

$$\Delta u(t_k) = u(t_k) - u(t_{k-1}) = \Delta P(t_k) + \Delta I(t_k) + \Delta D(t_k) \quad (2.4)$$

kde  $t_k$  je okamih vzorkovania tzn. Okamih, kedy sú čítané analógové vstupy,  $\Delta u$  je zmena vo výstupe regulátora,  $u$  je výstup regulátora,  $\Delta P$  je zmena proporcionálnej zložky,  $\Delta I$  je zmena integračnej zložky a  $\Delta D$  je zmena derivačnej zložky.[6]

V niektorých prípadoch je integrácia vykonaná externe. Toto je prirodzené napríklad v prípade použitia krokového motora. Výstup regulátora by mal potom reprezentovať inkreментy riadiaceho signálu a motor implementuje integračný člen. Inkreментy proporcionálnej, integračnej a derivačnej časti je možné jednoducho vypočítať nasledujúcimi rovnicami[6]:

$$\Delta P(t_k) = P(t_k) - P(t_{k-1}) = K (br(t_k) - y(t_k) - br(t_{k-1}) + y(t_{k-1})) \quad (2.5)$$

$$\Delta I(t_k) = I(t_k) - I(t_{k-1}) = b_{i1} e(t_k) + b_{i2} e(t_{k-1}) \quad (2.6)$$

$$\Delta D(t_k) = D(t_k) - D(t_{k-1}) = a_d \Delta D(t_{k-1}) - b_d (y(t_k) - 2y(t_{k-1}) + y(t_{k-2})) \quad (2.7)$$

Kde  $P$  je proporcionálna zložka,  $I$  je integračná zložka,  $D$  je derivačná zložka,  $y$  je výstupná veličina,  $r$  je vstupná veličina a  $b$ ,  $b_{i1}$ ,  $b_{i2}$ ,  $a_d$ ,  $b_d$  sú koeficienty.[6]

Jednou z výhod inkrementálneho algoritmu je, že väčšina výpočtov je vykonávaná len pomocou inkrementov, čo znamená že tieto výpočty sú pomerne nenáročné. Presnosť je potrebná až v poslednej fáze, kedy sa inkreментy sčítavajú. Ďalšou výhodou je, že výstup regulátora je riadený priamo z integračného člena. Toto výrazne uľahčuje riešenie problémov s windupom a zmenami režimu. Nevýhodou však je, že inkrementálny algoritmus nie je možné použiť pre P a PD regulátory. Preto je v prípade nepoužitia integračnej zložky nutné vypočítať  $\Delta P$  nasledujúcim spôsobom[6]:

$$\Delta P(t_k) = K (br(t_k) - y(t_k) + u_b - u(t_{k-1})) \quad (2.8)$$

### 2.1.4 Ladenie PID regulátorov

Pre správne fungovanie PID regulátora je nutné vhodne zvoliť jeho parametre tak, aby priebeh regulácie vyhovoval stanoveným podmienkam. Ak je možné získať matematický model systému, je možné použiť rôzne metódy návrhu regulátora, ktoré splnia požadované prechodové a ustálené podmienky. Ak však z rôznych dôvodov nepoznáme matematický model sústavy, tak nie je možné použiť analytický alebo výpočtový prístup k tomuto problému. V týchto prípadoch je nutné použiť experimentálne metódy.[4]

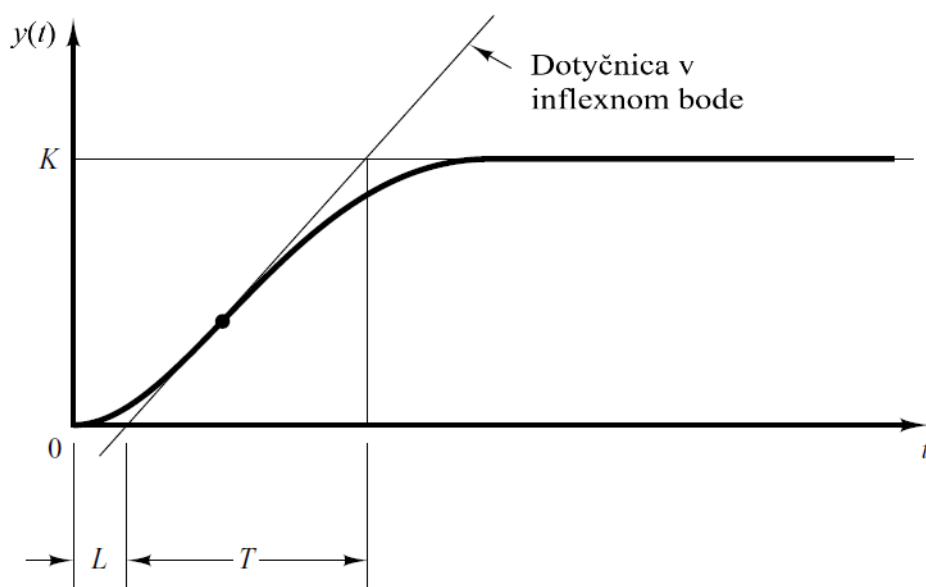
#### Metóda Ziegler-Nichols

Autori tejto metódy Ziegler a Nichols navrhli pravidlá pre ladenie PID regulátorov založené na reakcii systému na skokovú zmenu alebo na hodnote zosilnenia  $K$ , ktorej výsledkom je privedenia systému na hranicu stability, za použitia len proporcionálnej zložky. Za pomoci týchto pravidiel je možné navrhnúť hodnoty  $K$ ,  $T_i$  a  $T_d$ , ktoré zaručia stabilnú prevádzku systému. Výsledný systém však môže vykazovať veľký overshoot. V týchto prípadoch je nutné opakované jemné doladovanie až do dosiahnutia akceptovateľného vý-

sledku. Tieto pravidlá poskytujú skôr počiatočnú hodnotu pre jemné doladovanie, než definitívne hodnoty  $K$ ,  $T_i$  a  $T_d$ . Existuje prvá a druhá metóda Ziegler-Nichols.[4]

### Prvá metóda

V prvej metóde je experimentálne získaná reakcia systému na jednotkový skok. Túto metódu je možné použiť v prípadoch, kedy má táto reakcia tvar „S“. Túto reakciu možno vytvoriť experimentálne alebo dynamickou simuláciou systému. „S“ krivku možno charakterizovať dvomi konštantami, oneskorením  $L$  a časovou konštantou  $T$ . Tieto konštanty sa určujú zostrojením dotyčnice v inflexnom bode krivky a určením jej priesečníkov s časovou osou a čiarou  $y(t) = K$ . [4]



Obr. 2.3: „S“ krivka získaná reakciou systému na jednotkový skok s označenými charakterizujúcim oneskorením  $L$  a časovou konštantou  $T$  [4]

Prenosovú funkciu potom môžeme aproximovať systémom prvého rádu s oneskorením nasledovne[4]:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (2.9)$$

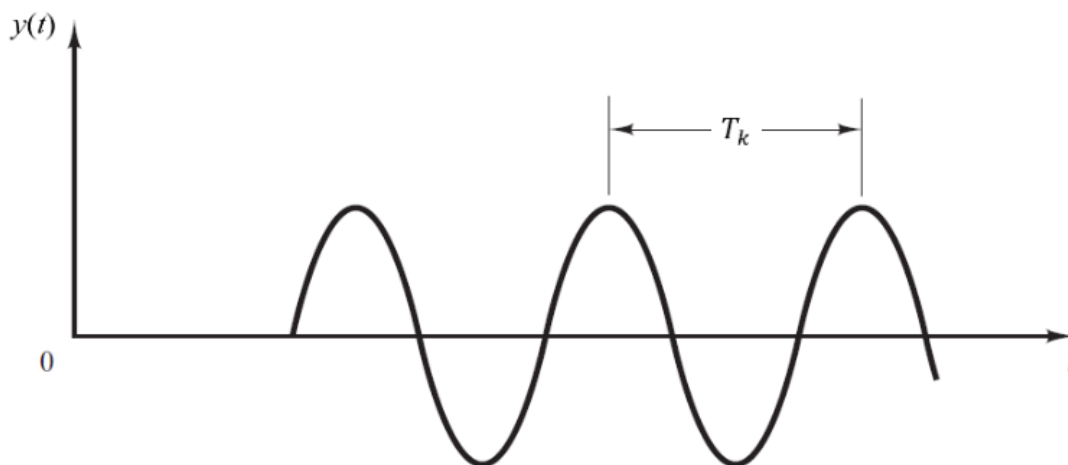
Hodnoty  $K$ ,  $T_i$  a  $T_d$  sa potom určia podľa tabuliek ako funkcie parametrov  $T$  a  $L$ .

### Druhá metóda

V druhej metóde najprv vyradíme integračnú a derivačnú zložku tým, že položíme  $T_i = \infty$  a  $T_d = 0$ . Za použitia len proporcionálnej zložky potom zvyšujeme zosilnenie  $K$  od 0 do kritickej hodnoty  $K_k$ , kedy výstup dosiahne oscilácie so stálou amplitúdou ako možno vidieť na obr. 2.4. Takto experimentálne zistíme hodnoty kritickeho zosilnenia  $K_k$



a kritickej periódy  $T_k$ . Následne nastavíme hodnoty parametrov  $K$ ,  $T_i$  a  $T_d$  podľa tabuliek ako funkcie  $K_k$  a  $T_k$ . [4]



Obr. 2.4: Netlmená oscilácia systému pri kritickom zosilnení s označenou periódou  $T_k$  [4]

### Optimalizačné metódy

Optimalizácia je veľmi mocným nástrojom na návrh regulátorov. Koncept tejto metódy je jednoduchý. Najprv je nutné špecifikovať štruktúru regulátora s parametrami. Požiadavky sú vyjadrené rôznymi váhami funkcií parametrov. Najdôležitejšia požiadavka je potom zvolená ako funkcia na optimalizáciu. Táto technika sa dobre hodí pre PID regulátory, kde je daná ich štruktúra a parametrizácia.[7]

Existuje však niekoľko nástrah, ktorým sa treba pri použití tejto techniky vyhnúť. Je nutné opatrne voľiť kritériá a obmedzenia, pretože inak a môže stať, že nami zvolený parameter bude naozaj optimálny, avšak regulátor nebude vyhovovať našim požiadavkám kvôli zlej formulácii kritérií. Ďalšou nevýhodou je, že funkcia vyjadrujúca blízkosť regulátora k optimálnemu výsledku môže mať veľa lokálnych miním, ktoré nám neumožnia nájsť globálne minimum.[7]

Užitočným spôsobom využitia optimalizácie je počiatočné získanie približných hodnôt metódou Ziegler-Nichols a následné zlepšenie parametrov pomocou optimalizácie. Jedným z najjednoduchších spôsobov je požiť software schopný simulovať a analyzovať prechodové deje ako napríklad MATLAB. Stačí nám potom vytvoriť určitý interval v okolí parametrov získaných metódou Ziegler-Nichols a s vhodne zvolenou veľkosťou kroku postupne prechádzať tieto intervaly a ukladať údaje o vlastnostiach prechodovej funkcie, ktoré nás zaujímajú. Následne na konci cyklu stačí vybrať kombináciu parametrov, ktorá najlepšie vyhovuje našim podmienkam. Existujú samozrejme aj sofistikovanejšie metódy ako napríklad evolučné metódy a metódy návrhu pomocou neurónových sietí. [4]

### Návrh regulátora v priestore stavov

Myšlienka stavového priestoru pochádza z metódy popisu diferenciálnych rovníc pomocou stavových premenných. V tejto metóde sú diferenciálne rovnice, ktoré popisujú systém or-

ganizované ako sústava diferenciálnych rovníc prvého rádu vo vektorovom stave systému a riešenie je zobrazené ako trajektória tohto vektoru v priestore. Pri návrhu touto technikou pracujeme priamo s popisom systému pomocou stavových premenných.[8]

V tejto metóde, podobne ako v niektorých iných určujeme polohu pólov prechodového deja, aby sme dostali vhodnú odozvu. Na rozdiel od iných nám však táto metóda umožňuje určiť všetky póly v systémoch vyšších rádo. Frekvenčné metódy toto neumožňujú, pretože nedovoľujú potrebné množstvo neznámych parametrov na to, aby bolo možné umiestiť každý pól zvlášť. Metódy v priestore stavov nám toto umožňujú, pretože zavádzajú potrebné parametre a techniky ich hľadania.[5]

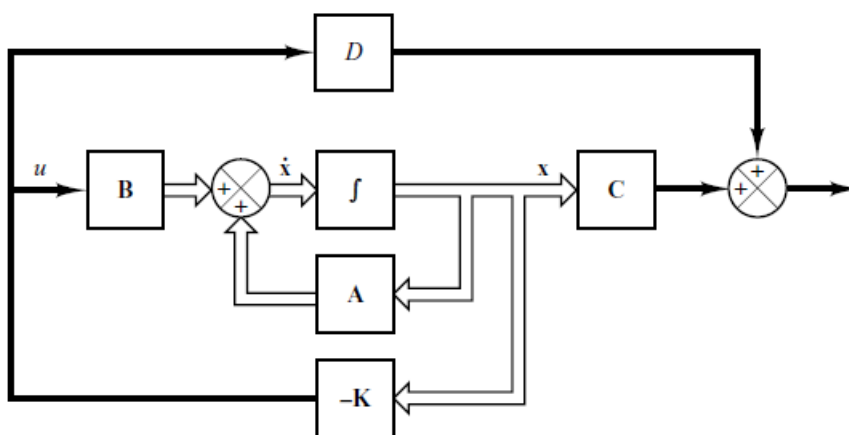
Na rozdiel od frekvenčných metód, táto technika neumožňuje určiť umiestnenie núl systému. Toto môžeme považovať za nevýhodu, keďže pozícia núl ovplyvňuje prechodový dej. Taktiež systémy navrhnuté týmto spôsobom môžu byť veľmi citlivé na zmenu parametrov. [5]

Systém možno v stavovom priestore popísať nasledovne[4]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u\end{aligned}\quad (2.10)$$

kde  $\mathbf{x}$  je stavový vektor,  $y$  je výstupný signál,  $u$  je riadiaci signál,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  sú matice konštant a  $\mathbf{D}$  je konštanta[4].

Volbou riadiaceho signálu  $u = -\mathbf{K}\mathbf{x}$  dosiahneme, že tento signál bude určený okamžitým stavom. Matica zosilnenia  $\mathbf{K}$  má rozmery  $1 \times n$ , pričom  $n$  je počet stavov. Toto znamená, že do spätnej väzby dostávame nielen výstup, ale všetky stavy a dokážeme tak presnejšie upravovať riadiaci signál, aby sme sa dostali na požadovanú hodnotu. Tento systém môžeme znázorniť schémou na obr. 2.5. [4]

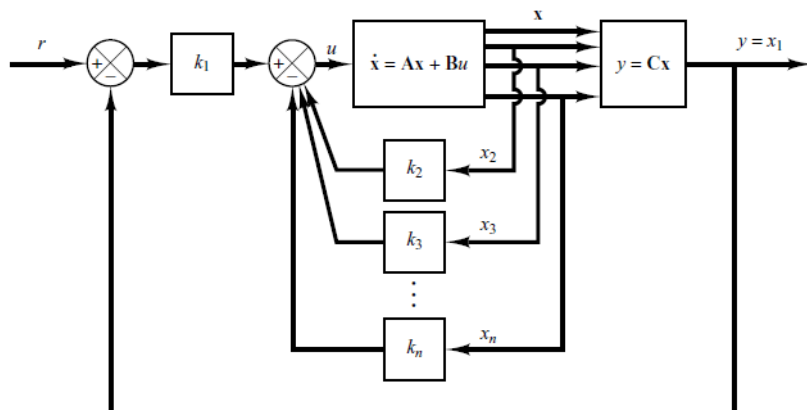


Obr. 2.5: Bloková schéma stavového kompenzátoru

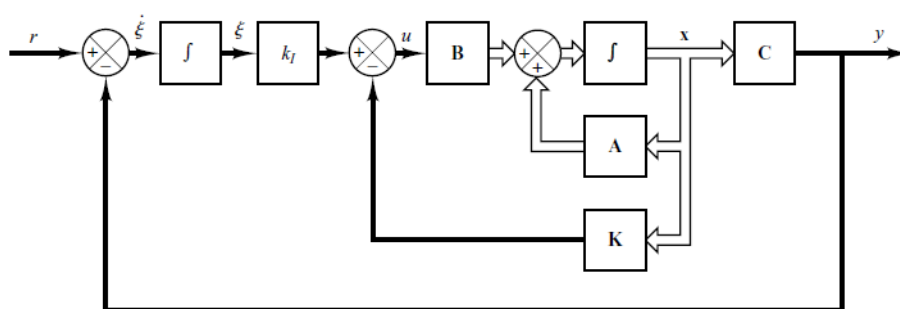
Tento systém nemá žiaden vstup, len sa stará o to, aby bol výstup udržiavaný na nule aj v prípade vonkajších rušivých podnetov. [4]

Vo väčšine systémov však chceme regulovať veličinu na rôzne hodnoty. V tomto prípade musíme na návrh použiť schému na obr. 2.6 pre systém s jedným vstupom a výstupom, ktorý obsahuje integrátor a schému na obr. 2.7 pre systém s jedným vstupom a jedným

výstupov, ktorý neobsahuje integrátor.



