

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

Katedra experimentální fyziky



**Teplotní stabilizace polovodičových zdrojů světla**

Bakalářská práce

Jakub Orolín

2015

**UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI**  
**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

Katedra experimentální fyziky



**Teplotní stabilizace polovodičových zdrojů světla**

Bakalářská práce

Autor:	Jakub Orolín
Studijní program:	B1701 Fyzika
Obor:	Aplikovaná fyzika
Forma:	Prezenční
Vedoucí práce:	Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.
Termín odevzdání:	Srpen 2015

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Teplotní stabilizace polovodičových zdrojů světla“ vypracoval sám, pod vedením Mgr. Miroslava Ježka, Ph.D. s využitím zdrojů uvedených v seznamu literatury a souhlasím s jejím použitím pro potřeby katedry, včetně libovolné formy prezentace.

V Olomouci dne .....2015

Jakub Orolín.....

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval Mgr. Miroslavu Ježkovi, Ph.D. za jeho vedení a trpělivost, kterou při něm musel prokázat. Mé díky patří také Mgr. Michalu Dudkovi za rady, které mi poskytl v průběhu práce. Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mi svou podporou usnadňovali studium.

## **Bibliografická identifikace:**

Jméno a příjmení autora:	Jakub Orolín
Název práce:	Teplotní stabilizace polovodičových zdrojů světla
Typ práce:	Bakalářská
Pracoviště:	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce:	Mgr. Miroslav Ježek Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2015
Počet stran:	30
Jazyk:	Český

## **Abstrakt**

Provozní parametry polovodičových zdrojů světla závisí mimo jiné na jejich teplotě. Ve své práci budu zkoumat projevy změny teploty na tyto parametry a následné možnosti stabilizace teploty. Zkonstruuji teplotní kontrolér, který k teplotní stabilizaci využívá metodu digitálního zpracování signálu. Vyladím parametry digitálního zpracování na optimální provozní hodnoty a otestuji stabilizační možnosti kontroléru. Teplotní kontrolér dále využiji pro biliární řízení teploty polovodičového zdroje světla.

**Klíčová slova:** polovodičové zdroje světla, teplotní stabilizace, digitální zpracování signálu.

## **Bibliographical identification:**

Autor's first name and surname:	Jakub Orolín
Title:	Temperature stabilization of semiconductor light sources
Type of thesis:	Bachelor
Departement:	Departement of Experimental Physics
Supervisor:	Mgr. Miroslav Ježek Ph.D.
The year of presentation:	2015
Number of pages:	30
Language:	Czech

## **Abstract**

Operating parameters of semiconductor light sources depends on the temperature. In my work, I will examine influence of temperature changes on these parameters and, further, the possibility of temperature stabilization. I will construct a temperature controller, using the methods of digital signal processing, particularly a microcontroller driven PID regulator. I will optimize parameters of the control loop and test its stability. Further, the device will be used for bipolar temperature control of semiconductor light sources.

**Keywords:** semiconductor light sources, temperature stabilization, digital data processing.

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Metody a použité prvky.....</b>	<b>3</b>
2.1	Schéma teplotního kontroléru.....	3
2.2	Teplotní senzory.....	3
2.3	Termoelektrický článek.....	5
2.4	PID regulace.....	5
2.5	Mikrokontrolér a převodníky.....	6
<b>3</b>	<b>Konstrukce.....</b>	<b>8</b>
3.1	První prototyp.....	8
3.2	Druhý prototyp.....	10
<b>4</b>	<b>Testování a měření.....</b>	<b>13</b>
4.1	Teplotní nestabilita u polovodičových diod.....	13
4.2	Ladění a měření na prvním prototypu.....	14
4.3	Ladění a měření na druhém prototypu.....	17
<b>5</b>	<b>Shrnutí.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Zdroje.....</b>	<b>24</b>

## 1 Úvod

Teplotní stabilizace se využívá v mnoha různých technických aplikacích, ať už jako pouhý bezpečnostní prvek nebo ve spojitosti se zachováním parametrů spojených s konstantní teplotou. V optoelektronických aplikacích jsou teplotní kontroléry prakticky nezbytné, běžně se zde vyskytuje teplotní stabilizace detektorů, které chrání detektor před zkreslením výsledků způsobeným změnou detekčních vlastností samotného detektoru vlivem teploty. Příkladem může být stabilizace CCD senzorů využívaných v optických spektrálních analyzátoch pro snížení optického šumu. Další problematikou je teplotní stabilizace polovodičových zdrojů světla, teplota zde působí na krystalovou mřížku a následným vlivem roztažnosti se mění šířka zakázaného pásu PN přechodu. Ten přímo ovlivňuje vlnovou délku vyzařovaného světla, která se mění v závislosti na teplotě diody. Tím je také ovlivněn prahový proud diody nebo například optický výkon. Teplotní stabilizace může být jak pasivní, kdy je pouze zajištěn dostatečný odvod tepla, tak i aktivní, kdy se na chlazení podílí jiný samostatný systém. Možností aktivního chlazení je nepřeberné množství. Běžně používaným je například jednoduché chlazení vzduchem nebo pro aplikace s vyšším výkonem kapalinové chladiče. Termoelektrické chlazení se využívá spíše pro aplikace pracující s nižším výkonem, umožňuje ale bipolární a přesnější řízení teploty.

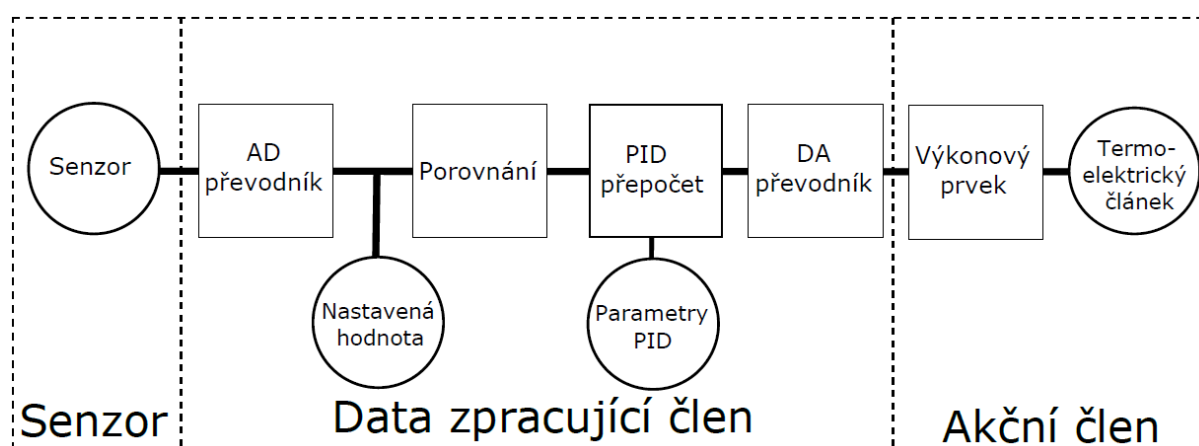
Cílem této práce je zkonstruovat teplotní kontrolér pracující s digitálním vyhodnocováním signálu. Základem bude jednočipový počítač (mikrokontrolér), který bude přes analogově digitální převodník vyhodnocovat data ze senzoru. Na základě těchto dat bude aktivována výkonová část, která bude napájet Peltierův článek. Metoda digitálního řízení má oproti tomu analogovému mnoho výhod. Způsob vyhodnocování teploty je volitelný a s tím je spojená i možnost úpravy a vyhodnocování průběžných výsledků. Například možnost řízení náběhu a sestupu teploty nebo zpracovávání údajů z více senzorů najednou. Velkou výhodou by bylo i bipolární řízení teploty, které není u běžných kontrolérů vždy přítomné. Na druhou stranu nevýhodou digitálního řízení je diskretizace vstupních a výstupních signálů, která způsobuje snížení rozlišení. Výhody a problémy digitálního řízení budu v práci demonstrovat na konkrétních měřeních.