Obr. 2.6: Bloková schéma stavového servo systému typu 1 pre sústavu s integrátorom



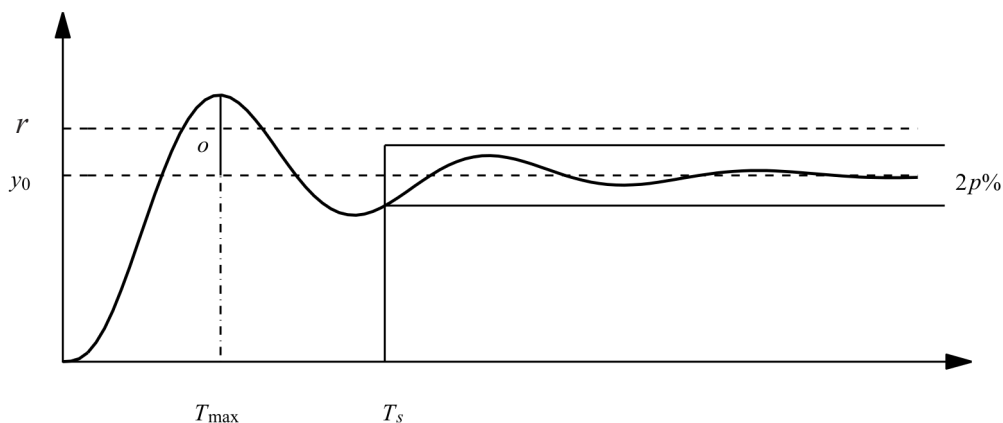
Obr. 2.7: Bloková schéma stavového servo systému typu 1 pre sústavu bez integrátora

### 2.1.5 Požiadavky na reguláciu

Aby sme vedeli správne navrhnuť regulátor, potrebujeme v prvom rade poznať požiadavky, ktoré musíme splniť. Existujú rôzne kritériá, podľa ktorých môžeme regulátor ohodnotiť. Jedným z nich je reakcia na zmenu setpointu. [7]

Údaje o tom, ako systém reaguje na zmenu referenčnej hodnoty (setpointu) sa bežne zobrazujú v časovej doméne. Môžu obsahovať požiadavky na čas nábehu (rise time), čas do ustálenia  $T_s$  (settling time), čas do dosiahnutia vrcholu  $T_{max}$  (peak time) overshoot o a odchýlku v ustálenom stave. Tieto údaje môžeme vidieť na obr. 2.8. [7]

Vzhľadom na povahu problému bude v našom prípade najdôležitejšia stabilita a čo najmenšia odchýlka v ustálenom stave. Druhoradý je potom čas do ustálenia. Keďže je dôležitá dlhodobá stabilita a čo najväčšia presnosť, bude kladený dôraz aj na to, aby nevznikal príliš veľký šum. Pri návrhu riadenia teplotnej komory je teda potrebné zväžiť tieto požiadavky a na základe nich postupovať s návrhom vhodného regulátora.

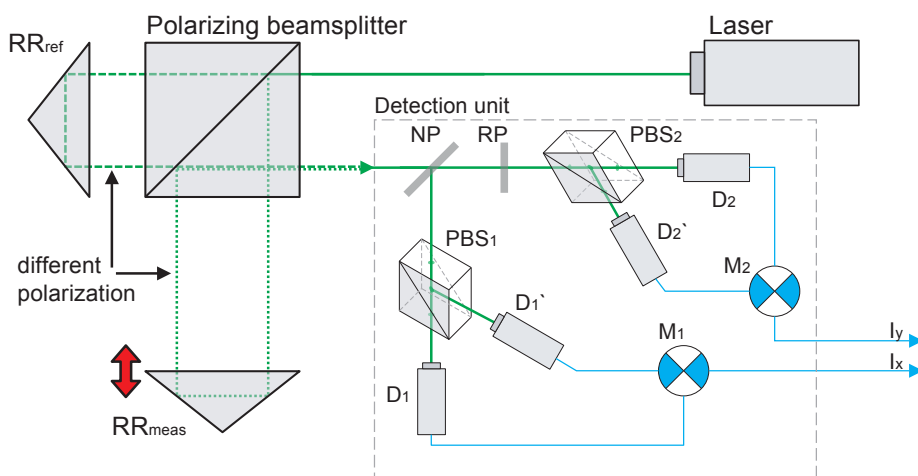


Obr. 2.8: Reakcia systému na zmenu setpointu s označeným časom dosiahnutia vrcholu  $T_{max}$ , časom do ustálenia  $T_s$ , setpointom  $r$  a skutočnou hodnotou v ustálenom stave  $y_0$

## 2.2 Interferometria

Interferometria je metóda merania využívajúca jav interferencie vln (svetelných, rádiových alebo zvukových). Merania môžu zahŕňať merania určitých vlastností samotných vln a materiálov, s ktorými vlny interagujú. Okrem toho sa interferometria používa na opis techník, ktoré využívajú svetelné vlny na štúdium zmien posunu. Táto interferometria na meranie posunov sa vo veľkej miere používa na kalibráciu a riadenie pohybu mechanického stupňa pri presnom obrábaní.[9]

Použitím dvoch svetelných lúčov (zvyčajne rozdelením jedného lúča na dva, ako je zobrazené na obr. 2.9) možno vytvoriť interferenčný obrazec, keď sa tieto dva lúče superponujú. Keďže vlnová dĺžka viditeľného svetla je veľmi krátka, možno zistiť malé zmeny v rozdieloch optických dráh (prejdenej vzdialenosti) medzi oboma lúčmi (keďže tieto rozdiely spôsobia viditeľné zmeny v interferenčnom vzore). Preto je optická interferometria už viac ako sto rokov cennou meracou technikou. Jej presnosť sa neskôr zlepšila vynájdением laserov.[9]



Obr. 2.9: Schéma jednoduchého interferometra [10]

### 2.2.1 Aplikovaná interferometria

Na generovanie interferenčného obrazca s vysokou presnosťou je veľmi dôležité mať jeden vysoko stabilný zdroj vlnovej dĺžky. Príkladom komerčného systému, ktorým je toto možné dosiahnuť je laserový systém XL-80 (viz. obr. 2.10).[9]

V laserovom systéme XL-80 sú dve zrkadlá retroreflektormi (hranoly, ktoré odrážajú dopadajúce svetlo späť v smere rovnobežnom so smerom, z ktorého prichádza). Jedno z nich je pripojené k rozdeľovaču lúčov, ktorý tvorí referenčné rameno. Druhý retroreflektor tvorí meracie rameno s premenlivou dĺžkou, pretože jeho vzdialenosť sa mení vzhľadom na rozdeľovač lúčov.[9]

Laserový lúč vychádza z laserovej hlavy XL-80 a na polarizačnom rozdeľovači lúča sa rozdelí na dva lúče (odrazený a vyslaný). Tieto lúče sa odrazia od dvoch retroreflektorov, znova sa spoja v rozdeľovači lúčov a potom sa dostanú do detektora. Použitie retroreflektorov zabezpečuje, že lúče vychádzajúce z referenčného a meracieho ramena sú pri vzájomnej rekombinácii v rozdeľovači lúčov rovnobežné. Rekombinované lúče sa dostanú do detektora, kde sa navzájom interferujú buď konštruktívne, alebo deštruktívne. Počas konštruktívnej interferencie sú oba lúče vo fáze a vrcholy oboch lúčov sa navzájom zosilňujú, čo vedie k jasnému okraju, zatiaľ čo počas deštruktívnej interferencie sú lúče mimo fázy a vrcholy jedného lúča sa rušia spodkami druhého lúča, čo vedie k tmavému okraju.[9]

Bez ohľadu na to, aká dobrá je laserová jednotka (t. j. aká je presná a „stabilná“), presnosť lineárnych pozičných meraní závisí od presnosti, s akou je známa vlnová dĺžka laserového lúča. Pracovná vlnová dĺžka laserového lúča závisí od indexu lomu vzduchu, ktorým prechádza, a ten sa mení v závislosti od teploty, tlaku a relatívnej vlhkosti vzduchu. Vlnová dĺžka lúča sa preto musí meniť (kompenzovať), aby sa zohľadnili všetky zmeny týchto parametrov.[9]



Obr. 2.10: Laser XL-80 [11]

## 2.3 CANopen

Protokol CANopen je komplexný komunikačný systém určený pre automatizačné siete, ktorý implementuje celý rad identifikátorov komunikačných objektov CANopen (COB), ktoré obsahujú jedinečný identifikátor CAN a riadiace bity. Tieto COB sú komunikované špecifickou bitovou rýchlosťou protokolu CANopen, čo umožňuje efektívny prenos údajov v sieti. [12]

CANopen podporuje rôzne funkcie riadenia siete vrátane stráženia uzlov (node guarding) a srdcových tepov (heartbeat), čím zabezpečuje konzistentnú a spoľahlivú komunikáciu medzi rôznymi zariadeniami v sieti. Umožňuje tiež synchronný a asynchrónny prenos údajov, čím poskytuje flexibilitu v spôsobe zdieľania a spracovania údajov. [12]

Protokol CANopen umožňuje vyhnúť sa riešeniu problémov špecifických pre CAN, ako je správne načasovanie správ. To sa dosahuje zavedením štandardných komunikačných objektov: PDO (Process Data Objects) pre časovo kritické údaje (v reálnom čase), SDO (Service Data Objects) pre konfiguračné správy a ďalšie pre špeciálne funkcie (časovanie, synchronizácia a núdzové situácie) a pre sieťové služby (reštart zariadenia, správa siete a chybové správy).[13]

V tejto práci je využitý preto, že ide o zaužívaný protokol na pracovisku koherenčnej optiky ÚPT, kde je využívaný na integráciu heterogénnych komponentov do zložitejších celkov. Jeho využitie pre prenos údajov medzi do komory a z nej bolo preto jednou z podmienok.

### 2.3.1 Základy fungovania CANopen

#### Slovník objektov

Komunikačné objekty sú zahrnuté v tzv. slovníku objektov uloženom v zariadení, ktoré je súčasťou siete. Slúži ako rozhranie medzi samotným zariadením a aplikačným programom. Všetky komunikačné objekty relevantné pre konkrétne zariadenie sú popísané v slovníku objektov predpísaným spôsobom v pevne stanovenom formáte. Každý komunikačný objekt je prístupný prostredníctvom 16-bitového indexu, v prípade objektov ktoré sú zložené z niekoľkých ďalších objektov doplneného 8-bitovým subindexom. [13]

Všetky komunikačné objekty prítomné vo všetkých zariadeniach v sieti CANopen sú v objektovom slovníku uložené pod rovnakými indexmi. To isté platí pre všetky komunikačné objekty tvoriace tzv. štandardný profil zariadenia[13].

Objektový slovník obsahuje aj rezervované indexy na umiestnenie špecifických informácií, ktoré poskytujú jednotliví výrobcovia typu zariadenia. [13]

#### Formát správ v CANopen

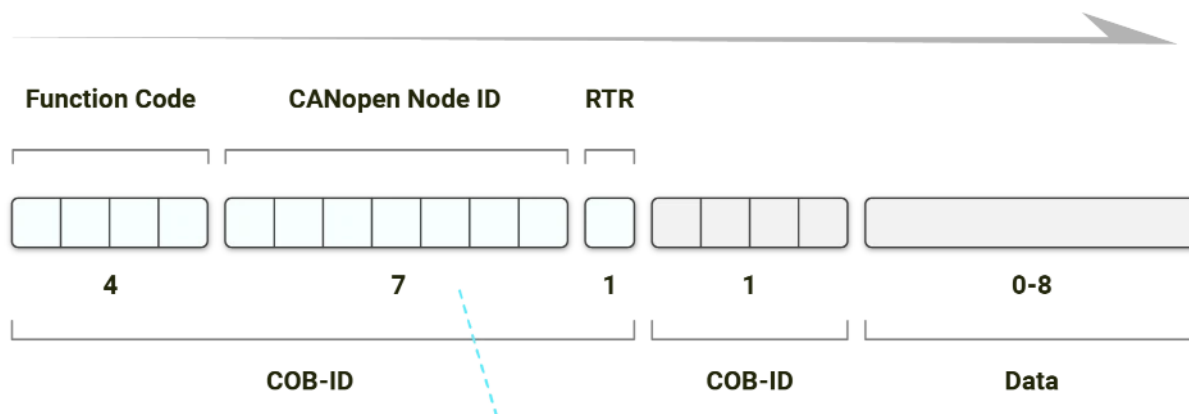
Formát správy rámca CANopen je založený na štruktúre rámca CAN, ktorý je kľúčovým aspektom protokolu CAN .

**Štruktúra rámca CAN:** V protokole CAN sa prenos údajov uskutočňuje prostredníctvom rámcov. Tieto rámce sa skladajú buď z 11-bitového, alebo 29-bitového identifikátora CAN, riadiacich bitov (vrátane bitu vzdialeného prenosu (RTR), štartovacieho bitu a 4-bitového pola dĺžky údajov), po ktorých nasledujú užitočné dáta v rozsahu 0 až 8 bajtov [12]. Túto štruktúru možno vidieť na obr. 2.11.

**COB-ID:** Ide o štruktúru, ktorá kombinuje identifikátor CAN a riadiace bity. Tento identifikátor zohráva kľúčovú úlohu pri definovaní typu správy a jej smerovania v rámci siete. [12]

**Segmentácia CAN ID:** V systéme CANopen je 11-bitové CAN ID rozdelené na dva odlišné segmenty: 4-bitový kód funkcie(function code) a 7-bitové ID uzla CANopen (CANopen node ID).[12]

**Obmedzenie uzlov:** Použitie 7-bitového ID uzla prirodzene obmedzuje počet uzlov v sieti CANopen na 127. Toto obmedzenie je dôležité na zachovanie spravovateľnosti siete a zabezpečenie jedinečnej identifikácie každého uzla. [12]



Obr. 2.11: Štruktúra rámca CANopen [12]

## Funkčné protokoly

### Protokol PDO

Komunikačné objekty nesúce technologické dáta (Process Data Objects - PDO) sa prenášajú v jednej správe CAN s použitím všetkých ôsmich bajtov v poli užitočných dát. Každý PDO objekt musí mať jedinečný identifikátor CAN a môže ho prenášať len jeden uzol siete, pričom môže byť prijatý ľubovoľným počtom zariadení. Ide teda o komunikačnú metódu známou ako pôvodca/spotrebiteľ (producer/consumer). Prenos správy PDO môže byť iniciovaný vnútornou udalosťou, interným časovačom, požiadavkami iných zariadení v sieti alebo prijatím synchronizačnej správy.[13]

### Protokol SDO

Objekty nesúce servisné dáta (Service Data Objects - SDO) alebo servisné objekty (SDO) umožňujú čítať a zapisovať jednotlivé položky slovníka objektov. Protokol pre prenos SDO umožňuje prenášať objekty ľubovoľnej dĺžky (ak je objekt dlhší ako štyri bajty, rozdelí sa na niekoľko správ CAN nazývaných segmenty alebo skupiny správ CAN nazývané bloky). Prvý bajt prvého segmentu obsahuje bity potrebné na komunikáciu a ošetrovanie chýb rámca SDO. Nasledujúce tri bajty obsahujú index a subindex položky slovníka objektov, ktorá je čítaná alebo zapisovaná. Zostávajúce štyri bajty sú k dispozícii na prenos užívateľských údajov. Druhý a nasledujúce segmenty (správy CAN s rovnakým identifikátorom CAN) obsahujú bajt riadiaci komunikáciu, po ktorom nasleduje až sedem

bajtov užívateľských údajov. Prijemca segmentu alebo bloku segmentov musí signalizovať jeho prijatie odpoveďou, takže komunikácia SDO je potvrdzovaná, typu peer-to-peer (klient/server).[13]

## Protokol NMT

Objekt NMT (Network Management) patrí medzi obejtky pre správu siete. Je reprezentovaný jedinou kanálom CAN. Každá NMT správa obsahuje dva bajty dát. Identifikátor tejto správy je 0, čo znamená najväčšiu prioritu v sieti CAN. Prvý dátový bajt správy obsahuje príkaz a druhý adresu zariadenia, ktorého sa príkaz týka. NMT objekt vyslaný riadiacim zariadením v sieti nastavuje jednotlivé uzle v sieti do požadovaného stavu. Stavový model zariadení komunikujúcich podľa protokolu CANopen obsahuje tieto stavy: inicializácia (Initialization), predprevádzkový (Pre-operational), prevádzkový (Operational) a zastavený (Stopped).[13]

### 2.3.2 CANopen v rámci modelu OSI

V rámci modelu OSI CANopen zohráva úlohu protokolu vyššej vrstvy postaveného na zbernici CAN (viz. obr. 2.12). Systém zbernice CAN pokrýva prvé dve úrovne modelu OSI, zatiaľ čo CANopen rozširuje tento rámec na vyššie vrstvy, pričom integruje kľúčové normy a špecifikácie CiA (CAN in Automation) a ISO (Medzinárodná organizácia pre normalizáciu) [12].

**Sieťová vrstva:** Táto vrstva je zodpovedná za adresovanie a smerovanie, čím zabezpečuje správne smerovanie údajov v sieti [12]

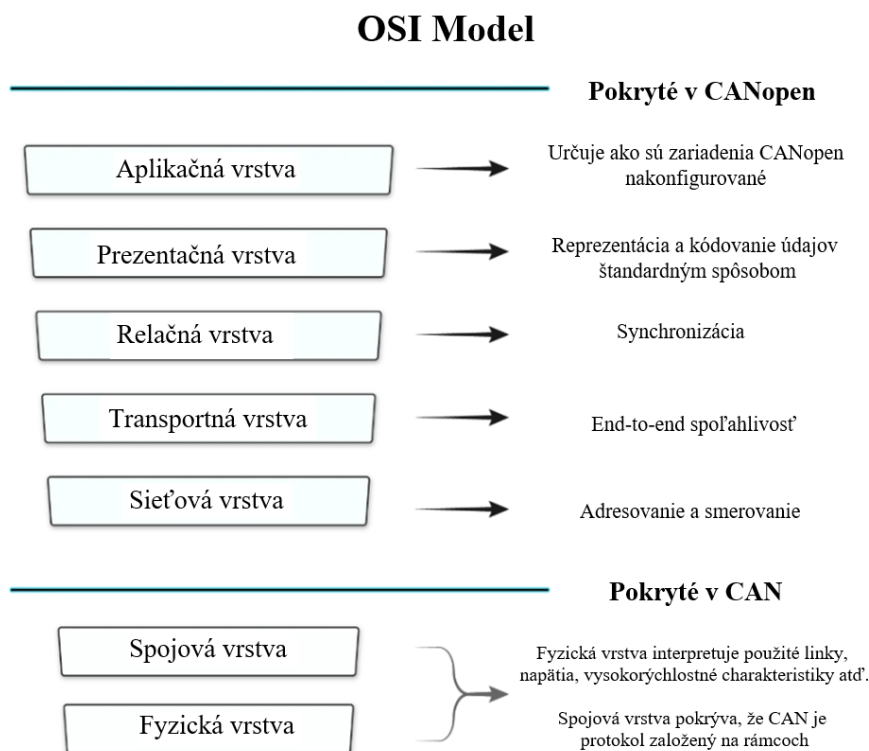
**Transportná vrstva:** Zabezpečuje spoľahlivosť prenosu dát od konca do konca, riadi integritu a sekvenciu dátových paketov [12].