## 2 Metody

### 2.1 Schéma teplotního kontroléru

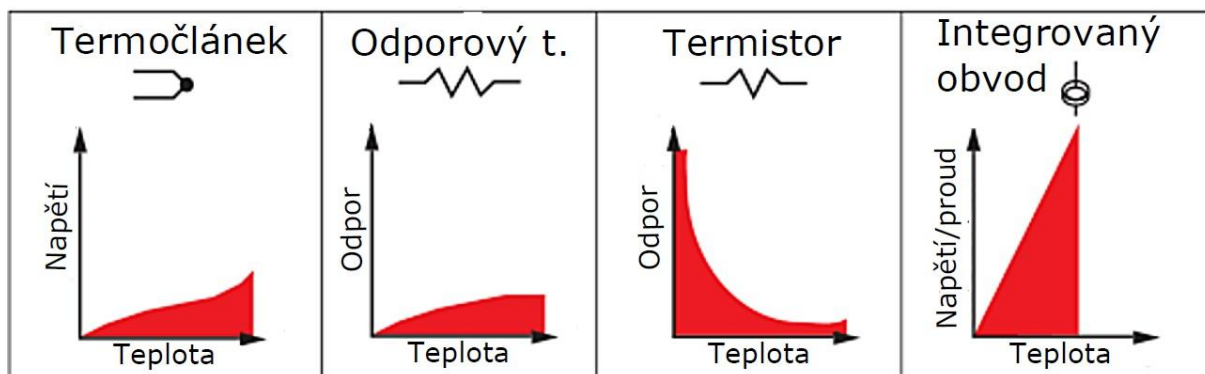
Obecné schéma teplotního kontroléru lze rozdělit do několika základních částí. První část, senzor, snímá teplotu tělesa a posílá ji do druhého, data zpracujícího prvku. Ten převádí získané údaje na zpracovatelnou hodnotu a porovnává získaná data s nastavenou hodnotou. Pomocí regulační PID smyčky (viz dále) přepočítává vstupní chybový signál, kdy chyba signálu je určena vzdáleností od nastavené hodnoty pracovního bodu, na výstupní opravný signál. A dále ho ve vhodném měřítku převádí na napěťový výstup. Poslední částí je akční člen, kde výkonový prvek transformuje napětí do použitelných hodnot a napájí termoelektrický článek, který podle potřeby hřeje či chladí cílový objekt.



Obrázek 1- Schéma teplotního kontroléru.

### 2.2 Sensory teploty

Teplotních senzorů existuje celá řada a fungují na mnoha různých principech. V elektronických aplikacích jsou však nejběžnější tři skupiny, a to odporové, integrované a termoelektrické teploměry. Odporové teploměry se dále dělí na kovové a polovodičové, neboli termistory. Každý z těchto senzorů má své klady i zápory a proto je potřeba pro každou aplikaci pečlivě vybrat tu nejvhodnější možnost [4]. Pro účely mé práce byla nejdůležitější relativní přesnost senzoru a následně vhodné zbylé parametry potřebné k praktickému využití, jako například rozměr samotného senzoru. Pro představu zde přikládám charakteristiku závislosti odporu na teplotě pro jednotlivé senzory.



Obrázek 2 - Charakteristika teplotních senzorů [13].

Termočlánek, stejně jako Peltierův článek, fungují na principu Seebeckova jevu. Jejich rozlišovací přesnost je dosti nízká, kolem 1 K a proto se v aplikacích vyžadujících vysokou přesnost použít nedají.

Odporový kovový teploměr, na rozdíl od termočláneku, disponuje vysokou rozlišovací přesností, má velký měřicí rozsah a jeho odporová závislost na teplotě je relativně lineární. Jedná se tedy o velmi přesné teplotní čidlo. Nejčastěji se vyrábí z platiny a to v sto ohmovém nebo tisíci ohmovém provedení. Právě ony odporové hodnoty jsou jednou z nevýhod odporového teploměru, lze je totiž velice snadno ovlivnit, například dlouhým přívodním kabelem nebo spojem do kterého se senzor zapojuje. Tato nevýhoda se projevuje u klasického dvoudrátového zapojení. Existuje ovšem zapojení čtyřdrátové neboli Kelvinovo, kde je jeden pár připojen k voltmetru, zatímco druhý pár k ampérmetru. Kombinací údajů z obou měřičů lze určit odpor teploměru. Dalším omezením jsou jeho parametry, teploměr se vyrábí z kovových cívek na porcelánovém jádře, a tudíž možnosti zmenšování senzoru mají své limity.

Termistory poskytují vyšší rozlišovací schopnost než odporové kovové teploměry, lze s nimi snadno měřit s přesností na platná čtyři desetinná místa. Nejsou však lineární jak je vidět i na obrázku 2 a jejich absolutní přesnost je velmi špatná oproti odporovým kovovým teploměrům. Ani jejich měřicí rozsah není větší než u odporových teploměrů. Přesto se jedná o často používané senzory a to i v oblasti teplotní stabilizace. Důvodem k tomu může být kromě nízké ceny i malé rozměry těchto senzorů a možnost jednoduchého dvoudrátového zapojení.

Integrované měřicí obvody využívají ke své funkci závislost polovodičových prvků na teplotě. Jejich hlavní výhodou je linearita a jednoduchá ovladatelnost. Některé digitální obvody dokonce posílají na svůj výstup už samotnou hodnotu teploty a není třeba nic přepočítávat. Jsou tak uživatelsky velice přístupné. Pro přesnější aplikace se však nehodí, neboť jejich relativní přesnost je velice nízká, typicky 0,1°C

### Senzor LM35

První senzor, který jsem vybral k vyhodnocování teploty, byl LM35DT [5]. Jedná se o běžně používaný integrovaný obvod, který převádí teplotu na napětí. Senzor je jednoduchý na zapojení a výstupní napětí přímo odpovídá teplotě, přičemž je celá závislost lineární. Tento senzor jsem použil pouze u prvního prototypu, protože není vhodný pro zamýšlené aplikace.

Jeho rozměry jsou nepraktické a hlavně rozlišení senzoru není dostatečné a pohybuje se v řádu půl stupně. Senzor jsem tedy využil hlavně k otestování možností Arduina vyčítat teplotu a dále ji zpracovávat.

### **Senzor 10k $\Omega$ NTC termistor**

Senzor, který jsem zvolil následně je 10k $\Omega$  NTC termistor B57551G1 od firmy Epcos [6]. Jedná se odporový polovodičový senzor. Tento senzor se běžně používá u komerčních tepelných kontrolérů a jeho hlavní výhodou je přesnost a malé rozměry. V tomto případě mluvíme o přesnosti relativní. Absolutní přesnost je bohužel dost nízká, plus mínus jedno procento a proto ani náš kontrolér nelze nastavit přesně na konkrétní teplotu. Další nevýhodou, která ztěžuje práci s termistory je jejich nelineární závislost, neboť přepočty dat už nemusí být tak přesné jako naměřený odpor.

### **Pt100**

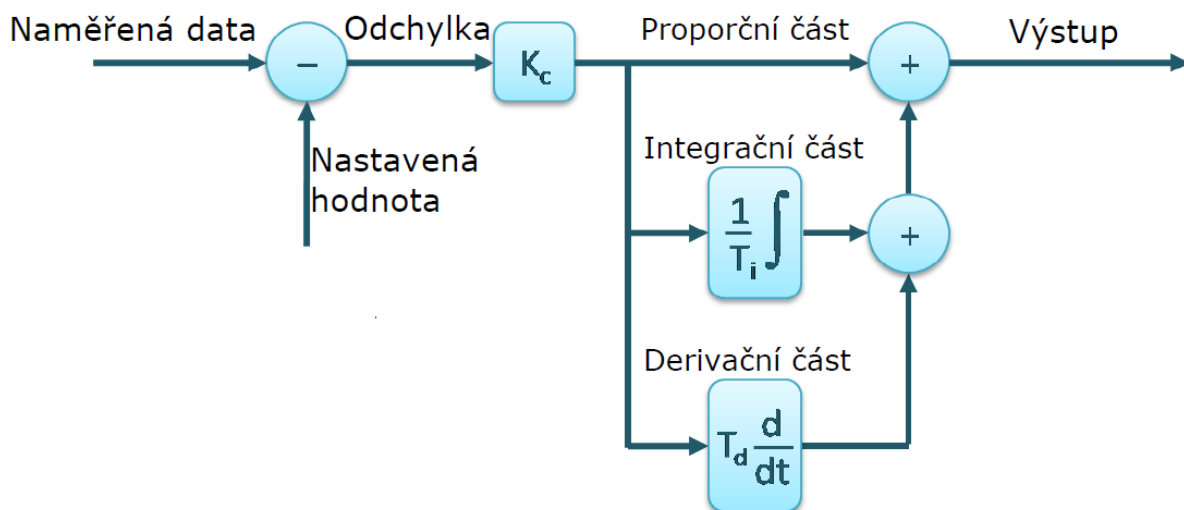
Pt100 je klasický odporový kovový senzor s odporem 100  $\Omega$  při 0°C, jedná se o platinovou spirálu na keramickém jádru, která mění svůj odpor v závislosti na teplotě. Tento senzor jsem využíval při vyhodnocování funkčnosti prvního prototypu. Běžně se používá v různých měřicích aplikacích, právě kvůli své přesnosti a měřicímu rozsahu. Jako senzor teplotního kontroléru se však nehodí právě kvůli rozměrům a čtyřdrátového zapojení, které je k dosažení přesnosti jako u termistoru nezbytné.