**Reťazová vrstva (CiA 303-1):** Táto vrstva zabezpečuje synchronizáciu, koordináciu komunikačných relácií medzi zariadeniami [12].

**Prezentačná vrstva (CiA 303-2):** Štandardizuje kódovanie a reprezentáciu údajov, čím zabezpečuje, aby boli údaje univerzálne zrozumiteľné v rôznych systémoch [12].

**Aplikačná vrstva (CiA 401, 402, ...):** Najvyššia vrstva, kde CANopen špecifikuje, ako sa konfigurujú zariadenia, prenášajú údaje a synchronizujú činnosti [12].





Obr. 2.12: CANopen v rámci modelu OSI [12]

### 2.3.3 Implementácia CANopen pre vedeckú inštrumentáciu (ÚPT)

Implementácia CANopen na ÚPT sa odlišuje od štandardu. Sú tu využívané softwarové rozšírenia nad protokolom TCP/IP a rôzne hardwarové komponenty, ktoré umožňujú toto využitie.

#### Hardwarové komponenty

Medzi hardwarové komponenty patria drivery s CAN, CAN bridge a prevodník USB2CAN umožňujúci predávať dáta z can do počítača pomocou USB.

#### Softwarové komponenty

Program NETCANS (viz. obr. 2.13) slúži na spracovanie údajov privedených z CAN do počítača cez prevodník.

Program CANman (viz. obr. 2.14) umožňuje pristupovať k údajom z CAN spracovateľným pomocou NETCANS. Je možné ho použiť na zobrazovanie prijatých údajov, odosielanie údajov do zariadení a taktiež na záznam prijatých údajov v čase. Funkcia záznamu bola používaná aj pri meraniach pre potreby tejto práce.

Program KANAL (viz. obr. 2.15) možno využiť na export dát, ktoré boli zaznamenané pomocou funkcie záznamu v programe CANman. Pri exporte je možné vybrať údaje,

```

NETCANS
File About
CANNET DataServer 1.0.0.0 (supported clients: CW LW OC XPort TN CAN-USB)
0 127.0.0.1:[59216] OCclient FICIR FICIT 324890RXp 2117166TXp 5190256RXc 33874656TXc Offs=0
1 127.0.0.1:[54561] OCclient FICIR FICIT 251076RXp 12084757TXp 4017216RXc 193356112TXc Offs=0
2 not connected
3 not connected
4 not connected
5 not connected
6 not connected
7 not connected
8 not connected
9 not connected
10 not connected
11 not connected

CAN-USB: 187e978e7RXp 19815898TXp 1501582936RXc 158527184TXc Offs=0

00395:f2 c4 4f 01 38 97 fd ff s:7000 c:77496587 t:00 ts:000 default
00651:00 00 00 00 00 00 01 00 s:7000 c:77496590 t:00 ts:000 default
00395:f2 c4 4f 01 38 97 fd ff s:7000 c:77496587 t:00 ts:000 default
00651:00 00 00 00 00 00 01 00 s:7000 c:77496590 t:00 ts:000 default
00395:f2 c4 4f 01 38 97 fd ff s:7000 c:77496587 t:00 ts:000 default
00651:00 00 00 00 00 00 01 00 s:7000 c:77496590 t:00 ts:000 default
00523:4b 8b fd ff 00 01 01 00 s:5000 c:19815899 t:00 ts:000 default
00406:9a 55 dd 58 e4 55 00 00 s:7000 c:15618599 t:00 ts:000 default
00662:9e 56 47 26 a5 00 a4 0f s:7000 c:15618600 t:00 ts:000 default
00395:f2 c4 4f 01 38 97 fd ff s:7000 c:77496587 t:00 ts:000 default
00651:00 00 00 00 00 00 01 00 s:7000 c:77496590 t:00 ts:000 default
00395:f2 c4 4f 01 38 97 fd ff s:7000 c:77496587 t:00 ts:000 default
CRC Errors: 0

```

Obr. 2.13: Snímka obrazovky programu NETCANS

CANman - CANopen Configuration Utility 2.252 (04/2020)

Open File | Check Network | Network | SDO Editor | LSS/LMT | Exit

CAN Network: Ready (Failed) komora.can 127.0.0.1:50102

Ct MarkRx	0	Ct MarkTx	0
Ct PacketRx	12097760	Ct PacketTx	0
Ct CharRx	193564160	Ct CharTx	4021520
Ct Restarts	0	Ct Dummy	0
Ct TimeDiff	2554	Ct TimeLast	0
Ct PktRx/s	121	Ct WhoCares	64

Objects:  PDD  STMP  
 Values  SDD  LSSM  
 Tx  NMT  Unknown  
 Rx  EMCY  SYNC

NMT Control: #11 - tregxn.cob: active on PDD Spymode OFF

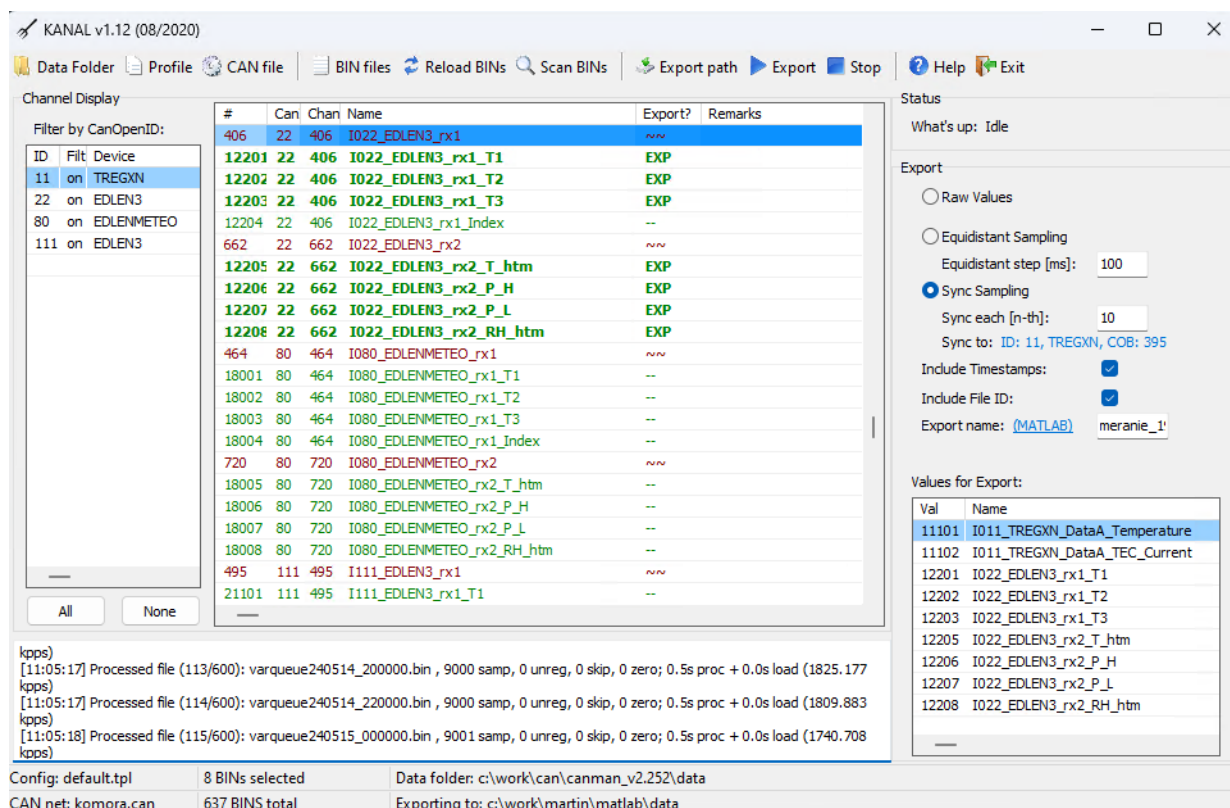
Operational | Pre-Operational | Stopped | Reset Node | Reset Communicat

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127

Name	Dir	Type	Count	Data	CAN	Ch#
50 #11 (TREGXN_DataA)	rx	DOMAIN	5023869	76b64f01ac46feff	PDO	395
51 I011_TREGXN_DataA_Temperature	rx	INTEGER32	5023869	22001270	PDO	11101
52 I011_TREGXN_DataA_TEC_Current	rx	INTEGER32	5023869	-112980	PDO	11102
53 #11 (TREGXN_DataB)	tx	DOMAIN			PDO	523
54 I011_TREGXN_DataB_MUX_Temp_Curr	tx	INTEGER32			PDO	11103
55 I011_TREGXN_DataB_SW_Temperatur	tx	UNSIGNED8			PDO	11104
56 I011_TREGXN_DataB_SW_Current	tx	UNSIGNED8			PDO	11105
57 I011_TREGXN_DataB_SW_Drive	tx	UNSIGNED8			PDO	11106
58 I011_TREGXN_DataB_SW_Lock	tx	UNSIGNED8			PDO	11107
59 #11 (TREGXN_DataC)	rx	DOMAIN	5023869	0000000000000100	PDO	651
60 I011_TREGXN_DataC_F_Drive	rx	BOOLEAN	5023869	1	PDO	11108
61 I011_TREGXN_DataC_F_ZN_Process	rx	BOOLEAN	5023869	0	PDO	11109
62 I011_TREGXN_DataC_F_ZN_Ready	rx	BOOLEAN	5023869	0	PDO	11110
63 I011_TREGXN_DataC_F_Lock_Status	rx	BOOLEAN	5023869	0	PDO	11111
64 I011_TREGXN_DataC_F_Loop_Closed	rx	BOOLEAN	5023869	0	PDO	11112

Obr. 2.14: Snímka obrazovky programu CANman

ktoré majú byť uložené a taktiež vzorkovaciu frekvenciu.



Obr. 2.15: Snímka obrazovky programu KANAL

## Integrácia

Prístup k sieti CAN cez C/C++ program umožňuje CANUSB32 API. Následne je možné s dátami pracovať pomocou knižnice CanMaster, ktorá obsahuje funkcie na prijímanie a vysielanie PDO a SDO paketov a zapisovanie položiek do slovníka objektov.

PDO komunikácia je využívaná na prijímanie dát zo senzorov na zariadeniach (teplota vzduchu v komore) a taktiež odosielanie dát do zariadení (prúd do driveru peltierových článkov). Ide teda o veľmi podstatnú časť komunikácie pre riadenie.

SDO komunikácia zabezpečuje prístup k vstupom v slovníku objektov, ich vytváranie a úpravy.

Registre ODREG obsahujú rôzne premenné, napríklad veľkosti jednotlivých zložiek PID regulátora, premenné prijaté a posielané cez PDO a podobne. Veľkou výhodou je, že je vďaka nim vyriešené ukladanie a načítavanie parametrov pri reštartovaní programu.

Súbory COB slúžia na nastavenie konkrétneho uzla v sieti CAN. Je v nich určené ID, názov, frekvencia a obsah jednotlivých PDO a SDO objektov. Popis jedného objektu potom vyzerá nasledovne:

```
[OBJECT1]
ID=250
GROUP=1
NAME=DataA
MOS_ID=384
ENABLED=rx
LENGTH=8
FREQ=500
ENDIAN=12345678
VALUES=2
  VALUE01    =    INTEGER32,    00, Temperature, %8d [LSB]
  VALUE02    =    INTEGER32,    32, TEC_Current, %8d [LSB]
```

Súbory EDS slúžia na nastavenie vstupov do slovníka objektov pri spustení programu. Zápis jedného vstupu do slovníka objektov potom vyzerá nasledovne:

```
[2000]
ParameterName=01:Pcomponent TC [A/K]
ObjectType=0x7
DataType=0x0008
LowLimit=
HighLimit=
AccessType=rw
DefaultValue=1.1600
PDOMapping=0
ObjFlags=0x0
```

## 2.4 Súčasná realizácia teplotnej komory

Rám komory je tvorený z hliníkových profilov 30x30 mm, do ktorej je zasunutá preglejka, tvoriaca vonkajšiu stenu. Izolácia je zabezpečená plátni z polyetylénovej peny. Vo vnútri komory je umiestnený optický breadboard, slúžiaci na umiestnenie meracích prístrojov.[2]

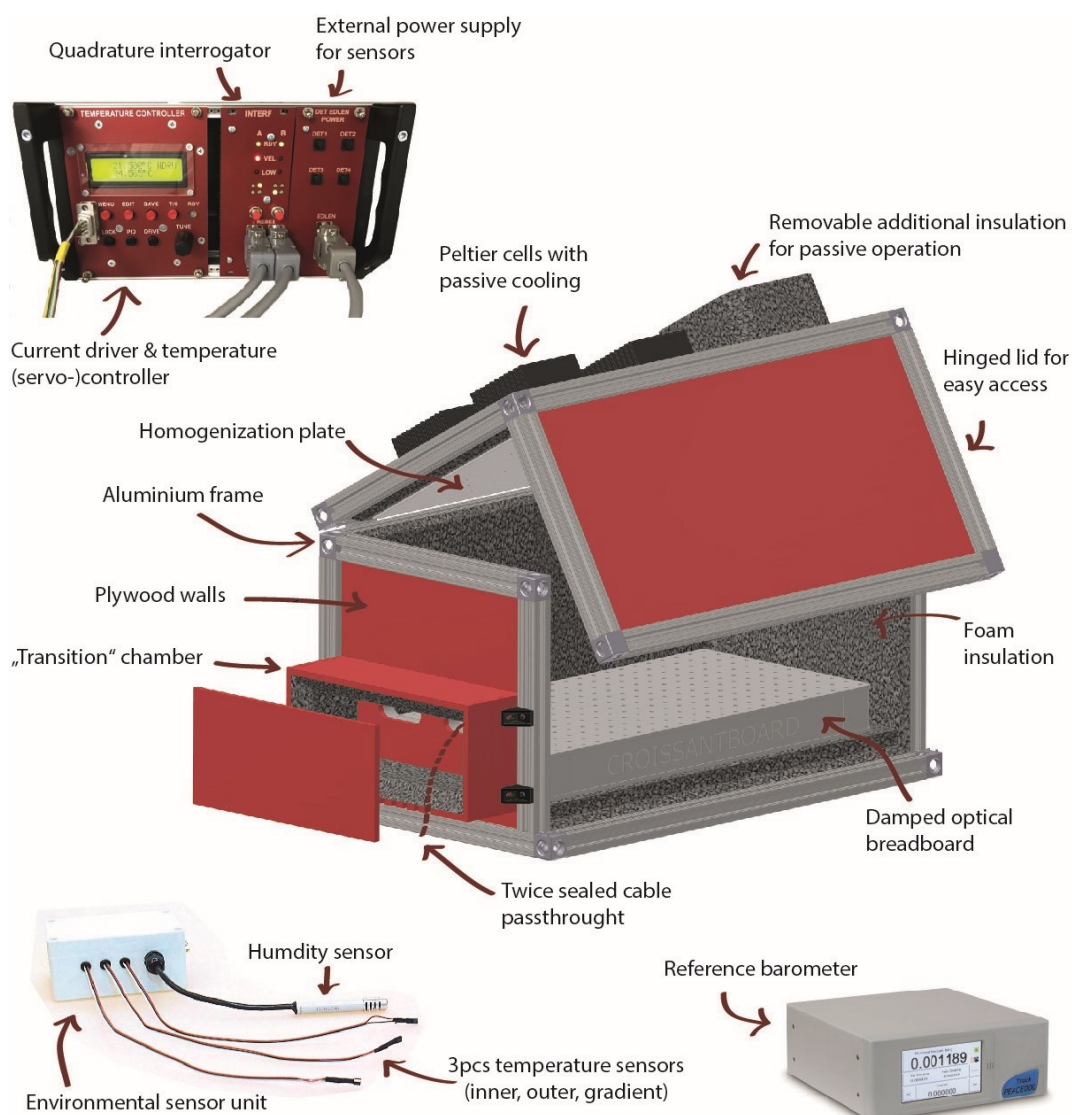
Teplota je riadená pomocou 6ks peltierových článkov umiestnených na vrchnej stene komory. S článkami je z vnútornej strany termálne spojená hliníková homogenizačná platňa a z vonkajšej strany medené prechodky, na ktorých sú umiestnené pasívne chladiče.