## **2.3 Termoelektrický článek**

Chlazení polovodičové diody bude zprostředkovávat termoelektrickým článkem, konkrétně Peltiérův článek RC 3-6 od firmy Marlow industries [9] s odporem 0,5  $\Omega$  a výkonem 14 W a rozměry 2 cm x 2cm. Jedná se o součástku, která pracuje na principu Seebeckova jevu a v podobných aplikacích se běžně používá. Jedná se o nejvhodnější možnost chlazení pro systémy s nižším výkonem. Jeho hlavními přednostmi jsou rozměry, které lze vybrat přesně podle potřeb vybrané diody, vysoká přesnost a dlouhá životnost.

## **2.4 PID řízení**

Jedná se zpětnovazební kontrolní systém, který je určen k vyhodnocování odchylky vstupní hodnoty od nastavené hodnoty a výpočtu opravné hodnoty na výstupu. Odchylku vyhodnocuje pomocí tří samostatných bloků, proporcionálního, integračního a derivačního. Tyto bloky nejsou na sobě závislé a jsou tedy podle potřeby systému i separovatelné. Každý z bloků má kromě dané funkce i váhovou konstantu. Tyto konstanty určují, jak se který blok podílí na výsledném vyhodnocení odchylky. Proto je třeba hodnoty těchto konstant vybírat pečlivě. Jsou-li totiž špatně navolené, nemusí stabilizace pracovat správně. Stabilizace může probíhat pomalu, teplota může dlouho překmitávat nebo dokonce oscilovat.



Obrázek 3 - Schéma PID řízení [14].

## 2.5 Řídící prvek

### Mikrokontrolér

Jako řídicí prvek jsem vybral mikrokontrolér ATmega328P [3] s pamětí 32 kB a taktováním na frekvenci 16MHz, s pracovním napětím 5 V, takže jej lze napájet i s USB portu. Mikrokontrolér je instalovaný na vývojové desce Arduino UNO [2]. Jedná se o základní produkt firmy Arduino, který je určen pro jednoduché elektronické aplikace. Mezi hlavní přednosti Arduina UNO patří jeho snadné programování a také velké množství volně dostupných knihoven pro různé funkce. Tato deska obsahuje kromě mikrokontroléru také USB zavaděč, který zprostředkovává softwarový přístup. Dále nabízí také napěťové reference 3,3 V a 1 V, 10 bitový analogově digitální převodník a 8 bitové PWM [2]. Za zmínku také stojí vývojové prostředí, které je k desce k dispozici a které umožňuje velice snadné zavedení a ovladatelnost programové části kontroléru.

### PWM

Modulace délky pulzu je běžný způsob řízení výkonu u různých elektronických aplikací. Princip tohoto řízení spočívá ve spínání napájení a jeho vypínání v takovém poměru, kolika procent výkonu z maximální hodnoty chceme dosáhnout. Přesnost takového řízení pak záleží hlavně frekvenci spínání a rozlišení délky sepnutí, ta je udávána počtem bitů. Nejběžnější je jeho využití u ovládání elektromotorů. V mém případě jsem využil PWM, který je vestavěn v Arduinu [2]. Zprovoznění tohoto PWM bylo poměrně snadné a bylo tak jasnou volbou pro řízení výkonu v prvním prototypu.

## **Analogově digitální převodník ADS1115**

Jedná se o čtyřkanálový 16 bitový analogově digitální převodník [7], který jsem využil k vyčítání teploty z termistoru. Velkou výhodou je, že firma Adafruit tento převodník prodává instalovaný na vývojové desce, jako přídatný blok k Arduino. Díky tomu lze převodník snadno zapojit a zprovoznit sériovou I2C komunikací. Díky dostupné knihovně pro Arduino jej pak lze i snadno ovládat. Další důležitou výhodou je nastavitelný zisk převodníku, který umožní snadné přizpůsobení rozsahu a tedy lepší výslednou přesnost.

## **Digitálně analogový převodník AD420**

Tento 16 bitový digitálně analogový převodník [8] jsem u druhého prototypu využil k lineárnímu řízení napájení místo PWM. Lineární řízení umožňuje spojitou kontrolu napájení termoelektrického článku. Převodník komunikuje s mikrokontrolérem pomocí třídrátové sériové sběrnice SPI.

Nabízí se logický dotaz, proč místo lineárního řízení nepoužít opět PWM s lepším rozlišením. Výhody lineárního řízení jsou vysoká přesnost. Zatímco u PWM je to snadné zapojení a ovládání výstupního signálu. Nevýhodou je, že spínání PWM při vysokých frekvencích by mohlo generovat elektromagnetické pole, které by vytvářelo šum na stabilizované diodě.

## **Programová část**

Veškeré ovládání teplotního kontroléru zajišťuje mnou napsaný program. Tento program jsem psal ve specifické verzi programovacího jazyku C, která je určena přímo pro produkty firmy Atmel a pro jehož psaní a nahrávání do mikrokontroléru má firma Arduino vlastní vývojové prostředí.

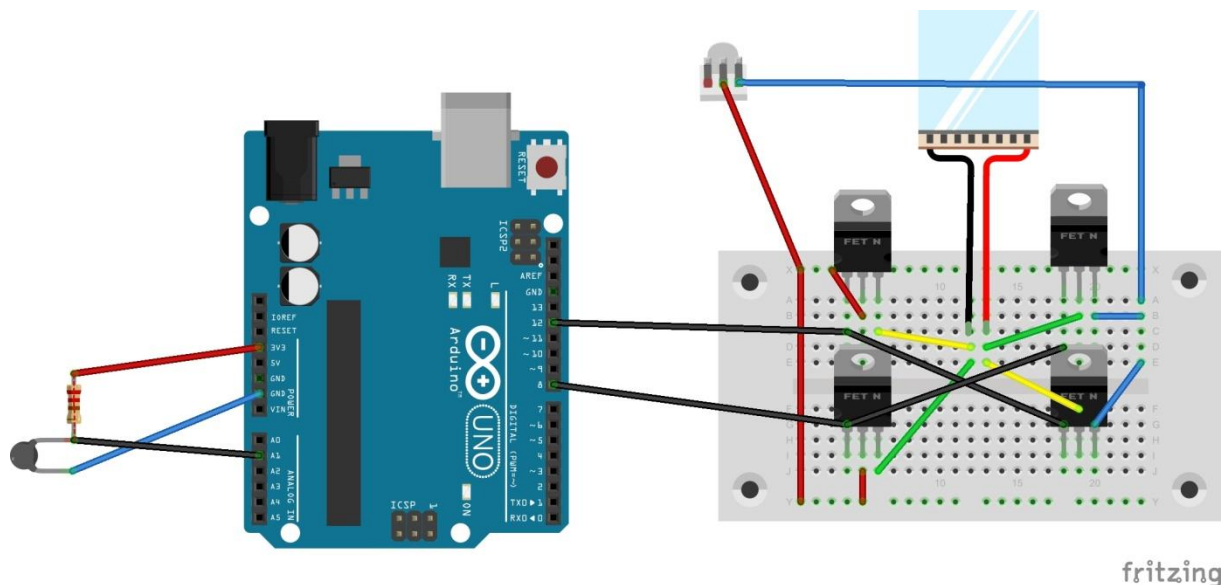
Program zajišťuje vyčítání dat z analogově-digitálního převodníku a jejich zpracování pomocí PID smyčky, pro kterou je v programu předem vytvořená funkce. Další funkcí je posílání výsledných hodnot PID smyčky do digitálně-analogového převodníku. Tento program se cyklicky opakuje a průběžně jsou z něj posílány data přes USB sběrnici do počítače.

## **3 Konstrukce**

### **3.1 První prototyp**

Princip prvního kontroléru je založen na vestavěné funkcionalitě vývojové desky Arduino. Konkrétně využívá vestavěný analogově-digitální převodník a modulaci délky výstupního pulzu (PWM).  $10\text{ k}\Omega$  NTC termistor, který s  $10\text{ k}\Omega$  rezistorem tvoří dělič napětí je připojen pouze k analogovému vstupu a zemi Arduina. Dělič samotný je napájen z napěťové reference poskytnuté opět Arduinem, v tomto případě jde o napětí 3,3 V. Arduino zpracovává přijatý signál a zpracovává jej PID smyčkou. Zpracovaný signál nastavuje hodnotu PWM, které spouští napájení Peltierova článku. Pro zajištění bipolárnosti napájení je zapotřebí zapojit Peltierův článek přes H-můstek. Ten jsem realizoval pomocí čtyř N-Mosfet tranzistorů typu IRLB8743.



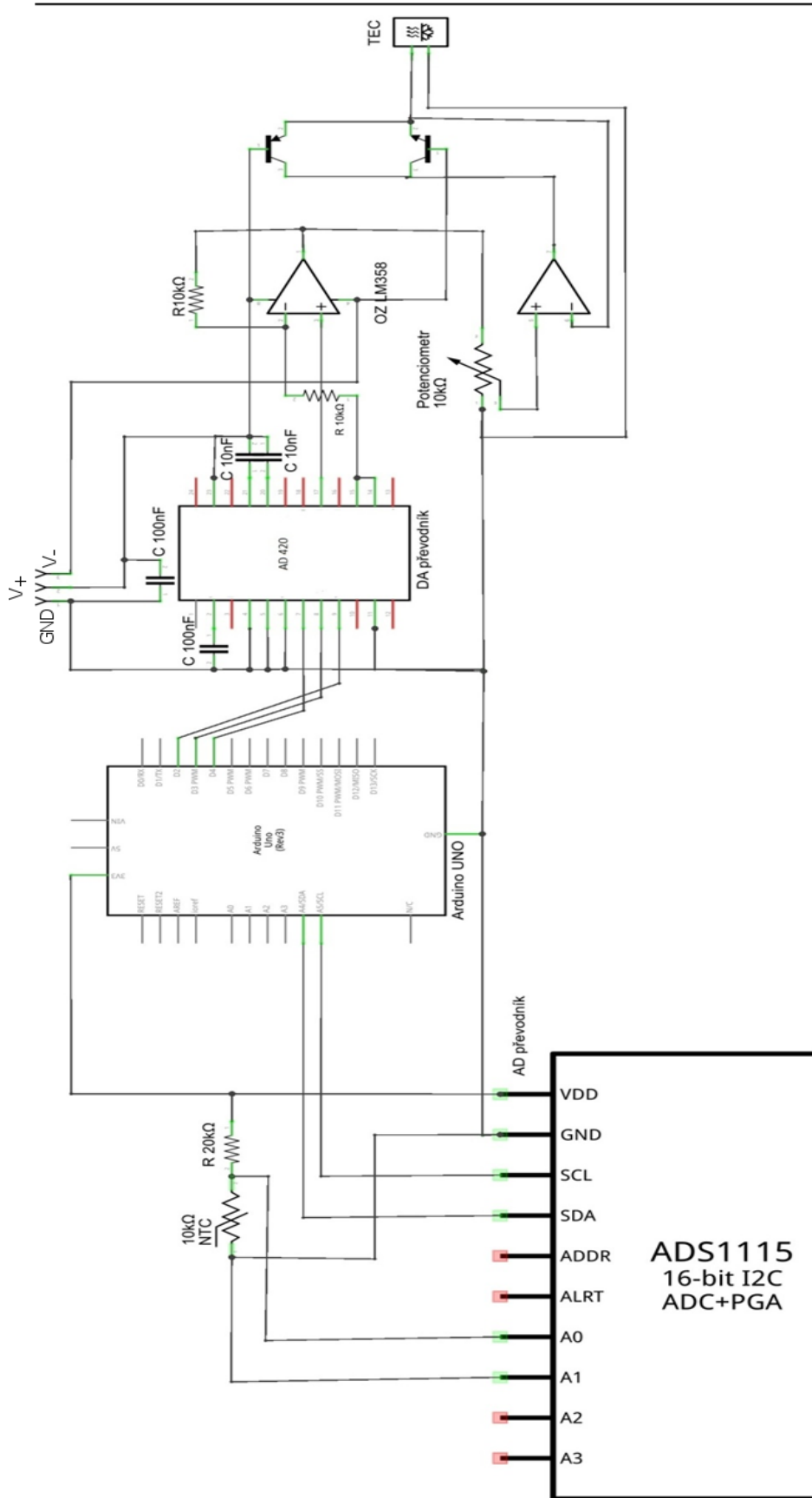


Obrázek 5 - Zapojení prvního prototypu.

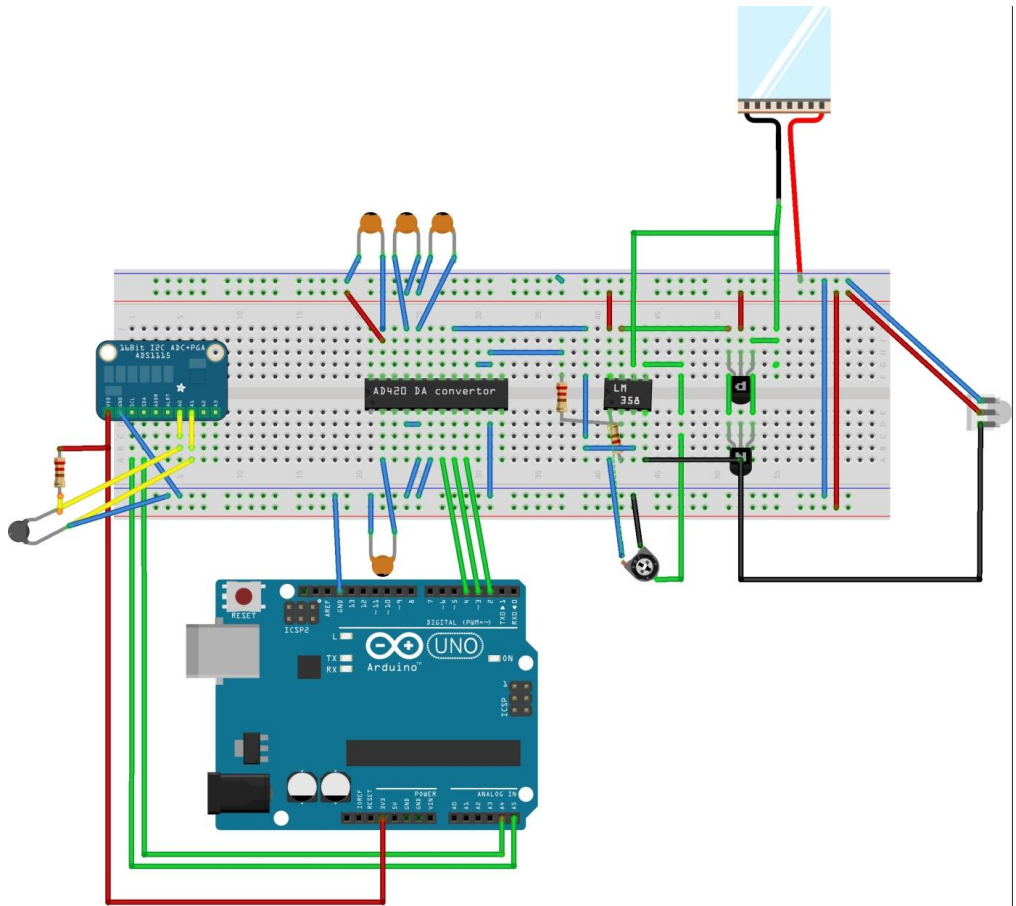
### 3.2 Druhý prototyp

Snímání teploty u druhého prototypu zajišťuje opět 10 k $\Omega$  NTC termistor připojený přes napěťový dělič k analogově-digitálnímu převodníku. Hodnota rezistoru v napěťovém děliči je 20 k $\Omega$ . Tento odpor je zvolen záměrně, aby bylo možno co nejlépe využít rozsahu analogově-digitální převodníku, jehož rozsah je při nastaveném dvojnásobném zisku do 2,045 V. Získané hodnoty jsou zpracovávány mikrokontrolérem, kde projdou přes PID smyčku a je z nich vypočítána vhodná hodnota pro digitálně-analogový převodník. Rozsah převodníku je mezi 0 V až 5 V, což neumožňuje přímo napájet Peltierův článek podle našich představ. Proto je pomocí operačního zesilovače LM358P od firmy Texas Instruments [15] a referenčního napětí 5 V, vyvedeného z převodníku, signál transformován na rozsah od -5 V do 5 V. Toto napětí je pro potřeby Peltierova článku zbytečně vysoké a jeho použitím by byla ztracena značná část rozsahu digitálně-analogového převodníku. Abych zmenšil rozsah, připojil jsem výstup z operačního zesilovače na potenciometr, který zde slouží jako dělič napětí. Jeho nastavením lze napěťový rozsah libovolně upravovat a celé zařízení tak získává na univerzálnosti, neboť pro jakýkoliv Peltierův článek nyní stačí nastavit jen vhodný rozsah napětí. Výstup z potenciometru pak vede upravené napětí do napěťového sledovače. Ten je následován dvojicí výkonových tranzistorů typu Darlington (jeden NPN, druhý PNP), které následně napájejí Peltierův článek. Z výstupů tranzistorů je také vyvedená zpětná vazba pro napěťový sledovač, viz schéma na obrázku 6.