Na miesta, kde sa nachádzajú peltierové články je v prípade potreby možné pridať ďalšiu izoláciu, pre pasívne použitie komory.[2]

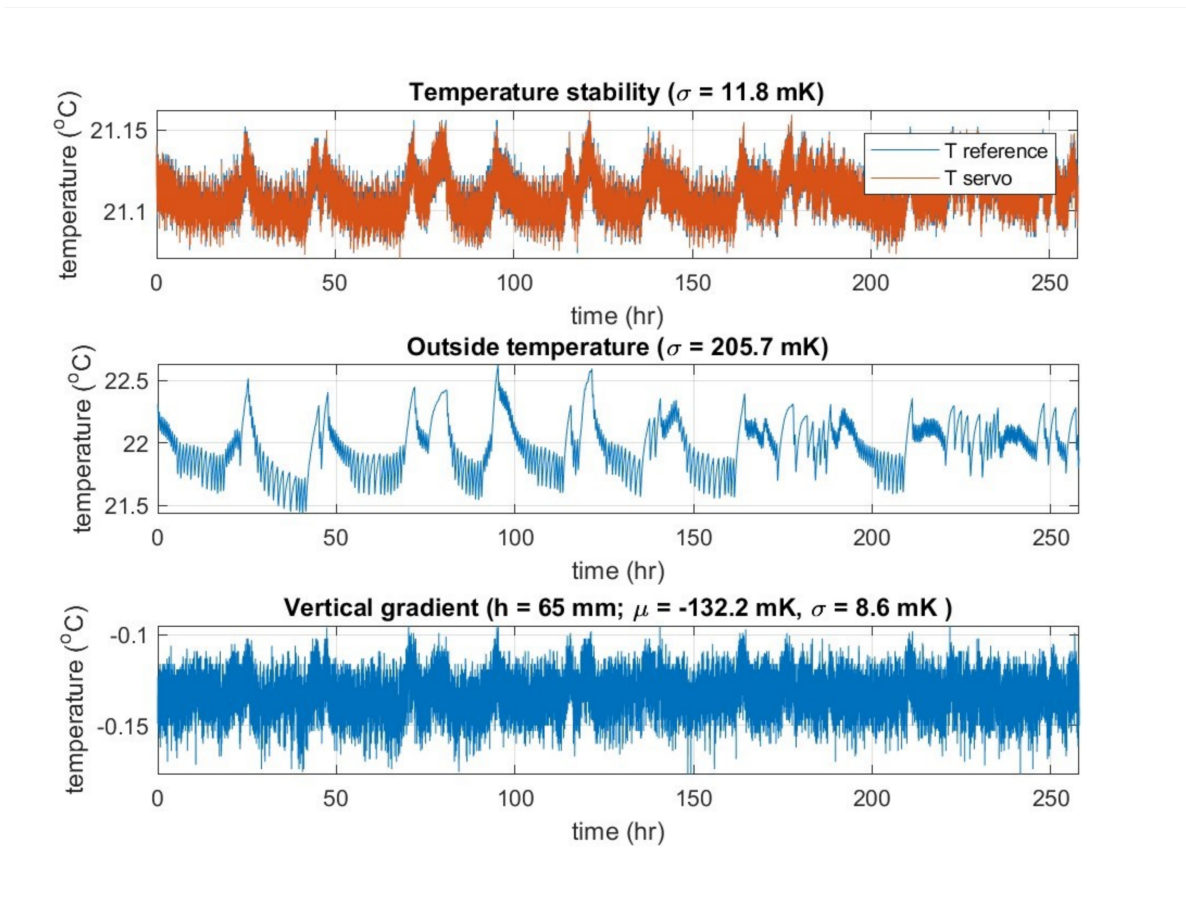
Na snímanie podmienok v komore slúži niekoľko senzorov teploty, tlaku a vlhkosti, ktoré sú spolu s konštrukciou a jednotlivými modulmi zobrazené na obr. 2.16.

Teplota vo vnútri je riadená pomocou P regulátora. Toto sa odzrkadľuje na závislosti teploty v komore na teplote okolia. Tepelné podmienky v komore počas približne desaťdňového merania možno vidieť na obr.2.17.

Stabilitu teploty v komore možno popísať smerodajnou odchýlkou, ktorá má hodnotu  $\sigma = 12.4$  mK. Na grafe je tiež vidieť závislosť medzi teplotou v komore a teplotou okolia. Veľkosť týchto teplotných zmien vo vnútri je približne 17.5-násobne menšia ako veľkosť zmien okolitej teploty. Tiež je tu vertikálny teplotný gradient o hodnote  $-2.03 K \cdot m^{-1}$ , ktorý však nie je príliš premenlivý so smerodajnou odchýlkou  $\sigma = 0.17 K \cdot m^{-1}$ . [14]



Obr. 2.16: Konštrukcia, moduly a elektronika súčasnej teplotnej komory[2]



Obr. 2.17: Teplotné podmienky v súčasnej teplotnej komore [2]

# 3 Postup a výsledky riešenia

## 3.1 Realizácia novej teplotnej komory

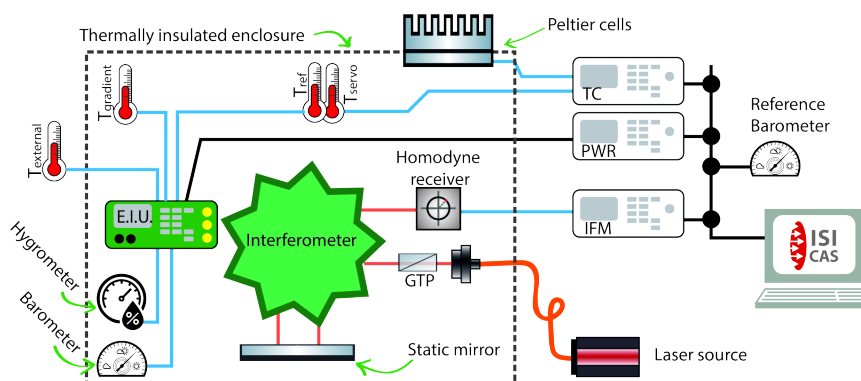
Konštrukcia komory, teplotný kontrolér s driverom peltierových článkov a jednotlivé senzory boli pripravené a nainštalované priamo na ÚPT AVČR a následne sprístupnené pre potreby tejto práce.

Rám je vyrobený z hliníkových profilov 30x30 mm, do ktorých je vsunutá brezová preglejka, tvoriaca vonkajšie steny komory. Izolácia je zabezpečená 30mm hrubými plátmi polyetylénovej peny, ktoré sú umiestnené na každej stene komory. Spodná stena je spevnená ďalšími hliníkovými profilmi, aby bola schopná uniesť hmotnosť optického breadboardu. Ten je tu z dôvodu jednoduchého a najmä stabilného umiestnenia optických prístrojov, keďže jeho konštrukcia zabezpečuje vysokú teplotnú stabilitu a tlmenie vibrácií.

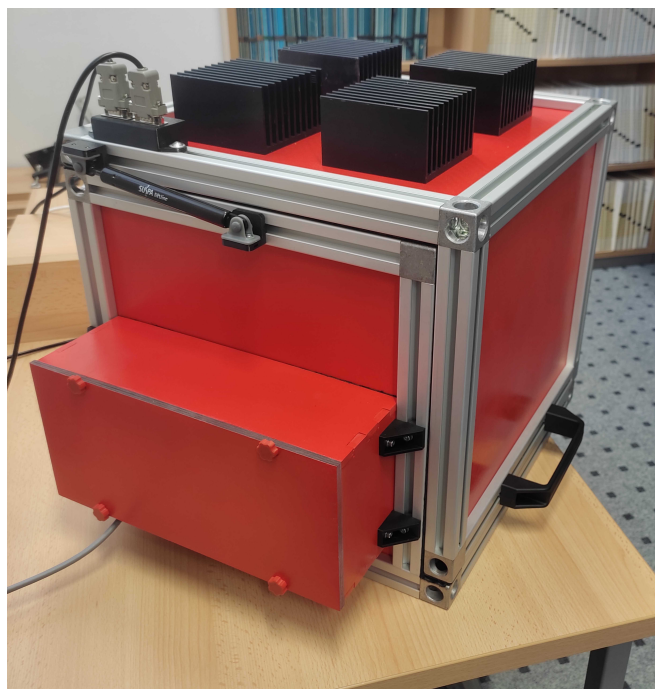
Pre riadenie teploty vnútri komory boli zvolené štyri peltierove články TES1-12704, umiestnené na vrchnej stene komory. Z vnútornej strany sú tepelne spojené s hliníkovou homogenizačnou doskou, ktorá má zabezpečiť rovnomernejšie chladenie alebo ohrev po celej ploche komory. Z vonkajšej strany sú články tepelne spojené s medenou prechodkou, ktorá je následne spojená s pasívnymi chladičmi vyvedenými z vrchnej steny komory.

Na jednej z bočných stien sa ďalej nachádza „prechodová komora“ s dvojitou izoláciou, pre vývod káblov z komory. Pre jednoduchý prístup do komory sú ako dvere do komory využité dve zo stien - vrchná a predná, ktoré sú spojené pántami. Prevedenie komory možno vidieť na obr. 3.2. Ďalšie fotografie sa nachádzajú v prílohe (6).

Ako je vidieť na obr. 3.1, na snímanie podmienok vo vnútri komory sú v nej umiestnené tri senzory teploty - najpresnejší senzor pre regulátor teploty, ďalší senzor umiestnený pri ňom určený na monitorovanie teploty a tretí umiestnený v inej výške, pre zmeranie vertikálneho gradientu teploty. Ďalej sú tu umiestnené senzory vlhkosti a tlaku a jeden senzor teploty umiestnený na komore zvonku.



Obr. 3.1: Schéma dôležitých prvkov zostavy pre testovanie laserových interferometrov [2]



Obr. 3.2: Nová teplotná komora

## 3.2 Návrh a implementácia experimentálneho riadiaceho softwaru

### 3.2.1 Funkčné a užívateľské požiadavky

Pre správnu funkciu riadiaceho softwaru bolo nutné zabezpečiť obojstrannú komunikáciu s komorou cez CAN, aby bolo možné prijímať a spracovávať údaje zo senzorov a na ich základe zadávať žiadanú hodnotu prúdu do peltierových článkov. Taktiež bolo nutné zabezpečiť možnosť meniť veľkosti P,I a D zložiek regulátora a nastavovať setpoint. Pre využívanie komory v praxi bola tiež potrebná možnosť nastaviť žiadaný priebeh teploty v čase a možnosť meniť CAN ID.

Pre vytvorenie riadiaceho softwaru bola zvolená platforma Embarcadero C++ Builder, pretože je využívaná výskumným tímom na ÚPT AVČR. Použitie rovnakej platformy teda výrazne uľahčilo vytváranie riadiaceho softwaru, keďže bolo možné s úpravami použiť časti existujúcich programov.

### 3.2.2 Architektúra experimentálneho riadiaceho softwaru

Riadiaci software bol vytvorený v podobe MS Windows aplikácie s grafickým rozhraním. Program funguje na princípe event-driven paradigma. Súčasne v ňom beží niekoľko vlákien, pričom základné vlákno obsluhuje UI a pomocné vlákna sa starajú o vývojové prostredie na pozadí čo zahŕňa výpočet riadiaceho zásahu, zmeny setpointu a ďalšie funkcie spojené s riadením. Tieto pomocné vlákna sú realizované pomocou časovačov. Ďalšia dvojica vlákien slúži pre prijímanie a vysielanie paketov CAN. V tomto prípade sú použité vlákna na úrovni operačného systému.



### Štruktúra tried

Funkcie zabezpečujúce chod programu sú rozdelené do viacerých tried:

Hlavný formulár obsahuje inicializáciu ostatných tried, obsluhu UI a volanie funkcií zabezpečujúcich komunikáciu cez CAN a riadenie.

Trieda CanMaster a jej potomok MyCanMaster obsahujú funkcie potrebné na komunikáciu cez CAN, konkrétne vysielanie a prijímanie PDO paketov, zapisovanie a úpravu vstupov v slovníku objektov a taktiež funkcie na logovanie.

Trieda PID obsahuje funkcie zabezpečujúce výpočet riadiaceho zásahu a vytvorenie žiadaného priebehu setpointu teploty v čase.

Tento program vychádza z existujúceho programu poskytnutého zo strany ÚPT, ktorý slúžil na zobrazovanie dát z meteorologickej stanice.

Schematické zobrazenie tried a komponentov, ktoré tvoria systém, je vyobrazené na obr. 3.3.

#### 3.2.3 Čítanie dát z komory cez CAN

Prijímanie PDO paketov poslaných z komory cez CAN bolo jednou zo základných podmienok funkčnosti riadiaceho softwaru. Umožňuje totiž prijímať všetky dáta z jednotlivých senzorov a následne ich spracovať a uložiť pre ďalšie využitie. Táto komunikácia bola jednoducho uskutočnená vďaka využitiu triedy CanMaster.

Ako je uvedené v časti 2.3.1 CAN ID sa skladá z funkčného kódu a ID zariadenia. Napríklad informácie z teplotného regulátora označeného „treg“ sú posielané prostredníctvom PDO1, ktorého funkčný kód je 0b0011. Ďalej je známe, že ID zariadenia je 11, teda 0b0001011, keďže ID zariadenia je 7- miestne. Výsledné COB ID je teda 0b00110001011, čo je po prevedení do desiatkovej sústavy 395, teda ID zariadenia + 384. Týmto spôsobom možno zistiť aké informácie daný paket obsahuje a následne ich zapísať do registrov v slovníku objektov. Príklad čítania údajov prichádzajúcich cez CAN (6.1) je uvedený v kapitole 6.

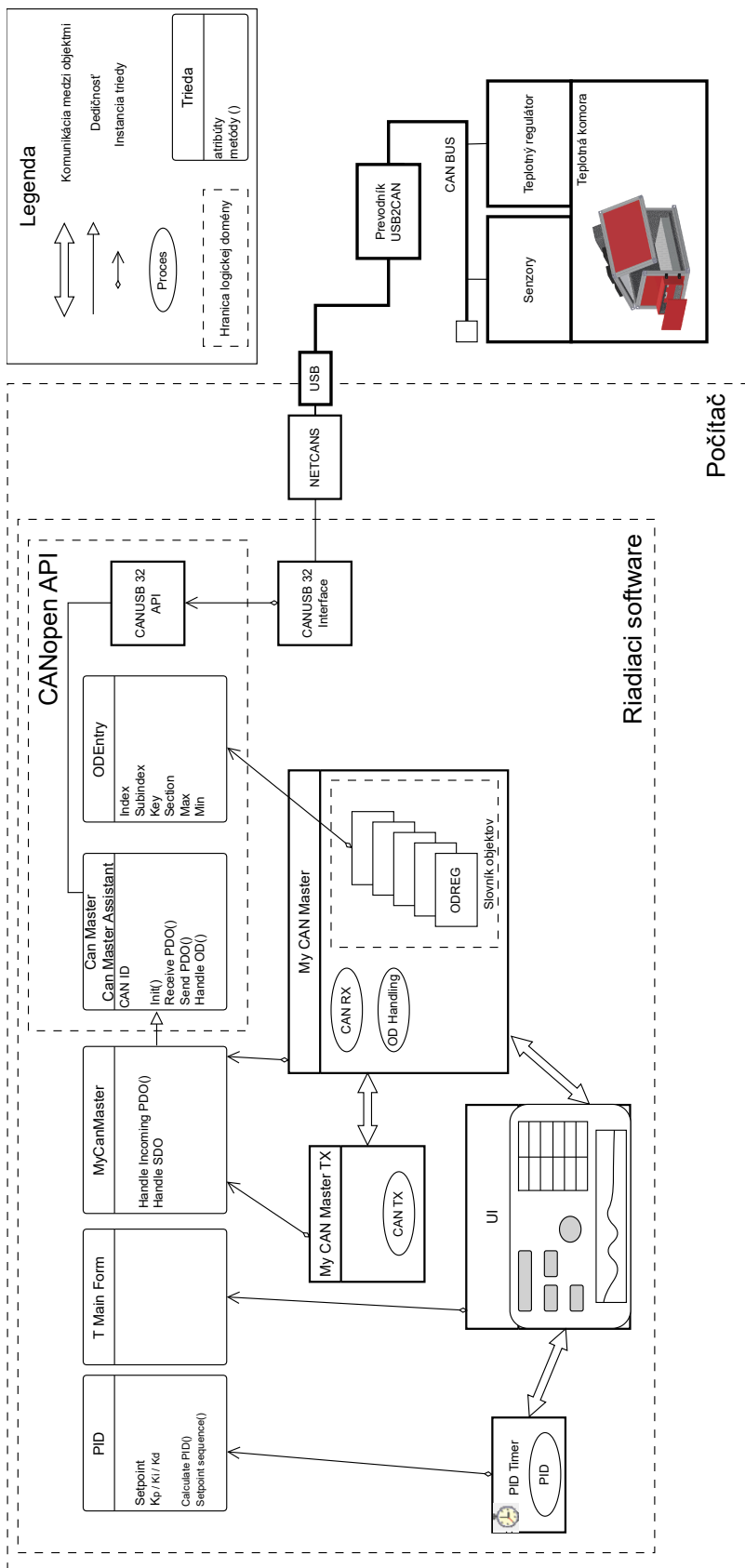
#### 3.2.4 Zapisovanie dát cez CAN

Odosielanie PDO paketov je ďalšia funkcia kritická pre riadenie, pretože umožňuje zadávať žiadaný prúd do peltierových článkov a odosielať túto informáciu cez CAN priamo do driveru článkov. Rovnako ako prijímanie informácií z CANu je jednoducho umožnená vďaka triede CanMaster.

Pre zadávanie prúdu najprv je najprv vytvorená štruktúra, ktorá má rovnakú formu ako užitočné dáta v PDO pakete. Do premennej „ValueLong“ je následne zapísaná požadovaná hodnota prúdu. Keďže dátový typ tejto premennej je int32, zaplňa polovicu maximálnej kapacity PDO paketu pre užitočné dáta. Zvyšné 4 bajty tvorí kombinácia binárnych hodnôt, ktorými je určené, že zadaná hodnota bude zapísaná ako hodnota prúdu a poslaná do driveru termoelektrických článkov. Následne je zapísané ID zariadenia, na ktoré chceme hodnotu zapísať do premennej „ID“ štruktúry „it“, ktorá reprezentuje paket PDO. Rovnako sú zapísané odosielané dáta do premennej „Data“ tejto štruktúry. Nakoniec je paket odoslaný pomocou funkcie *sendPDO()* definovanej v triede CanMaster. Príklad zadania hodnoty prúdu a odoslania paketu (6.2) možno nájsť v kapitole 6.