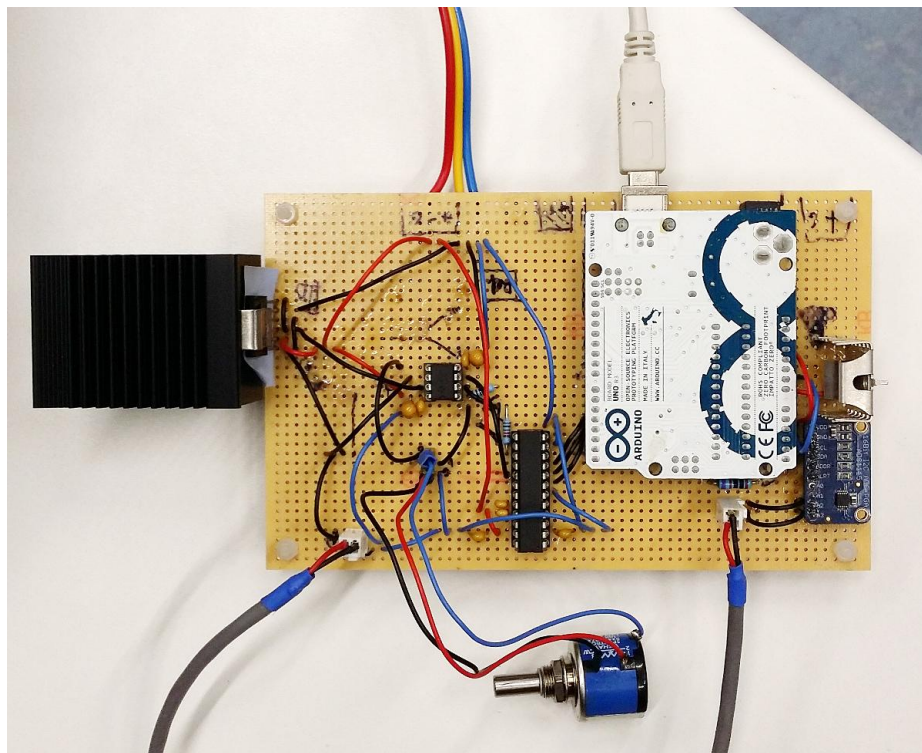


Obrázek 6 - Schéma druhého prototypu.



fritzing

Obrázek 7 - Zapojení druhého prototypu.



Obrázek 8 - Fotografie zapojeného kontroléru.

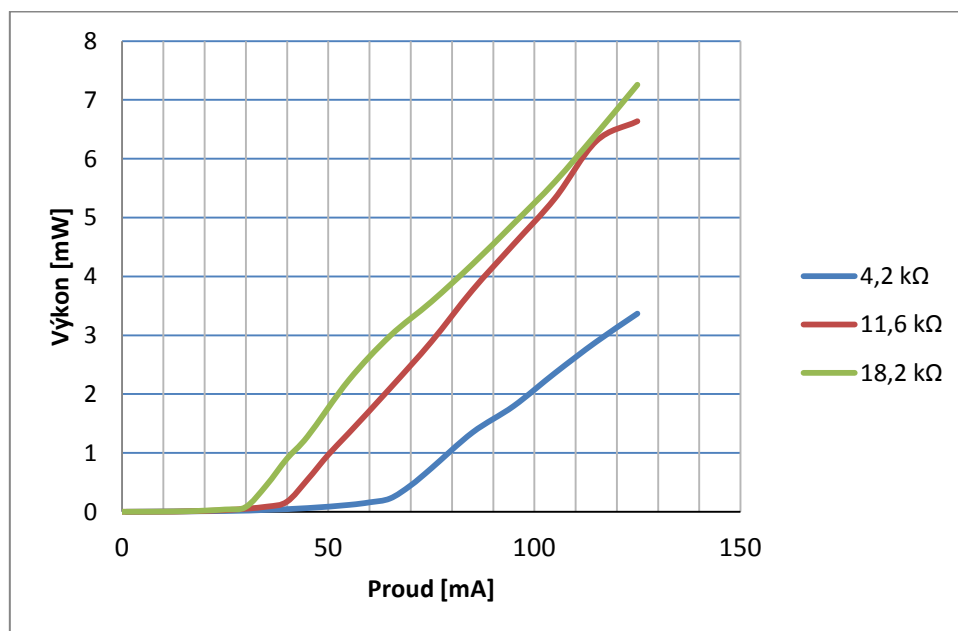
## 4 Testování

### 4.1 Tepelná nestabilita polovodičových diod

Polovodičové laserové diody při své činnosti produkují odpadní teplo, které má přímý vliv na další funkci diody [1]. V první řadě při přehřívání klesá životnost diody. Dalším parametrem, který je ovlivněn teplotou, je prahový proud, ten roste s teplotou. Třetím parametrem závislým na teplotě je směrnice závislosti optického výkonu na čerpacím proudu. Kombinací posledních dvou zmíněných efektů může být změna optického signálu s teplotou opravdu výrazná a je na ní třeba brát zřetel. Tento předpoklad jsem se rozhodl ověřit měřeními na laserové diodě.

Sestava experimentu byla následující: laserová dioda QFLD-810-10S připojená přes jednomódové optické vlákno (Nufern 780HP) ke kolimátoru s asférickou čočkou s ohniskovou vzdáleností 11 mm. Laserový svazek byl následně vyveden do volného prostoru, kde byl měřen jeho výkon přístrojem PM100D (Thorlabs) za použití měřící hlavy S120VC. Teplota laserové diody byla po celou dobu tepelně i proudově stabilizovaná pomocí komerčních kontrolérů TED200C a LDC202C (Thorlabs).

Na obrázku 9 je vidět výsledek měření P-I charakteristiky pro laserovou diodu. Jedná se o závislost generování optického výkonu na čerpacím elektrickém proudu. Jak je vidět potvrdil se výše zmíněný předpoklad posunu prahového proudu a pro větší teplotní rozdíl je vidět i odlišná směrnice P-I charakteristiky.

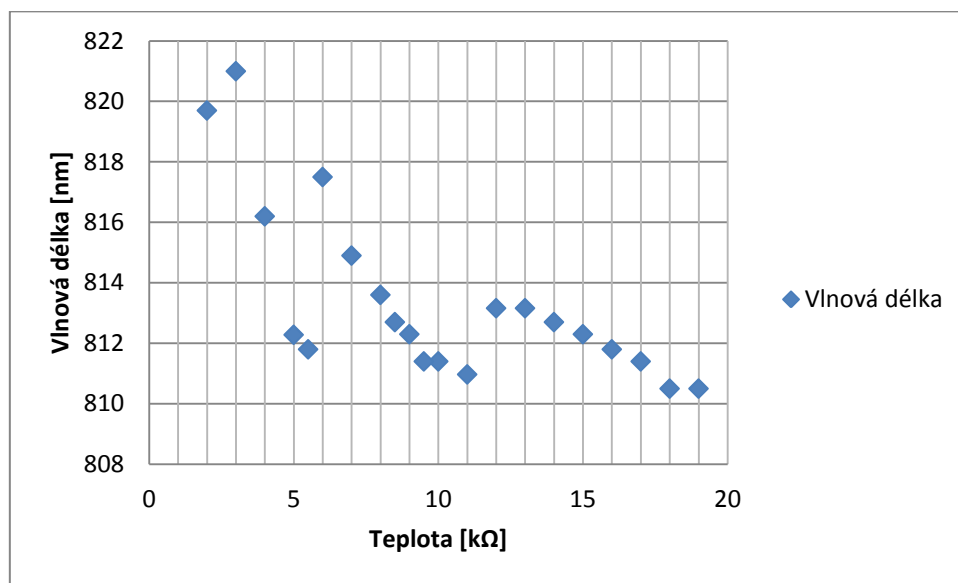


Obrázek 9 - P-I charakteristika laserové diody.

Další parametr, který se mění s teplotou, je vlnová délka světla laserového svazku. Vlnová délka se v určitých oblastech mění lineárně, poté dojde ke skoku a opět dochází k lineární změně. Při běžných provozních teplotách je tato lineární změna přibližně 0,3 nm na 1 K [1]. To je způsobeno vlivem teploty na krystalovou mřížku diody a s tím spojenou změnou šířky zakázaného pásu polovodičového materiálu. Provedl jsem opět zkušební měření.

Sestava experimentu: laserová dioda QFLD-810-10S připojená přes jednomódové optické vlákno (Nufern 780HP) ke kolimátoru s asférickou čočkou s ohniskovou vzdáleností 11 mm. Svazek byl následně vyveden do volného prostoru, kde dopadal na čelo jednomódového optického vlákna vedeného do spektrometru HR2000+ od firmy Ocean Optics. Dioda byla stejně jako v předchozím experimentu po celou dobu svého provozu stabilizována a to stejnými kontroléry.