### 3.2 NÁVRH A IMPLEMENTÁCIA EXPERIMENTÁLNEHO RIADIACEHO SOFTWARE

#### 3 POSTUP A VÝSLEDKY RIEŠENIA



Obr. 3.3: Architektonická schéma systému od fyzickej domény až po softwarovú

## 3.3 PID regulátor

### 3.3.1 Vytvorenie triedy a štruktúry PID regulátora

Pre využitie PID regulátora bola vytvorená trieda PID spomínaná v časti 3.2.2. Rovnica PID regulátora (2.1) uvedená v kapitole (2) bola pozmenená na nasledujúcu podobu:

$$u(t) = Ke(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Keďže riadená sústava má pomerne dlhé časové konštanty a maximálny riadiaci zásah je pomerne malý, bolo nutné zaviesť opatrenia, ktorými bolo zabránené vzniku windupu. Toto bolo vyriešené zavedením saturácie integrátora. Rovnako bol saturovaný aj výstupný prúd na hodnotu, ktorú dovoľuje sústava, teda 1 A. Taktiež bola zavedená saturácia jednotlivých príspevkov do celkového riadiaceho zásahu, aby nedochádzalo k priveľkej prevahe jednej zložky pri riadení. Z dôvodu obmedzenia šumu výstupnej hodnoty z PID regulátoru bol pridaný jednoduchý filter D zložky. Filtrácia bola uskutočnená nasledovne:

$$D_{tf} = (1 - a) \cdot D_{t-1} + D_t \cdot a \quad (3.2)$$

Kde  $D_{tf}$  je filtrovaná D zložka,  $D_{t-1}$  je D zložka z predošlej iterácie,  $D_t$  je nefiltrovaná D zložka a  $a$  je filtračná konštanta.

Pre zlepšenie celkových vlastností riadenia boli zavedené tri režimy.

Režim rýchlej zmeny teploty je spustený v prípade, že je regulačná odchýlka väčšia ako stanovená hodnota. Toto nastáva napríklad pri skokovej zmene setpointu (viz 3.4.2). V tomto režime je použitá len P zložka regulátora, nastavená na veľkú hodnotu, aby sa čo najviac skrátil čas prvého dosiahnutia žiadanej hodnoty (rise time).

Režim ustálenia nasleduje po skončení režimu rýchlej zmeny teploty a je aktívny počas určeného časového úseku. Jeho úlohou je stabilizovať systém.

Do bežného režimu riadenie prejde po skončení režimu ustálenia, prípadne priamo po spustení riadenia v prípade, že je regulačná odchýlka menšia ako hodnota určená pre spustenie režimu rýchlej zmeny teploty. Cieľom tohto režimu je udržať čo najlepšiu dlhodobú stabilitu teploty. Časť kódu, ktorá slúži na výpočet akčného zásahu (6.3) možno nájsť v kapitole 6.

### 3.3.2 Ladenie PID regulátora

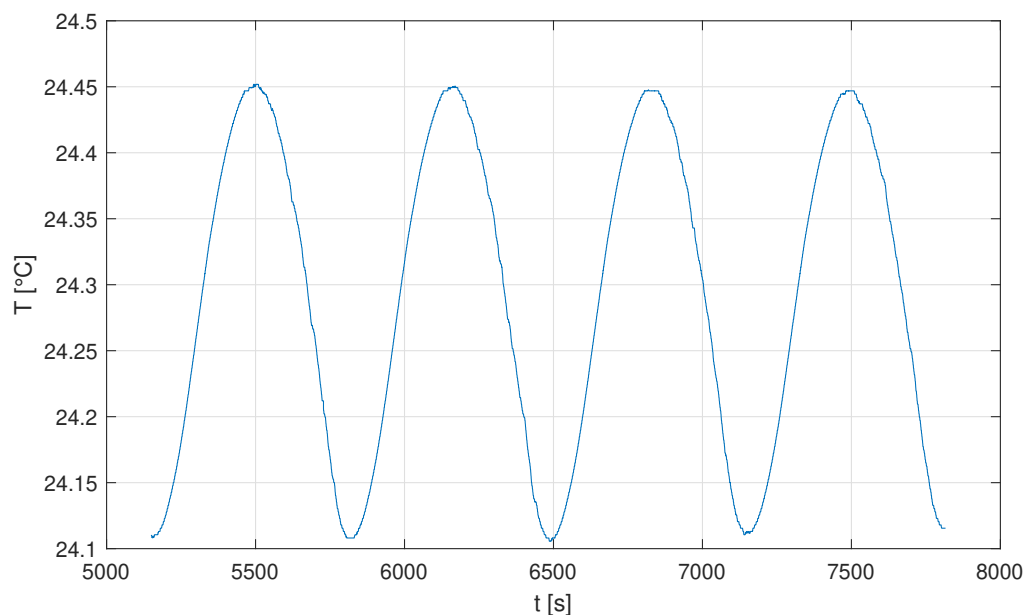
Aby riadenie vyhovovalo požiadavkám, je nutné zvoliť vhodné veľkosti jednotlivých zložiek PID regulátora. Toto bolo dosiahnuté niekoľkými metódami. Do úvahy bola braná najmä stabilita, ale prihliadalo sa aj na vlastnosti ako šum a čas do ustálenia.

Veľkosť šumu bola popísaná ako najväčšia amplitúda signálu nameraného počas jednej hodiny. Tento prístup bol zvolený preto, že zmeny teploty v komore sú ovplyvnené aj zmenami v teplote okolia a výberom kratšieho časového úseku bolo dosiahnuté, že tieto vplyvy môžu byť zanedbané.

Za čas do ustálenia bol považovaný časový úsek, odkedy systém prvýkrát dosiahol absolútnu hodnotu regulačnej odchýlky 0.5 K, po dosiahnutí absolútnej hodnoty regulačnej

odchýlky menšej ako 20 mK, bez ďalšieho prekročenia tejto hodnoty.

Počiatkový odhad veľkosti zložiek bol získaný metódou Ziegler-Nichols, kedy bol systém privedený na hranicu stability pri vyradených zložkách I a D. Priebeh teploty pri dosiahnutí tohto stavu možno vidieť na obr. 3.4



Obr. 3.4: Netlmená oscilácia systému

Z výsledného priebehu bola odčítaná perióda netlmených kmitov a taktiež bolo zaznamenané zosilnenie P zložky, pri ktorom bol tento stav dosiahnutý. Výsledná perióda bol 670 s pri zosilnení 13.

Pomocou týchto hodnôt boli vypočítané veľkosti jednotlivých zložiek vzťahmi:

$$K_p = 0.6K_{pk} \quad (3.3)$$

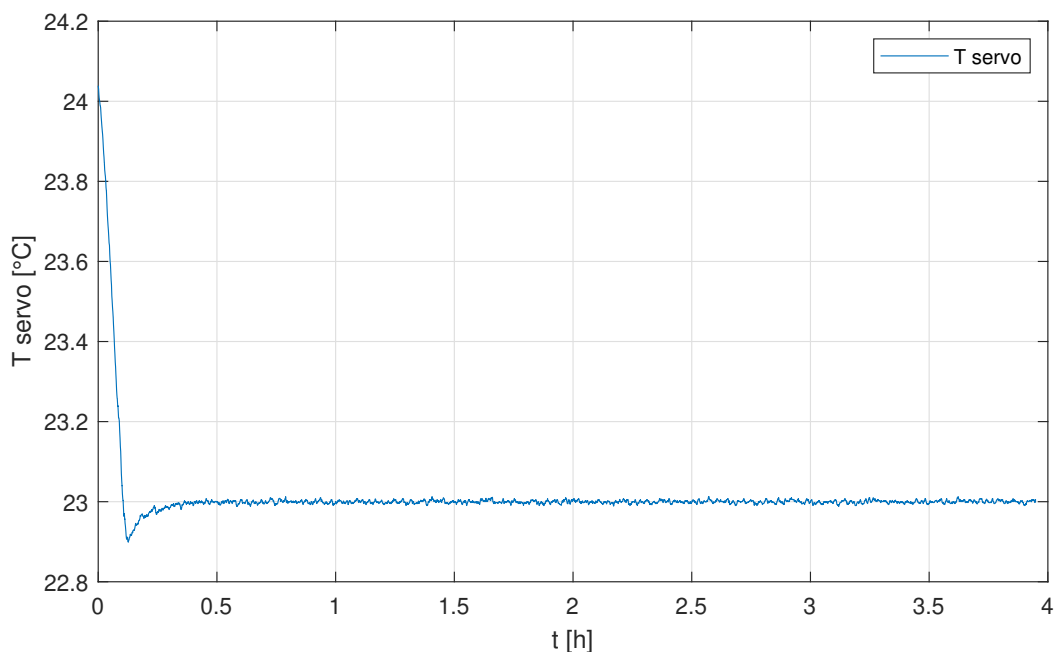
$$K_i = \frac{2K_p}{T_k} \quad (3.4)$$

$$K_d = \frac{K_p T_k}{8} \quad (3.5)$$

Výsledné zosilnenia vyšli nasledovne:

$$K_p = 7.8, K_i = 0.0232, K_d = 653.25$$

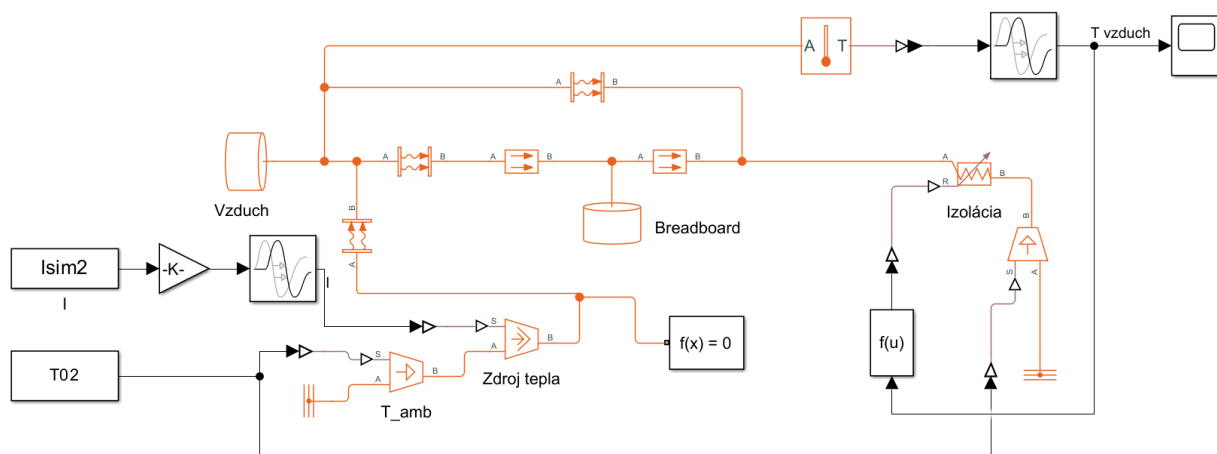
Priebeh teploty počas merania s týmito hodnotami možno vidieť na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Priebeh teploty počas merania s parametrami získanými metódou Ziegler-Nichols

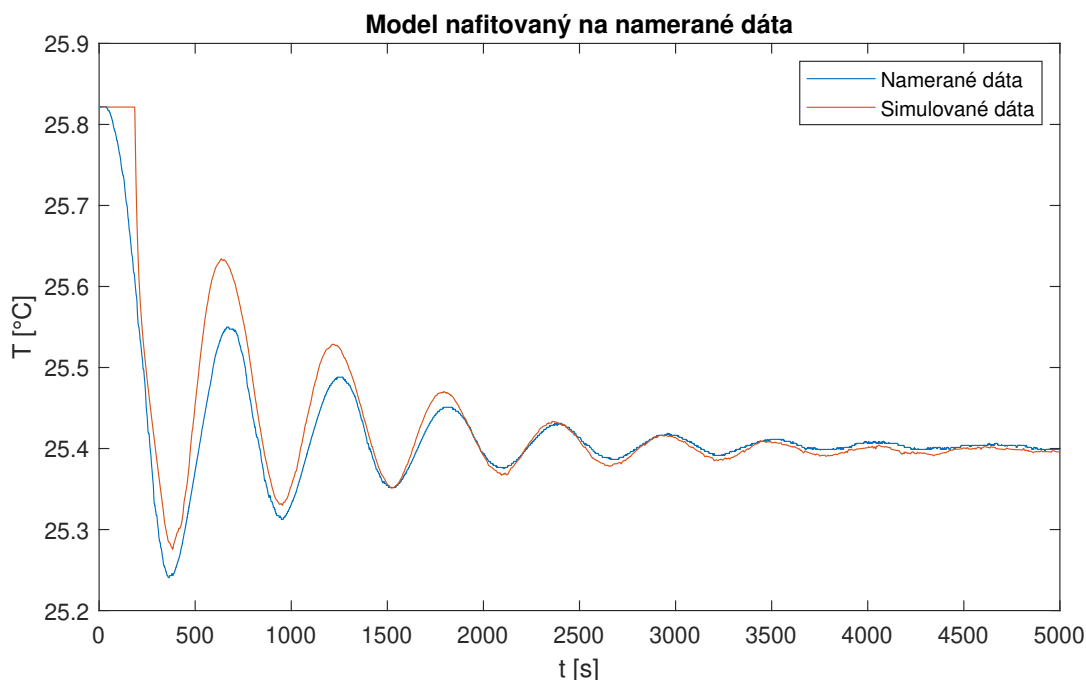
Velkosti zložiek určené pomocou metódy Ziegler-Nichols priniesli pomerne uspokojujúce výsledky z hľadiska prechodového deja. Čas do ustálenia bol pri tomto nastavení len približne 0.21 hod. Po ustálení bol však zaznamenaný pomerne veľký šum, ktorého maximálna amplitúda dosahovala 12.38 mK, spôsobený vysokou hodnotou D zložky. Z tohto dôvodu bolo nutné ďalšie doladovanie regulátora.

Pre tento účel bol vytvorený model systému v programe Simulink a jeho reakcia bola nafitovaná na namerané dáta, aby bol použiteľný pre ladenie PID regulátora. Tento model možno vidieť na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Model komory v MATLAB Simulinku

Systém bol vymodelovaný pomocou Simscape prvkov. Z dôvodu zjednodušenia boli v modele peltierove články nahradené zdrojmi tepla, ktorých výstup bol proporcionálny k vstupnému prúdu. Toto zjednodušenie je možné preto, že krivka tepla čerpaného peltierovým článkom v závislosti na prúde, ktorú možno nájsť v [15], sa dá pri použitých prúdoch aproximovať lineárnou funkciou s dostatočnou presnosťou. Model bol potom naftovaný na dáta z merania, ako je vidieť na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Porovnanie reakcie modelu a nameraných dát

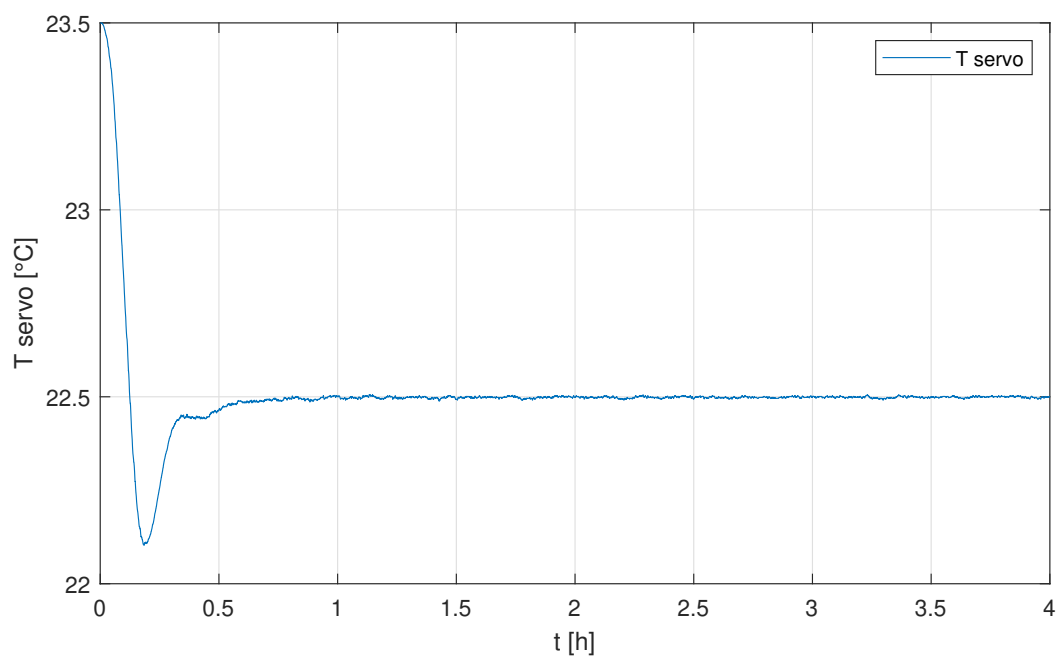
Tento model bol následne použitý spolu s aplikáciou „PID Tuner“ dostupnou v Simulinku na získanie lepších parametrov. Výsledné veľkosti zložiek vyšli nasledovne:

$$K_p = 1.42, K_i = 0.0032, K_d = 84$$

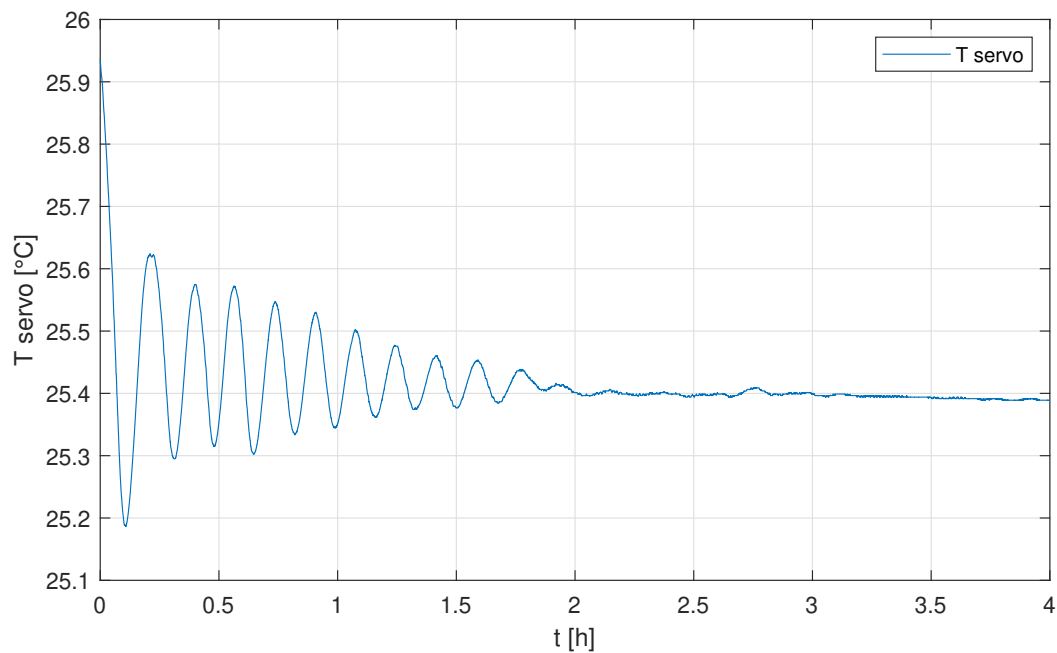
Odozva systému pri týchto parametroch bola zaznamenaná a priebeh teploty je zobrazený na obr. 3.8.