Tentokrát jsem při konstantním čerpacím proudu 80 mA měnil teplotu, a jak lze vyčíst z obrázku 10, vlnová délka laserového svazku se mění opravdu výrazně. Za povšimnutí také stojí skokové změny vlnové délky. Jedná se o přeskoky mezi laserovými módy.



Obrázek 10 - závislost vlnové délky na teplotě.

Všechny výše zmíněné problémy jsou pádným důvodem, proč tepelně stabilizovat všechny polovodičové zdroje světla v aplikacích, kde je potřeba vysoké stability, přesnosti a opakovatelnosti měření.

## Prototypy

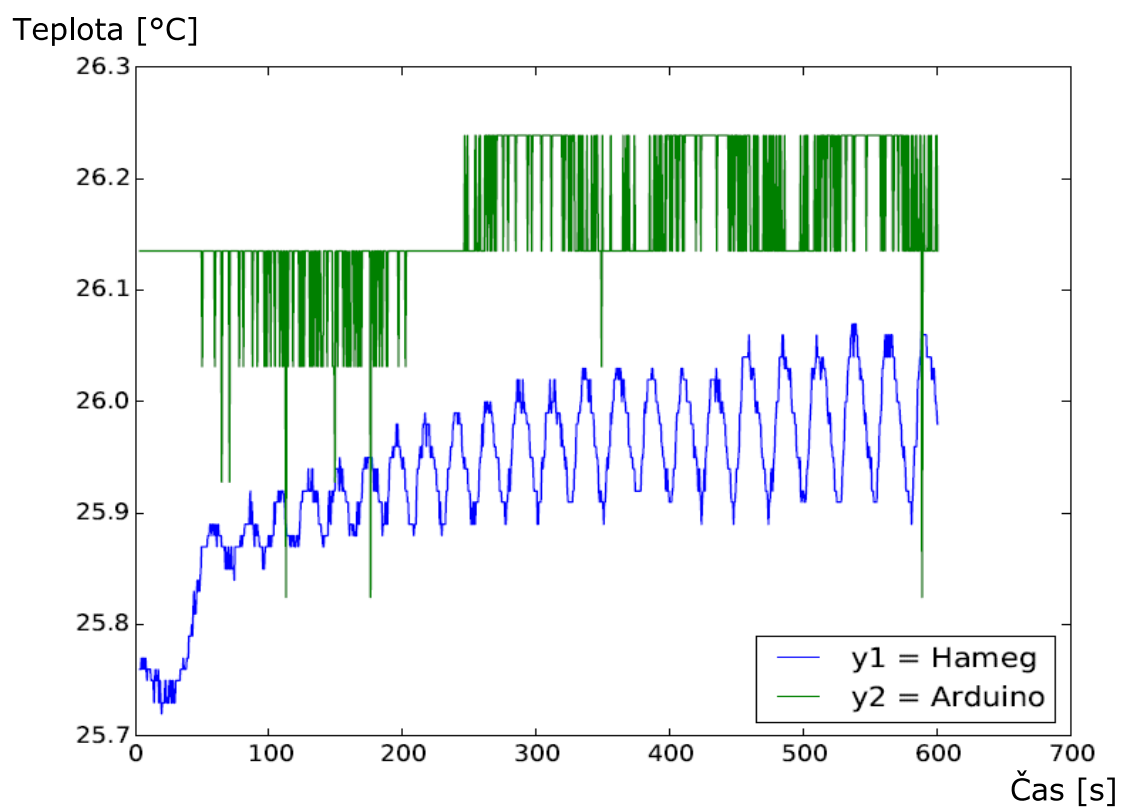
K testování jednotlivých prototypů jsem napsal v jazyce Python program, který vyčítá a přepočítává data z Arduina a také z nezávislého multimetru. Použil jsem multimetr Hameg 8112-3 [11], který umožňuje za použití platinového odporového detektoru Pt100 [12] měřit s přesností na 6 platných míst. Platinový detektor je připojen pomocí čtyřdrátového zapojení. Toto zapojení umožňuje výpočtem z proudu a napětí na senzoru určit přesně jeho odpor a eliminovat tak chybu vzniklou připojením senzoru.

### 4.1 Ladění a měření na prvním prototypu

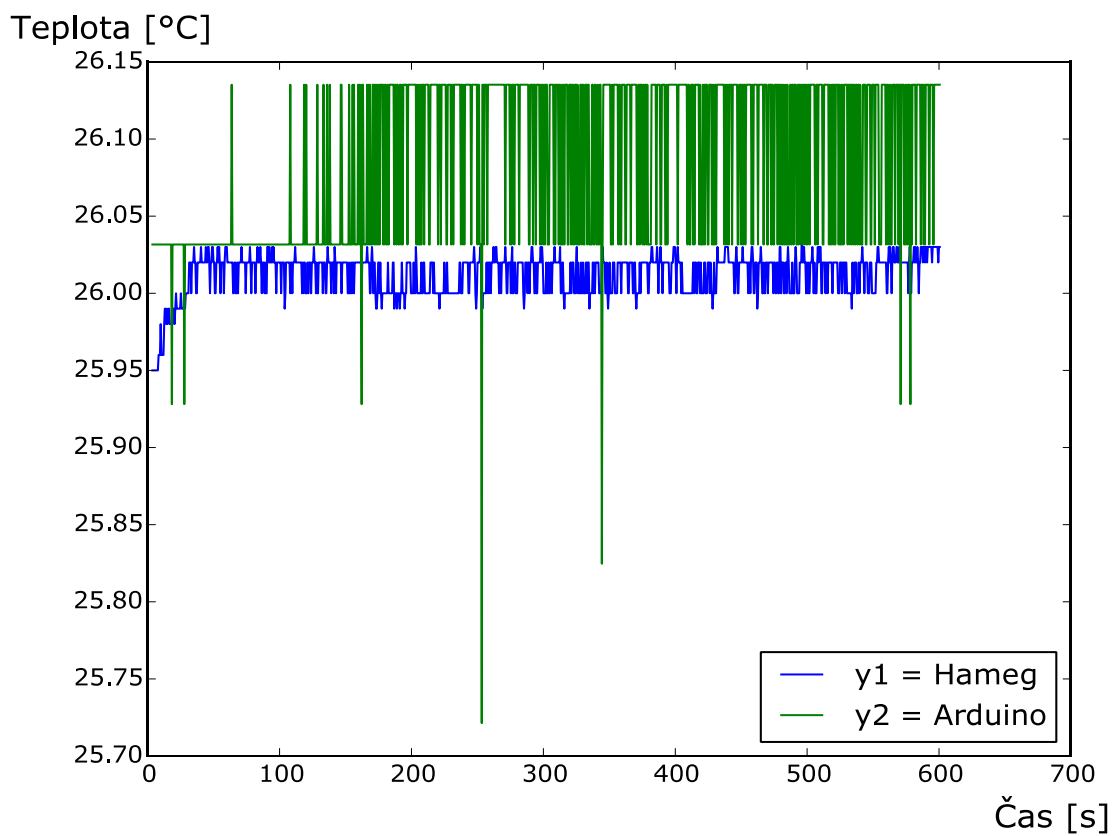
Prvním krokem bylo měření stabilizované teploty malého kovového předmětu (v našem případě mince), ke kterému byly pomocí teplovodivé pásky připevněny teplotní senzory Pt100 pro nezávislé vyčítání teploty z Hamegu a 10 kΩ NTC termistor z Arduina pro

stabilizační smyčku. Peltierův článek byl napájen z laboratorního zdroje IPS-3303 (ISO-TECH). Součástí tohoto měření bylo naladění PID parametrů, které je třeba upravovat v závislosti na předchozích výsledcích měření stabilizace. Správné hodnoty konstant PID jsou klíčové, pokud chceme získat maximální možnou přesnost. Jinak nedocházet k stabilizaci.

Na obrázcích níže je vidět stabilizace při nekalibrovaném PID (obrázek 11). Níže pak stabilizace za pomoci PID s optimálními parametry (obrázek 12).



Obrázek 11 - Neladěné PID.