Použitím hodnôt získaných pomocou modelu a aplikácie „PID Tuner“ boli dosiahnuté lepšie výsledky. Maximálna amplitúda šumu zaznamenaná počas jednej hodiny bola tentokrát 7.26 mK. Na grafe možno vidieť výrazný overshoot, dosahujúci 39.7%, ktorého zmenšenie by bolo žiadúce. Taktiež bol predĺžený čas do ustálenia na približne 0.49 hod. Z hľadiska ustáleného stavu je však toto nastavenie už pomerne vyhovujúce.

Následne bolo vykonaných niekoľko meraní a postupné ručné doladovanie na základe sledovaných priebehov. Prvou zmenou bolo ďalšie zmenšenie I a D zložky, s cieľom zmenšiť šum a taktiež overshoot. Výsledkom bolo výrazné kmitanie počas prechodového deja, ako možno vidieť na obr. 3.9, čo malo za následok, že systém dosiahol rozkmit menší ako 20 mK až po 1.82 hod.



Obr. 3.8: Priebeh teploty pri použití hodnôt z aplikácie PID tuner



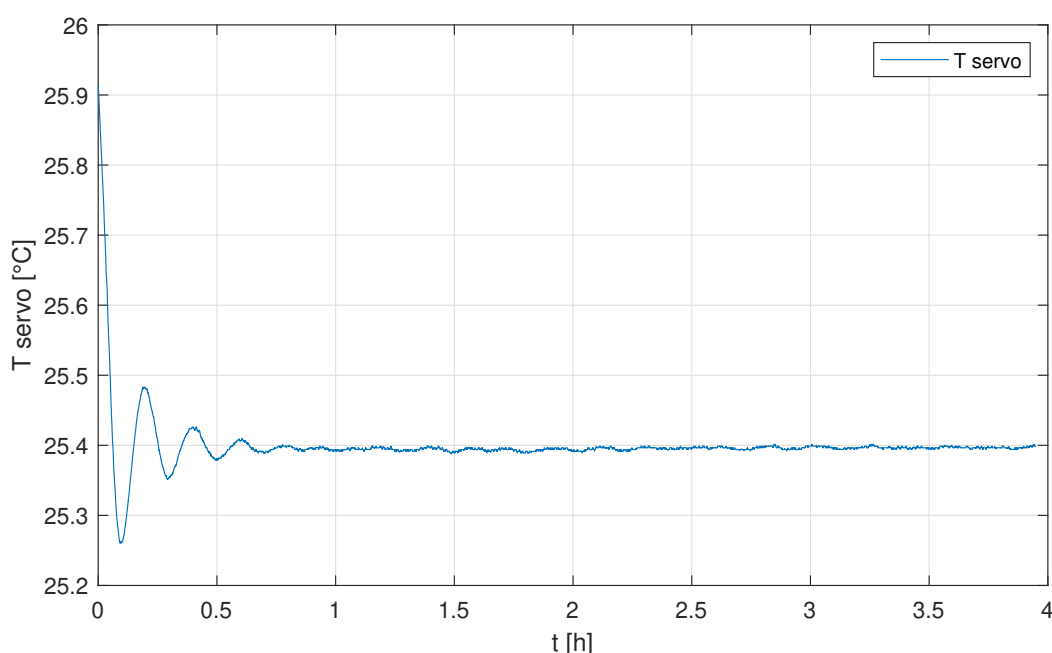
Obr. 3.9: Výrazné kmitanie počas prechodového deja vplyvom príliš malého zosilnenia D zložky

Ďalšími zmenami boli postupne získané finálne hodnoty, ktoré boli:

$$K_p = 2.5, K_i = 0.0013, K_d = 65$$

S týmito hodnotami sa podarilo dosiahnuť zatiaľ najlepšie vlastnosti z hľadiska dlhodobej stability. Smerodajná odchýlka počas merania dlhého 260 hod. dosiahla 2.34 mK, čo možno považovať za úspešný výsledok.

Prechodový dej bol mierne rozkmitaný, no napriek tomu bol čas do ustálenia približne 0.5 hod. Taktiež sa ešte znížil šum, ktorého maximálna amplitúda dosiahla v tomto meraní 6.26 mK. Pribeh teploty počas merania je na obr. 3.10.



Obr. 3.10: Prechodový dej po upravení hodnôt I a D zložky

Dodatočne boli ešte pridané ďalšie režimy spomínané v 3.3.1.

### 3.3.3 Prídavné funkcie

Na základe funkčných a užívateľských požiadaviek boli okrem základného riadenia pridané ďalšie funkcie.

Prvou z nich je skoková zmena požadovanej hodnoty. Bola žiadaná z dôvodu potreby kontrolovaných zmien teploty pre merania na laserových interferometroch. Jej úlohou je zmeniť setpoint na zadanú hodnotu v určitý čas. Kód, ktorým bolo toto dosiahnuté (6.4,6.5) možno vidieť v kapitole 6. Táto funkcia bola užitočná aj pri testovaní komory, kedy vďaka nej bolo možné nastaviť niekoľko po sebe idúcich zmien žiadanej hodnoty veličiny a sledovať tak prechodové deje pri rôznych hodnotách požadovanej teploty.

Druhou funkciou bola postupná zmena setpointu. Jej úlohou je zmena požadovanej teploty o zadanú hodnotu v určitom časovom úseku, pričom zmena bude mať lineárny

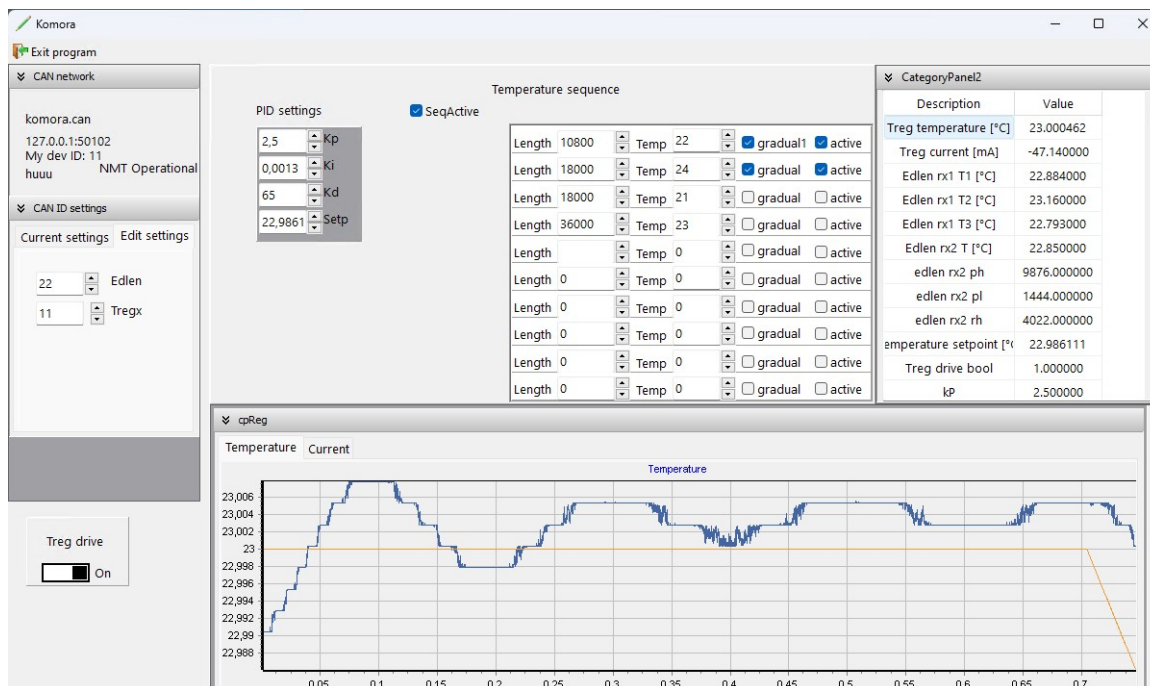


priebeh. Požadovaná zmena bola 1 K v priebehu 5 hod., avšak v užívateľskom rozhraní je možné nastaviť iné hodnoty. Kód tejto funkcie (6.6) je uvedený v kapitole 6.

### 3.3.4 Návrh a implementácia ovládacieho SW pre riadenie komory

Ovládací software vychádza z experimentálneho softwaru, ktorý bol upravený s cieľom zabezpečenia užívateľsky pohodlného riadenia teplotnej komory. Na ovládací software boli kladené nasledujúce požiadavky:

- Zobrazovanie údajov zo senzorov v komore
- Možnosť nastavenia CAN ID
- Možnosť nastavenia zosilnení pre P, I a D zložku regulátora
- Možnosť nastaviť sekvenciu priebehov teploty
- Vykresľovanie priebehov teploty a prúdu



Obr. 3.11: Snímka obrazovky užívateľského rozhrania

Ako je vidno na obr. 3.11 dáta zo senzorov sú vypísané v tabuľke nachádzajúcej sa vpravo hore. Vedľa nej sú nastavenia priebehu teploty a nastavenia jednotlivých zložiek regulátora. Na ľavom okraji sa potom nachádzajú informácie o stave CAN a pod nimi nastavenia CAN ID. Vypínač riadenia teploty v komore možno nájsť v ľavom spodnom rohu.

## 3.4 Testovanie teplotnej komory

Pre účely charakterizácie dosiahnutých výsledkov bolo vykonaných niekoľko testov. Vďaka nim bolo možné charakterizovať stabilitu teploty, dĺžku prechodového deja pri rôznych roz-

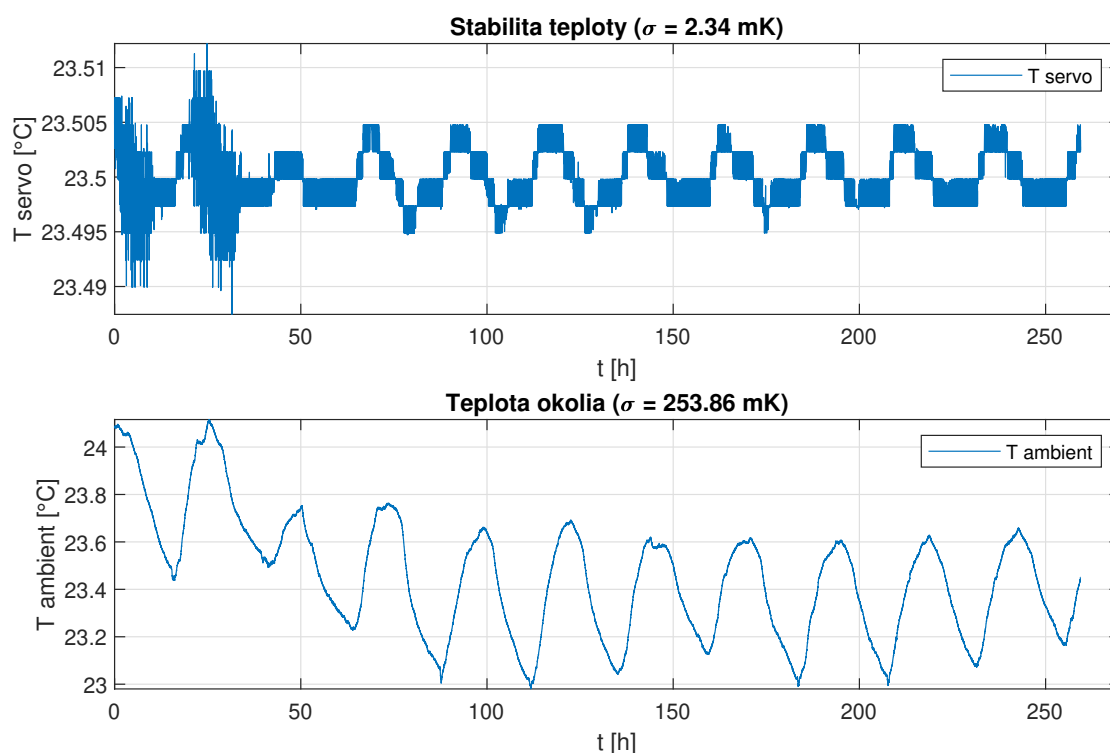
dieloch žiadanej teploty a teploty okolia a taktiež teplotný gradient. Na základe týchto charakteristík môže byť komora porovnaná s pôvodným stavom. Na záznam dát bol využitý program CANman a na export program KANAL, ktoré sú popísané v 2.3.3. Maximálna frekvencia záznamu je 50 Hz, avšak kvôli dĺžkam meraní boli volené nižšie frekvencie záznamu, aby bolo spracovanie menej výpočtetne náročné. Keďže sú časové konštanty systému dlhé, presnosť a spoľahlivosť výsledkov nie je týmto zmenšením frekvencie záznamu ovplyvnená.

### 3.4.1 Test stability teploty v ustálenom stave

Jeho účelom bolo otestovať schopnosť regulátora udržať konštantnú teplotu počas niekoľkých dní a čo najviac potlačiť vplyvy zmien teploty okolia. Pri tomto meraní sa za podstatnú považuje najmä smerodajná odchýlka. Test spočíval v nastavení požadovanej teploty a následnom meraní, trvajúcim približne 260 hodín.

Pri tomto teste boli hodnoty zložiek PID regulátora  $K_p = 2.5$ ,  $K_i = 0.0013$ ,  $K_d = 65$  a filtračná konštanta  $a = 0.015$ . Riadiaci zásah bol prepočítavaný s frekvenciou 20 Hz. Kvôli dĺžke merania boli dáta zaznamenávané s frekvenciou 1.25 Hz.

Priebeh teploty počas tohto merania možno vidieť na obr. 3.12.



Obr. 3.12: Priebeh teploty počas testu dlhodobej stability

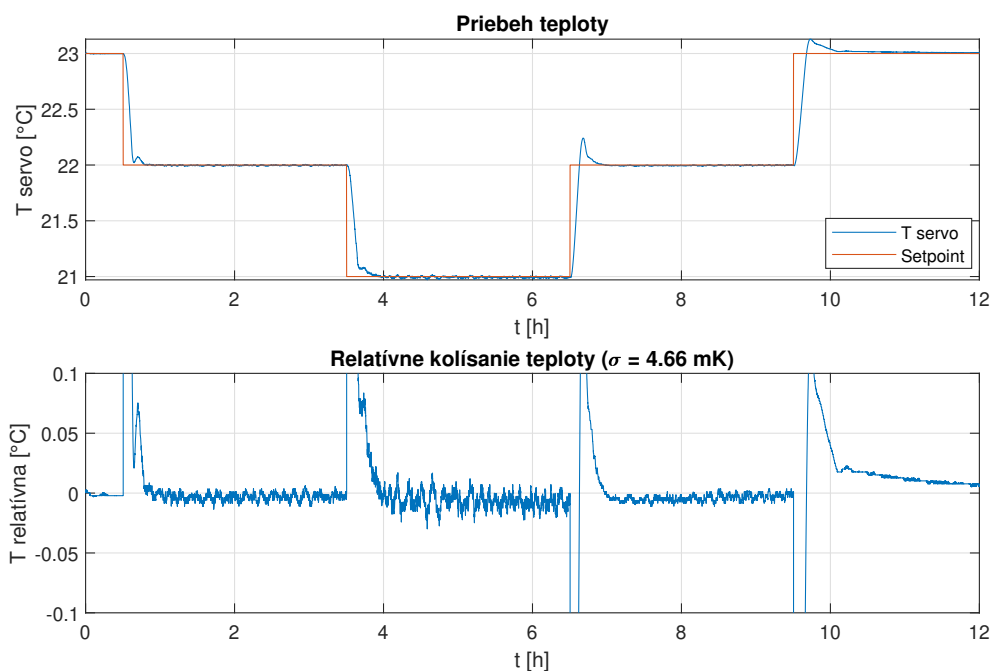
Výsledky tohto merania sú uspokojivé. Keďže bola podstatná dlhodobá stabilita, prechodový dej do výpočtu smerodajnej odchýlky a grafu nebol zahrnutý. Smerodajná odchýlka je  $\sigma=2.34$  mK, čo možno považovať za veľmi dobrý výsledok. Maximálny rozkmit peak-to-peak je len 24.742 mK, čo je tiež dobrá hodnota. Na grafe je vidieť jasnú závis-

losť medzi teplotou okolia a teplotou v komore, avšak veľkosť zmeny teploty v komore je približne 108.5-krát menšia ako veľkosť zmeny okolitej teploty.