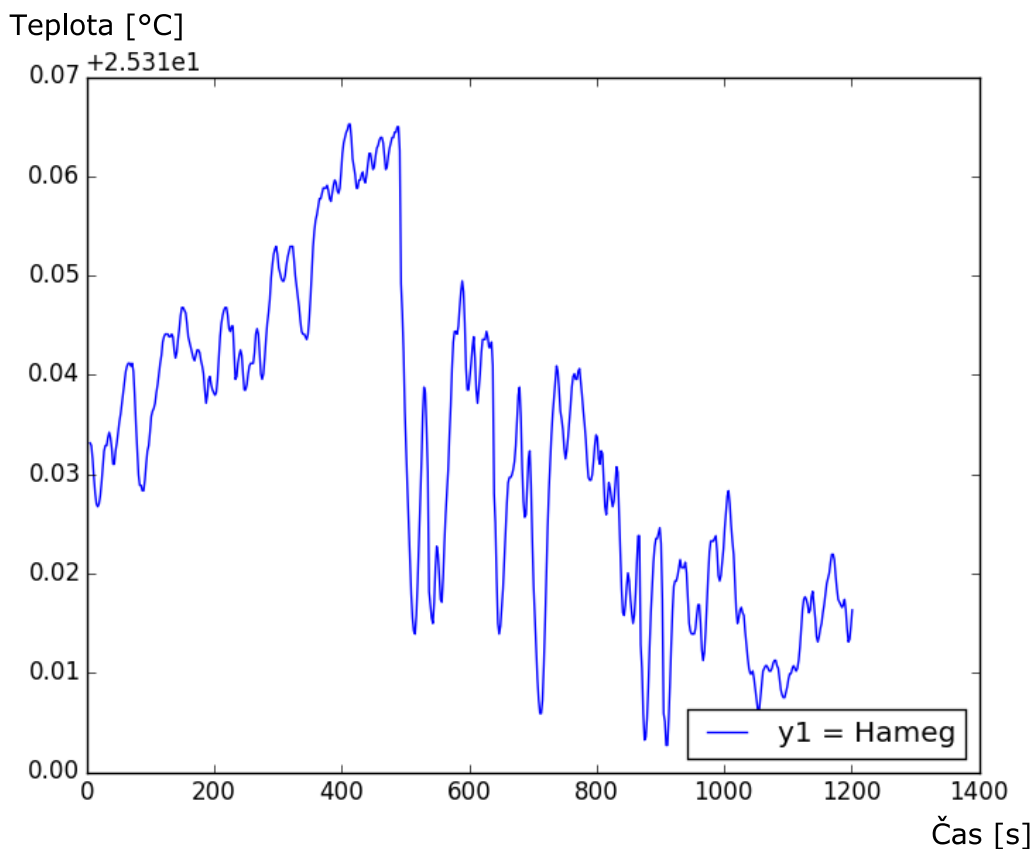
Obrázek 12 - Laděné PID.

Při porovnání obou měření podle Hamegu je vidět, jak je důležitá správná volba PID parametrů. Je vidět, že stabilizace v rámci možností teplotního kontroléru funguje dobře. Prohlédneme-li si ovšem křivky měření Arduina, pozorujeme, že jsme se při takovémto teplotním rozlišení dostali na hranice možností analogově-digitálního převodníku a rozlišení PWM. Dalším logickým krokem je tedy zvýšení přesnosti senzoru.

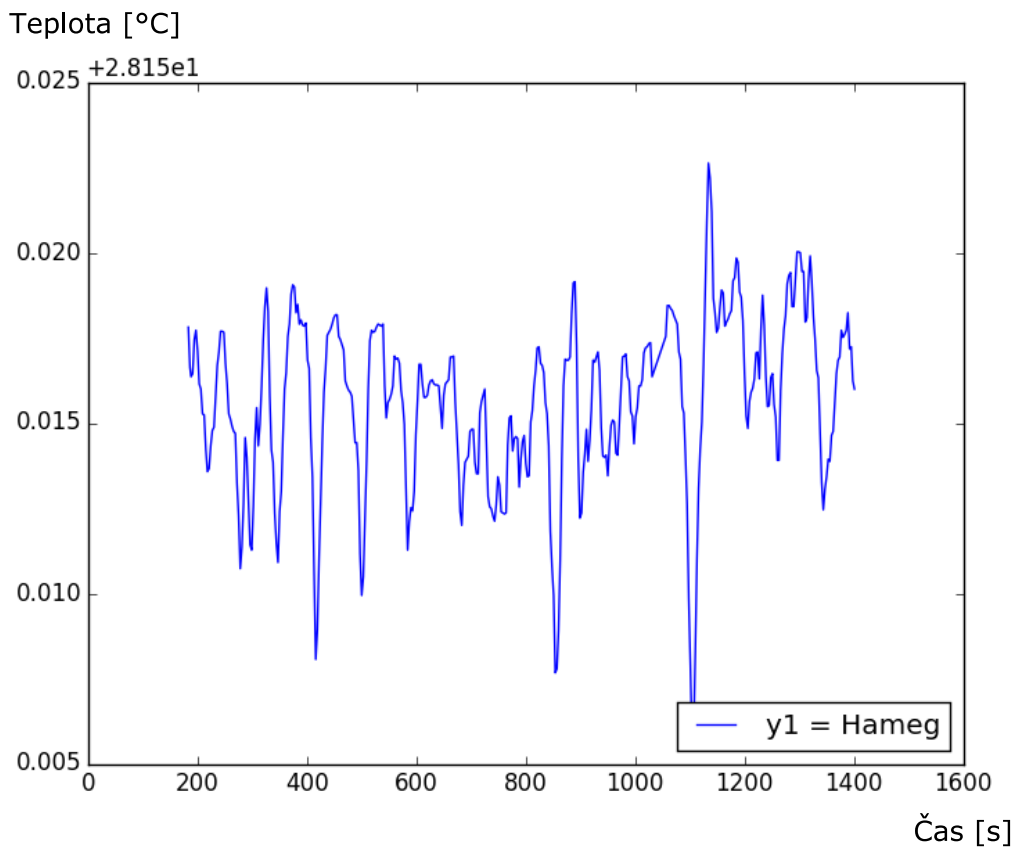
## 4.2 Ladění a měření na druhém prototypu

Při ladění PID parametrů druhého prototypu jsem v zájmu přesnosti pracoval s daty naměřenými multimetrem značky Hameg. Z technických důvodů jsem byl nucen měřit místo teploty odpor, který jsem si na odpovídající teplotní hodnoty přepočítával sám. Jako senzor multimetru jsem zvolil 10 k $\Omega$  NTC termistor stejného typu, jaký využívá můj teplotní kontrolér. Oba termistory byly teplovodivou páskou připevněny k testovacímu předmětu, který byl připevněn k Peltierovu článku. Odvod tepla na druhé straně Peltierova článku zajišťovala kovová deska. Celý obvod byl napájen z laboratorního zdroje EL302RT (TTi).

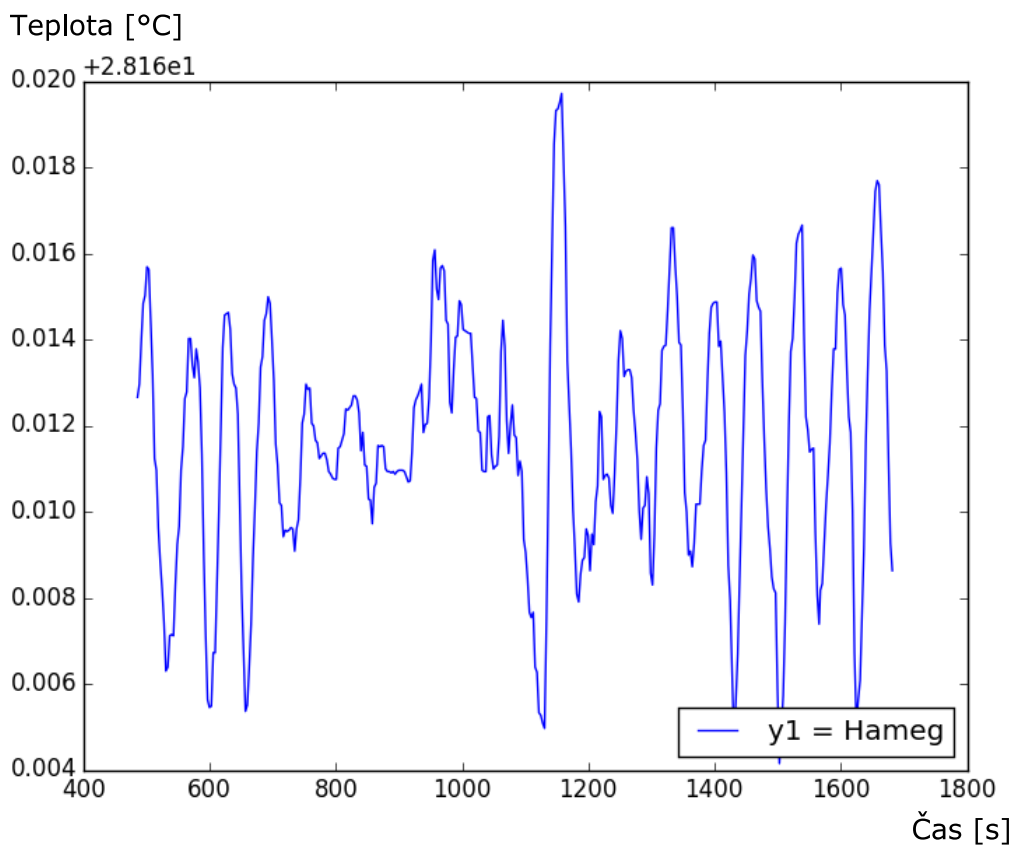
Provedl jsem sadu měření a zkoumal tepelnou stabilitu testovacího předmětu.