### 3.4.2 Test skokovej zmeny setpointu

Účelom tohto testu bolo sledovať správanie systému pri skokových zmenách požadovanej hodnoty o 1K. Na začiatku bol setpoint nastavený na 23°C. Následne sa každé 3 hodiny znížil o 1K až do 21°C, odkiaľ bol zase postupne zvyšovaný naspäť na 23°C.

Pri tomto teste boli hodnoty zložiek PID regulátora  $K_p = 2.5$ ,  $K_i = 0.0013$ ,  $K_d = 65$  a filtračná konštanta  $a = 0.015$ . Oproti ostatným testom, bola v tomto prípade počas skokov regulačná odchýlka dostatočne veľká na to, aby sa spustil režim rýchlej zmeny teploty. V ňom sa zmenili veľkosti zložiek na  $K_p = 12$  a  $K_d = 0$ . Hranica pre vypnutie tohto režimu bola nastavená na 0.2K. Po ňom prišiel na rad režim ustálenia spomínaný v 3.3.1, ktorý trval 0.5 hod. a veľkosti zložiek v ňom boli:  $K_p = 2.5$ ,  $K_i = 0.008$  a  $K_d = 200$ . Riadiaci zásah bol prepočítavaný s frekvenciou 20 Hz, podobne ako v predošlom teste. Kvôli menšej dĺžke merania bola zvolená frekvencia záznamu dát 5 Hz. Pribeh teploty počas tohto testu možno vidieť na obr. 3.13.



Obr. 3.13: Skokové zmeny setpointu

Z tohto testu bolo získaných hneď niekoľko poznatkov. Prvým z nich je, že pri skoku z nižšej teploty na vyššiu je rozkmit počas ustálenia väčší ako pri skoku na nižšiu teplotu. Toto je pravdepodobne spôsobené príspevkom tepla z okolia, ktorý v riadení nie je braný do úvahy.

Ďalším poznatkom je, že rozkmit je najväčší pri chladení na najnižšiu teplotu, teda 21°C. Z týchto výsledkov možno usúdiť, že so zvyšujúcim sa rozdielom medzi teplotou okolia a požadovanou teplotou v komore, bude klesať stabilita teploty.

Priemerná smerodajná odchýlka v ustálenom stave bola pri tomto meraní vyššia ako

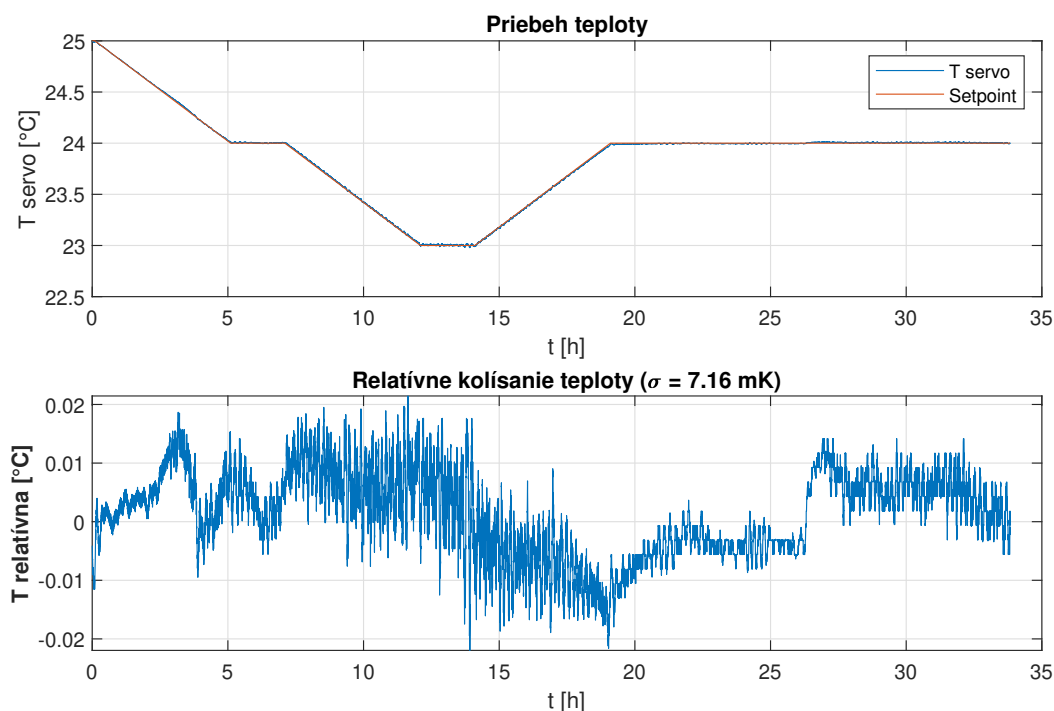
pri meraní dlhodobej stability, s hodnotou  $\sigma = 4.66$  mK a maximálny rozkmit peak-to-peak bol 47.02 mK. Čas od prvého dosiahnutia regulačnej odchýlky  $0.5^\circ\text{C}$  do ustálenia bol najdlhší pri poslednom skoku z  $22^\circ\text{C}$  na  $23^\circ\text{C}$  s veľkosťou približne 0.81 hod., čo je pravdepodobne spôsobené vyššie spomínaným príspevkom tepla z okolia. V ostatných prípadoch sa časy do ustálenia pohybovali medzi 0.18 a 0.29 hod.

### 3.4.3 Test postupnej zmeny setpointu

Účelom tohto merania bolo otestovať schopnosť riadenia udržať lineárny priebeh zvyšovania a znižovania teploty so strmostou  $1\text{K}/5\text{h}$ . Počiatočná teplota bola  $25^\circ\text{C}$  a postupne v dvoch fázach bola znížená na  $23^\circ\text{C}$  a následne zvýšená späť na  $24^\circ\text{C}$ .

Pri tomto teste boli hodnoty zložiek PID regulátora  $K_p = 2.5$ ,  $K_i = 0.0013$ ,  $K_d = 65$  a filtračná konštanta  $a = 0.015$ . Riadiaci zásah bol prepočítavaný s frekvenciou 20 Hz, podobne ako v predošlom teste. Kvôli menšej dĺžke merania bola zvolená frekvencia záznamu  $5$  Hz rovnako ako pri meraní skokovej zmeny.

Výsledky merania sú na obr. 3.14. Maximálny rozkmit peak-to-peak relatívnej teploty



Obr. 3.14: Postupná zmena setpointu

voči setpointu bol 43.412 mK. Táto hodnota je pomerne uspokojivá, najmä vzhľadom na to, že nešlo o držanie konštantnej teploty, ale o postupnú zmenu.

Veľký nárast zaznamenala aj smerodajná odchýlka relatívnej teploty, ktorá v tomto prípade dosiahla hodnotu  $\sigma = 7.16$  mK. Táto hodnota je oproti testu dlhodobej stability výrazne vyššia, avšak vzhľadom na povahu testu bol podobný výsledok očakávaný.

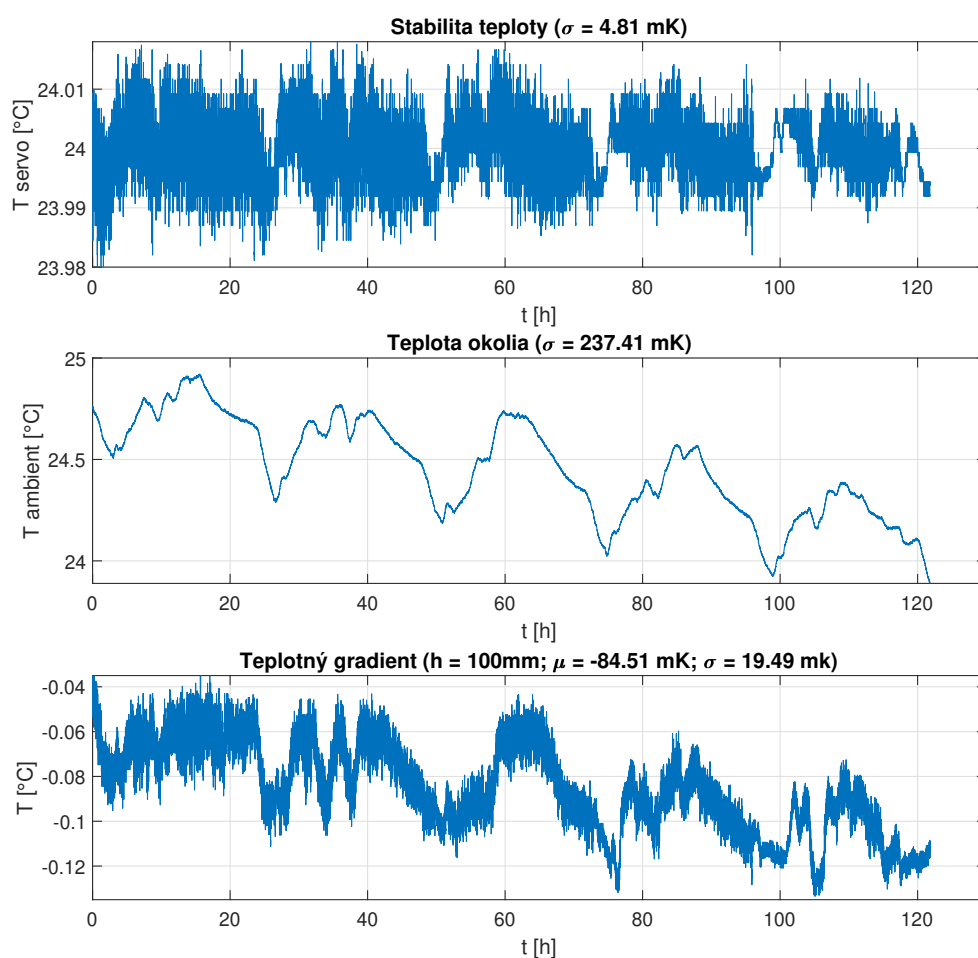
Rovnako ako pri teste skokovej zmeny setpointu si možno všimnúť, že najvyššie hodnoty šumu boli pozorované práve v oblastiach, kde bol najväčší rozdiel medzi požadovanou teplotou a teplotou okolia, ktorej priemerná hodnota bola  $24.6^\circ\text{C}$ .

### 3.4.4 Meranie teplotného gradientu

Pri predošlých meraniach boli všetky teplotné senzory umiestnené blízko pri sebe. Pre zmeranie gradientu teploty bolo teda nutné umiestniť ich do rôznej výšky. Senzory boli umiestnené tak, že vertikálny rozdiel medzi nimi bol 10 mm. Samotné meranie spočívalo v nastavení požadovanej hodnoty a následnom zázname, ktorý trval niekoľko dní.

Pri tomto teste boli hodnoty zložiek PID regulátora  $K_p = 2.5$ ,  $K_i = 0.0013$ ,  $K_d = 65$  a filtračná konštanta  $a = 0.015$ . Riadiaci zásah bol prepočítavaný s frekvenciou 20 Hz, podobne ako v ostatných testoch. Kvôli dĺžke merania bola zvolená frekvencia záznamu dát 1.25 Hz rovnako ako pri teste dlhodobej stability.

Priebeh teplôt počas tohto testu je vidieť na obr. 3.15.



Obr. 3.15: Priebehy teploty v komore počas merania teplotného gradientu s novým umiestnením senzorov

Bol nameraný záporný teplotný gradient so strednou hodnotou  $-845.1 \text{ mK} \cdot \text{m}^{-1}$ , so smerodajnou odchýlkou  $\sigma = 194.9 \text{ mK} \cdot \text{m}^{-1}$ . Taktiež je vidieť jasnú závislosť gradientu na teplote okolia.

Ďalším zaujímavým zistením je, že s novou polohou senzorov možno oproti meraniu dlhodobej stability pozorovať väčší maximálny rozkmit peak-to-peak, ktorý stúpol na 39.43 mK. Smerodajná odchýlka je tiež viac ako dvojnásobná s hodnotou  $\sigma = 4.81$  mK. Z tohto sa dá dôvodne predpokladať, že kolísanie teploty sa bude zväčšovať so vzdialenosťou od vykurovacieho/chladiaceho telesa.

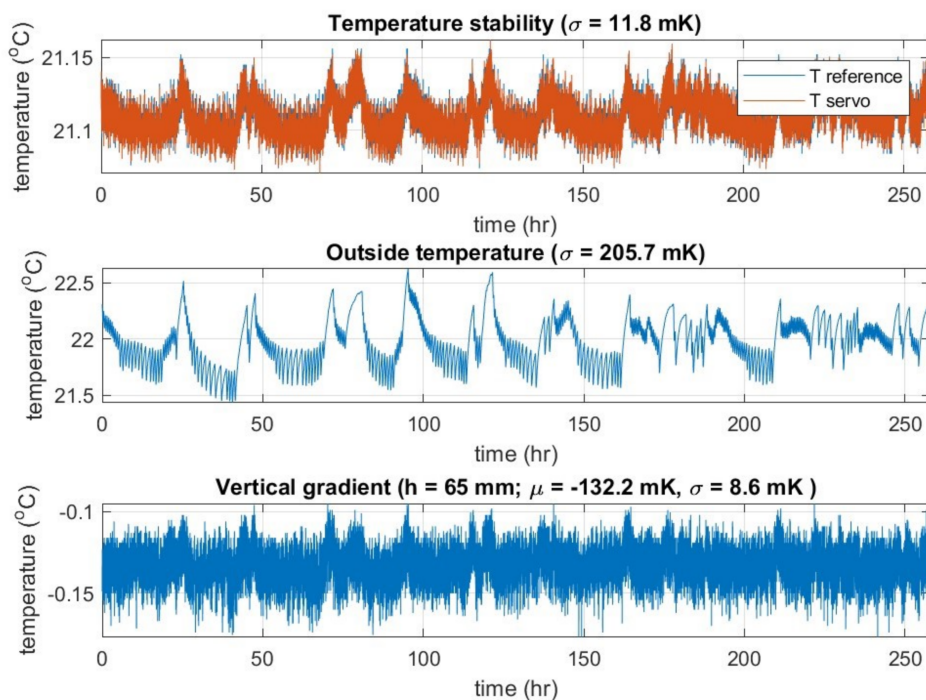
### 3.4.5 Porovnanie s pôvodným stavom

Smerodajná odchýlka teploty sa znížila z pôvodnej hodnoty  $\sigma = 11.8$  mK (viz. 3.16) na  $\sigma = 2.34$  mK (viz. 3.17), respektíve  $\sigma = 4.81$  mK (viz. 3.15) s iným umiestnením senzorov teploty. Ak je braná do úvahy vyššia nameraná hodnota smerodajnej odchýlky, ide o zlepšenie o približne 59%. Je teda možné usúdiť, že hlavný cieľ, ktorým bolo zlepšenie stability teploty, bol dosiahnutý.

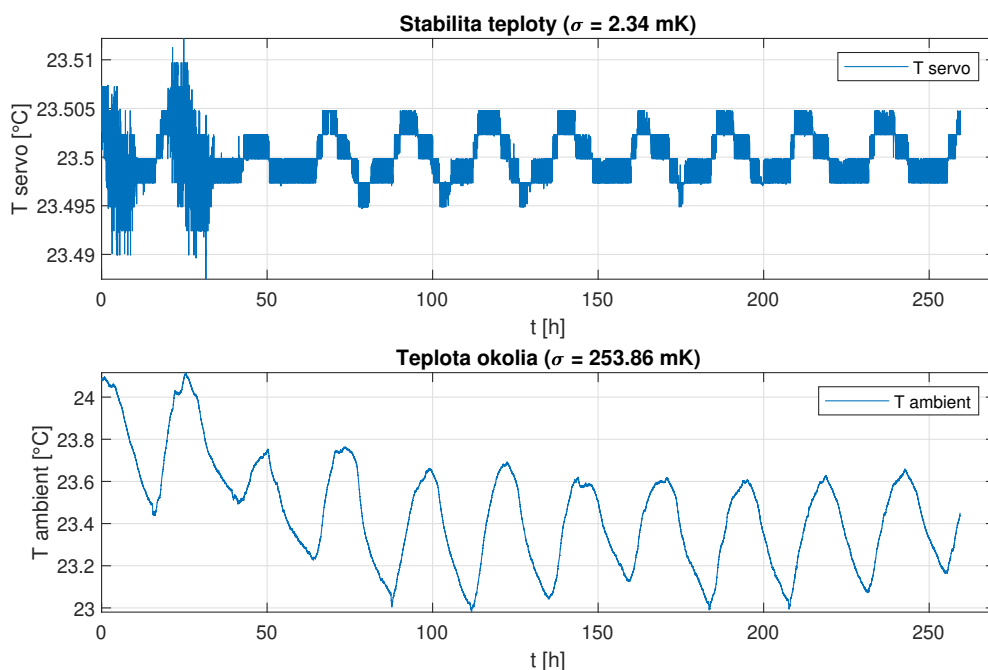
Podobne došlo aj k výraznému zníženiu závislosti teploty v komore na teplote okolia. Zatiaľ čo v pôvodnej komore bola veľkosť zmeny teplôt v komore približne 17.5-krát menšia ako veľkosť zmeny teploty okolia, v prípade novej komory boli zmeny vnútornej teploty 108.5, v prípade inej polohy senzorov 49.4-násobne menšie ako zmeny okolitej teploty. Ak je braná do úvahy horšia z týchto dvoch hodnôt, vychádza zlepšenie o cca 65%.

Taktiež možno pozorovať zmenšenie strednej hodnoty teplotného gradientu z  $-2.66$  K  $\cdot$  m $^{-1}$  na  $-845.1$  mK  $\cdot$  m $^{-1}$ . Toto však môže byť spôsobené rôznymi faktormi, ako menšie rozmery novej komory oproti pôvodnej a vplyvy teploty okolia.

V konečnom dôsledku je vidieť výrazné zlepšenie vlastností oproti riadeniu v pôvodnej komore.



Obr. 3.16: Teplotné podmienky v pôvodnej komore[14]



Obr. 3.17: Podmienky v novej teplotnej komore

### 3.5 Zhrnutie

V tejto časti bol popísaný postup návrhu riadenia teplotnej komory. Pre počiatkový návrh hodnôt P, I a D zložiek regulátora sa metóda Ziegler-Nichols ukázala ako užitočná. Keď sa vezme do úvahy jej jednoduchosť, výsledky z nej sú veľmi dobré.

V prípadoch ako je tento, kedy záleží na vysokej stabilite a presnosti, sa ukázalo však ako vhodné voliť nižšie hodnoty všetkých zložiek, aby bolo riadenie menej „agresívne“. Toto má na jednej strane za následok dosiahnutie lepšej presnosti, no na druhej strane sa predlžuje prechodový dej, ako bolo ukázané v kapitole 3.3.2. Je teda na mieste zvážiť priority a rozhodnúť sa podľa toho. V tomto prípade však dĺžka prechodového deja hrá menšiu úlohu ako stabilita teploty, takže voľba menších zosilnení jednotlivých zložiek je tu na mieste.

Pre získanie týchto hodnôt sa ukázalo byť užitočným vytvorenie jednoduchého modelu sústavy. Ako možno vidieť na obr. 3.8, hodnoty získané aj pomocou jednoduchého modelu vykazujú už pomerne dobré výsledky. Získanie zatiaľ najlepších výsledkov bolo potom dosiahnuté pozorovaním priebehov teploty a ručným doladovaním.

Pre zlepšenie prechodového deja a zároveň zachovanie dlhodobej stability sa javí ako prospešné použitie viacerých režimov. Pri prechode medzi nimi však treba dbať na plynulosť prechodu. Ak sa napríklad mení zosilnenie I zložky pri prechode z režimu ustálenia na režim dlhodobej stability, je nutné upraviť hodnotu naintegrovanú na integrátore, aby výstupná hodnota I zložky bola rovnako veľká aj po zmene režimu. Ak je táto korekcia zanedbaná, dôjde pri zmene režimu k prudkej zmene výstupného prúdu, čo má za následok opätovnú destabilizáciu teploty a predĺženie prechodového deja, čím použitie viacerých režimov stráca na význame.

## 4 Záver

Práca obsahuje popis postupu pri snahe o zlepšenie vlastností riadenia teploty v termostatizovanej komore.

Najprv prebehlo zoznámenie s pôvodným riešením termostatizovanej komory na ÚPT, jednotlivými modulmi a následne aj zoznámenie sa so zbernicou CANopen a jej princípmi. Bol vykonaný rozbor techník spätnoväzobného riadenia a na jeho základe bol zvolený ďalší postup.

Pre riadenie teploty v komore bol vytvorený experimentálny software na platforme Embarcadero C++ Builder.

Postupne bola vyriešená komunikácia s komorou cez CAN na základe požiadavok. Následne bola vytvorená trieda pre PID regulátor. Regulátor bol potom naladený postupným využitím metódy Ziegler-Nichols, následne boli veľkosti jednotlivých zložiek spresnené pomocou aplikácie „PID Tuner“, ktorá je dostupná v MATLAB Simulinku a tieto hodnoty boli nakoniec spresnené úpravami na základe sledovania priebehu.

Užívateľské rozhranie experimentálneho softwaru bolo upravené podľa požiadaviek, s cieľom vytvorenia užívateľského rozhrania, ktoré umožní pohodlne riadiť teplotu vo vnútri komory.

Dosiahnuté výsledky boli zhodnotené a porovnané s pôvodným stavom, čím sa ukázalo jasné zlepšenie stability teploty v komore. Na začiatku ladenia regulátora mal šum maximálnu amplitúdu 12.38 mK, zatiaľ čo na konci bol šum približne polovičný s amplitúdou 6.26 mK (viz 3.3.2). Tak isto sa zlepšila stabilita teploty. Tej hodnota bola  $\sigma = 2.34$  mK počas cca 260 hod. (viz. obr.3.12), resp. 4.81 mK počas cca 120 hod. s inou polohou senzorov (viz. obr.3.15), zatiaľ čo pri pôvodnom riešení bola smerodajná odchýlka počas cca 250 hod  $\sigma = 11.8$  mK. Čas od prvého dosiahnutia regulačnej odchýlky  $0.5^{\circ}\text{C}$  do ustálenia bol v priemere približne 0.39 hod viz(3.4.2).

Potenciálnym ďalším využitím práce a jej výsledkov môžu byť napríklad dedikované tepelne stabilizované komory pre rutinnú prevádzku ďalších prístrojov ako sú lasery alebo metrologické prístroje. Vylepšený algoritmus riadenia teploty bude taktiež využitý v súčasných komorách využívaných na testovanie komponentov pre laserovú interferometriu.



## 5 Zoznam použitej literatúry

- [1] SCHÖDEL, Rene; YACOOT, Andrew; LEWIS, Andrew. The new mise en pratique for the metre—a review of approaches for the practical realization of traceable length metrology from  $10^{-11}$  m to  $10^{-13}$  m. *Metrologia*. 2021, roč. 58, č. 5, s. 052002. Dostupné z DOI: 10.1088/1681-7575/ac1456.
- [2] RERUCHA, S.; HOLA, M.; OULEHLA, J.; LAZAR, J.; MIKEL, B.; O., Cip. Characterising and tackling thermally induced zero-drift in displacement measuring interferometry using temperature-controlled enclosure. *preprint*. 2024, roč. arXiv, s. 2404.06184. Dostupné z DOI: 10.1088/1361-6501/ad48a5.
- [3] LEVITON, D. B.; FREY, B. J. Temperature-dependent absolute refractive index measurements of synthetic fused silica. In: *Optomechanical Technologies for Astronomy*. 2006, zv. 6273, 62732K. Dostupné z DOI: 10.1117/12.672853.
- [4] KATSUHIKO, Ogata. *Modern control engineering*. Editorial Félix Varela, 2009.
- [5] NISE, Norman S. *Control Systems Engineering*. Sixth edition. John Wiley & Sons, Inc, 2011. ISBN 978-0470-54756-4.
- [6] ÅSTRÖM, Karl Johan. PID Controllers-Theory. *Design and Tuning*. 1995.
- [7] ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. *Advanced PID control*. ISA-The Instrumentation, Systems a Automation Society, 2006.
- [8] FRANKLIN, Gene F.; POWELL, David J.; EMAMI-NAEINI, Abbas. *Feedback control of dynamic systems*. Sixth edition. NY: Pearson, [2010]. ISBN 978-1-292-27452-2.
- [9] *Interferometry explained* [online]. [cit. 2023-12-18]. Dostupné z : <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>.
- [10] ŘEŘUCHA, Š.; BUCHTA, Z.; ŠARBORT, M.; LAZAR, J.; ČÍP, O. Detection of Interference Phase by Digital Computation of Quadrature Signals in Homodyne

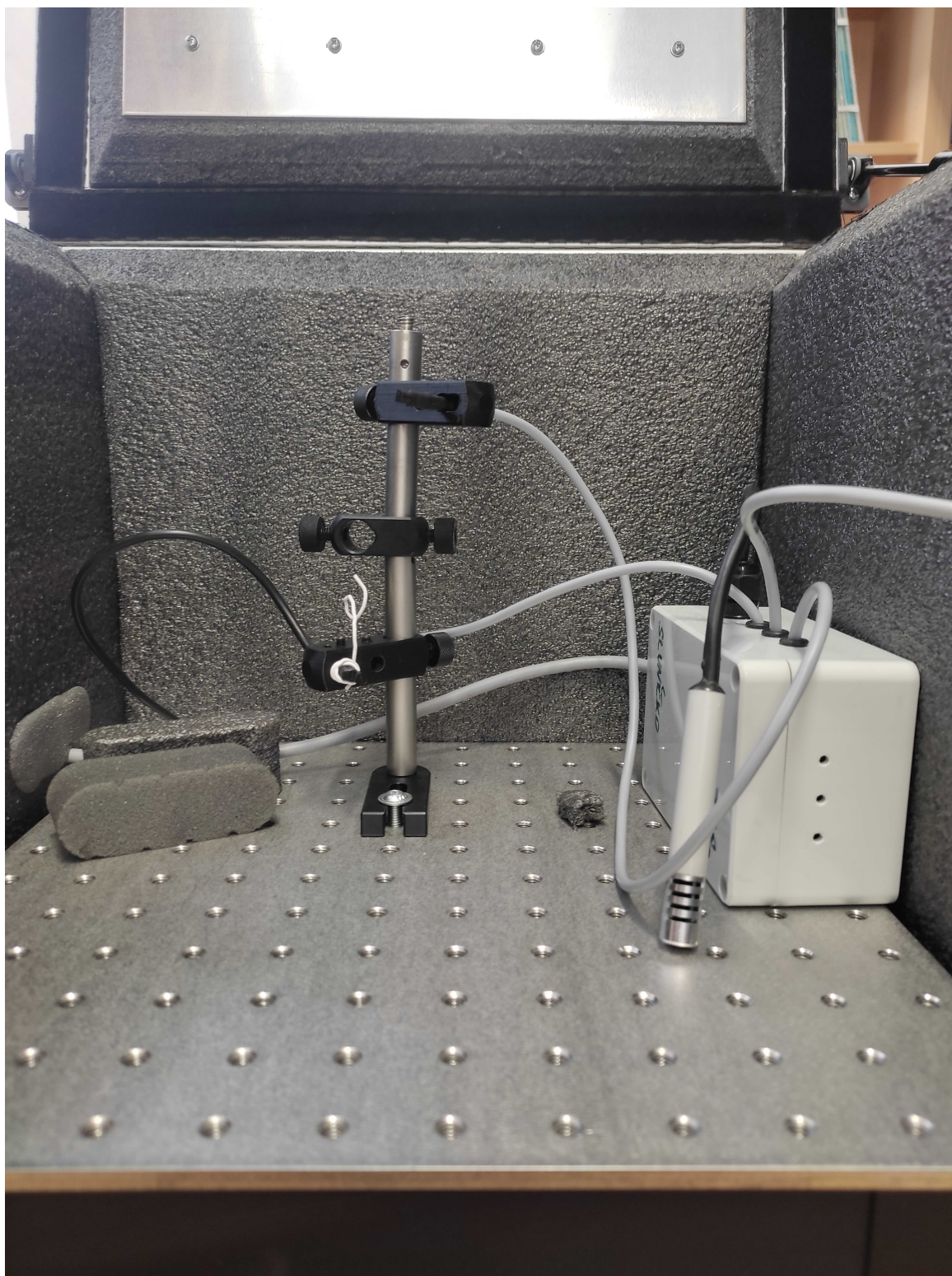
## 5 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- Laser Interferometry. *Sensors*. 2012, roč. 12, č. 10, 14095–14112. Dostupné z DOI: 10.3390/s121014095.
- [11] *XL-80 laser system*. Renishaw, 2023. Dostupné tiež z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/Brochure-XL-80-laser-measurement-system--133675?lang=en>.
- [12] *CANopen Guide (2024): Simplified Intro to Network Protocols* [online]. [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.autopi.io/blog/canopen-simple-introduction-explained/>.
- [13] ZELTWANGER, Holger. CANopen: The Higher Layer Protocol for Embedded Networks. *EE Times*. 2004. Dostupné tiež z: <https://www.eetimes.com/canopen-the-higher-layer-protocol-for-embedded-networks/>.
- [14] RERUCHA, S.; HOLA, M.; OULEHLA, J.; LAZAR, J.; MIKEL, B.; O., Cip. Thermally compensated common-path differential interferometer with reduced long-term zero-drifts. *Measurement Science and Technology*. 2024, roč. X, č. X, [accepted for publication].
- [15] *Thermoelectric Cooler*. Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd, [b.r.]. Č. TES1-12704. Dostupné tiež z: <https://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TES1-12704.pdf>. Rev 2.03.

## 6 Prílohy



Obr. 6.1: Vnútro teplotnej komory



Obr. 6.2: Umiestnenie senzorov v teplotnej komore

## 6 PRÍLOHY

```
// packet from interferometer - PDO1
if(it->ID == treg_id + 384){
    ODREG("treg_temp")->update((double)it->Data.ValueLong[0]*1e-6);
    ODREG("treg_curr")->update((double)it->Data.ValueLong[1]*1e-3);
}

// packet from edlen - PDO1
if(it->ID == edlen_id + 384){
    ODREG("edlen_rx1_temp1")->update((double)it->Data.ValueInt[0]*1e-3);
    ODREG("edlen_rx1_temp2")->update((double)it->Data.ValueInt[1]*1e-3);
    ODREG("edlen_rx1_temp3")->update((double)it->Data.ValueInt[2]*1e-3);
}

// packet from edlen - PDO2
if(it->ID == edlen_id + 640){
    ODREG("edlen_rx2_temp")->update((double)it->Data.ValueInt[0]*1e-3);
    ODREG("edlen_rx2_ph")->update((double)it->Data.ValueInt[1]);
    ODREG("edlen_rx2_pl")->update((double)it->Data.ValueInt[2]);
    ODREG("edlen_rx2_rh")->update((double)it->Data.ValueInt[3]);
}
```

Výpis 6.1: Kód na prijatie PDO paketu a zápis hodnôt do slovníka objektov

```
TDataBuffer cd;

cd.ValueLong [0] = current;
cd.ValueByte [4] = 0;
cd.ValueByte [5] = 1;
cd.ValueByte [6] = 1;
cd.ValueByte [7] = 0;

it.ID = can->getPdoRxChan(1);
it.Data = cd;

can->sendPDO(&it);
```

Výpis 6.2: Kód na zadanie hodnoty prúdu a odoslanie PDO paketu

## 6 PRÍLOHY

```
double P = kp*err;

if(P>pmax){ P = pmax;} //saturacia P zlozky
if(P<pmin){ P = pmin;}

integrator += err*pdt;
if (integrator*ki > pmax) {integrator = pmax; } //saturacia integratora
if (integrator*ki < pmin) {integrator = pmin; }
double I = ki*integrator ;

double der = (err - prev_err)/pdt;
double D = kd*der;
D = (1-a)*prev_D + D*a; // vypocet D zlozky s filtrovanim

if(D>pmax){ D = pmax;} //saturacia D zlozky
if(D<pmin){ D = pmin;}

double PID_out = P+I+D;

if(PID_out > pmax){ PID_out = pmax;} //saturacia vystupneho prudu
if(PID_out < pmin){ PID_out = pmin;}

prev_err = err;
prev_D = D;
```

Výpis 6.3: Kód na zadanie hodnoty prúdu a odoslanie PDO paketu

```

double setp = ODREG("treg_T_setpoint")-> get();
if (MainForm->SeqActive ->State) {
    double newSetp;
    double length;
    bool active;
    bool gradual;

    if (seqStart) {
        seqStartTime = ts();
        seqStart = false;
    }

    int t = ts();
    int controlCount = MainForm->Panel4->ControlCount+1;

    int indexL = seqRow*controlCount + MainForm->EditL1->ComponentIndex;
    int indexT = seqRow*controlCount + MainForm->EditT1->ComponentIndex;
    int indexGrad = seqRow*controlCount + MainForm->gradual1->
        ComponentIndex;
    int indexAct = seqRow*controlCount + MainForm->active1->ComponentIndex;

    TEdit *editL = dynamic_cast<TEdit *>(MainForm ->Components[indexL]);
    TEdit *editT = dynamic_cast<TEdit *>(MainForm ->Components[indexT]);
    TCheckBox *checkG = dynamic_cast<TCheckBox *>(MainForm ->Components[
        indexGrad]);
    TCheckBox *checkA = dynamic_cast<TCheckBox *>(MainForm ->Components[
        indexAct]);

    newSetp = StrToInt(editT->Text);
    length = StrToInt(editL->Text);
    gradual = checkG->State;
    active = checkA->State;
}

```

Výpis 6.4: Časť kódu z funkcie pre teplotnú sekvenciu. Táto časť slúži na získanie potrebných informácií pre vykonanie sekvencie z UI.

```

if (active) {
    if (t-seqStartTime<length) {
        if (gradual) {
            if (t-seqStartTime<1) { gradChStart = true; }
            gradChange(length ,newSetp);
        }
        else if(t-seqStartTime < 1 ){
            setp = newSetp;
            ODRREG("treg_T_setpoint")->update(setp);
        }
    }
    else {
        seqRow +=1;
        endSeq(length);
        seqStart = true;
        setpChange();
    }
}
else {
    seqRow +=1;
    endSeq(length);
    setpChange();
}
endSeq(length);

```

Výpis 6.5: Časť kódu z funkcie pre teplotnú sekvenciu. Táto časť slúži na samotnú zmenu setpointu podľa zadaného priebehu.



## 6 PRÍLOHY

```
if (pid->gradChStart) {  
    pid->gradChStart = false;  
    pid->startSetp = ODRÉG("treg_T_setpoint")->get();  
}  
double diff = temp - startSetp;  
double setp = ODRÉG("treg_T_setpoint")->get();  
  
setp += diff / (time);  
ODRÉG("treg_T_setpoint")->update(setp);
```

Výpis 6.6: Časť kódu slúžiaca na postupnú zmenu setpointu s lineárnym priebehom počas určeného časového intervalu