Obrázek 13 - Neladěné PID.



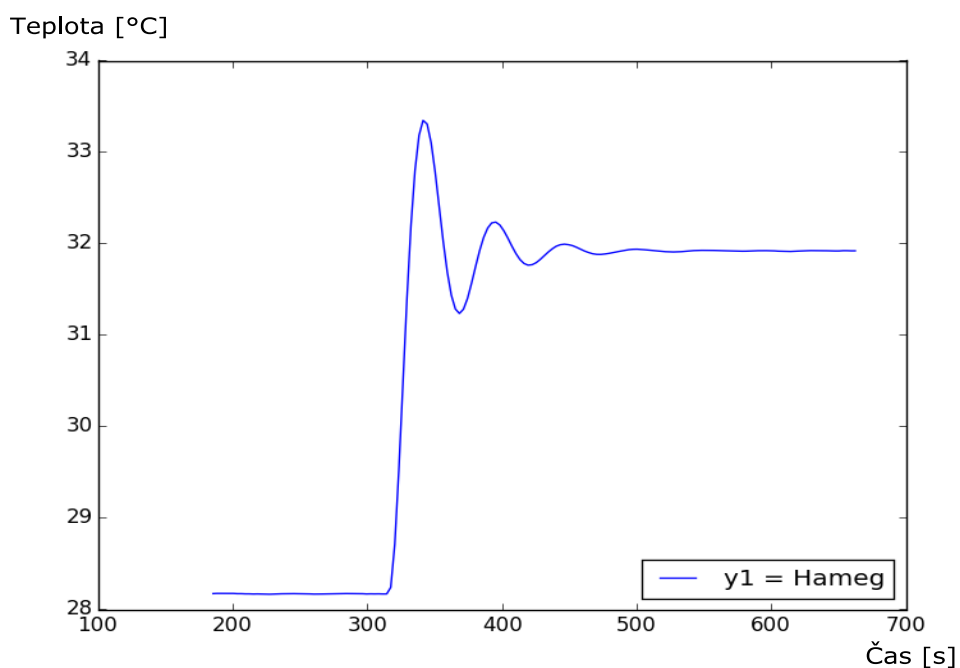
Obrázek 14 - Laděné PID parametry  $P=0,8$ ;  $I=0,3$ ;  $D=0,3$ .



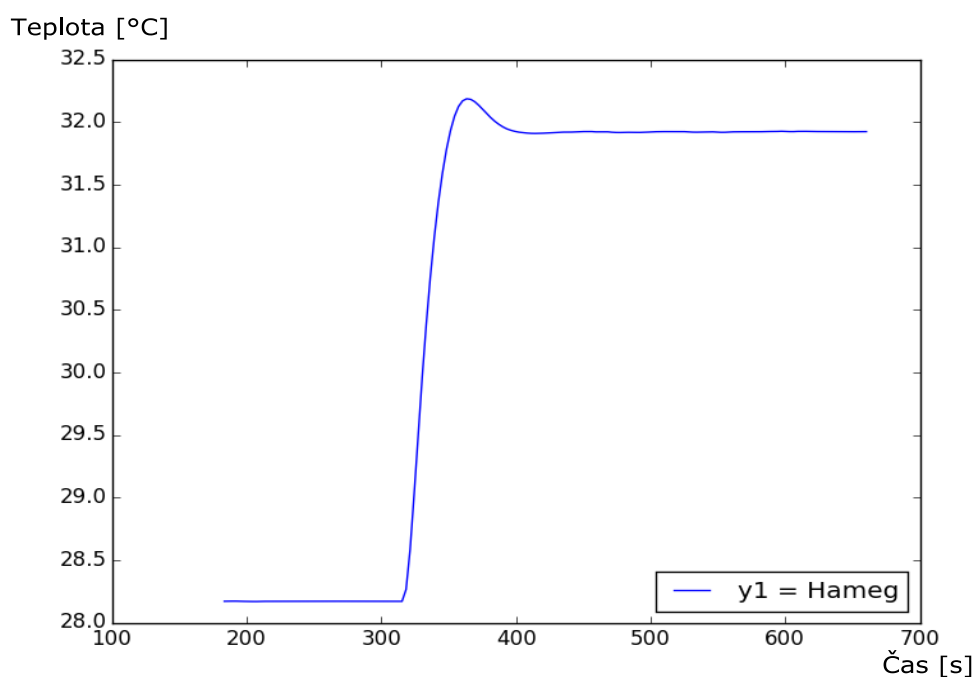
Obrázek 15 - Laděné PID parametry  $P=0,3$ ;  $I=0,5$ ;  $D=0,5$ .



Na obrázku 13 je vidět tepelná stabilizace s neladěným PID, která je horší než laděná verze prvního prototypu. Obrázky 14 a 15 jsou nejlepší výsledky, jaké jsem naměřil, takže bylo třeba vyhodnotit je pomocí směrodatné odchylky. Ta byla pro obrázek 14 přibližně rovna  $0,0025^{\circ}\text{C}$  a pro obrázek 15 rovna  $0,0048^{\circ}\text{C}$ . Zdá se, že hodnoty ladění podle obrázku 14 jsou lepší, ale pro potvrzení je nutné sledovat další parametry stabilizace. Další metodou ladění PID je zkoumání ustálení funkce při skokové změně nastaveného pracovního bodu z  $28^{\circ}\text{C}$  na  $32^{\circ}\text{C}$ .



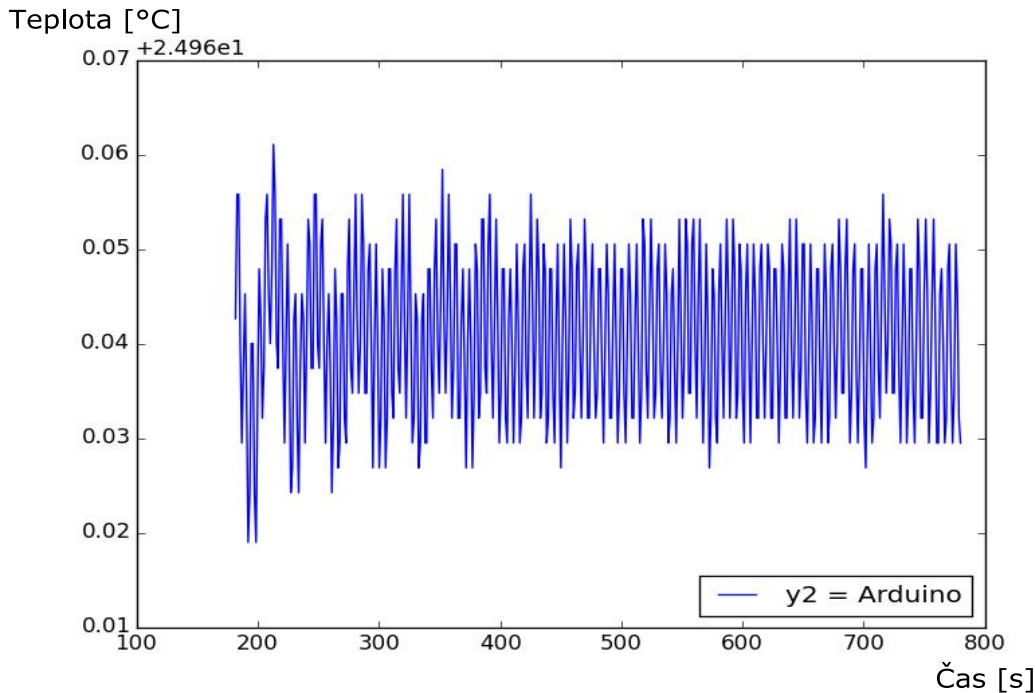
Obrázek 16 - Ustálení s PID parametry  $P=0,3$ ;  $I=0,5$ ;  $D=0,5$ .



Obrázek 17 - Ustálení s PID parametry  $P=0,8$ ;  $I=0,3$ ;  $D=0,3$ .

Sledoval jsem proces ustálení pro dvě verze PID parametrů blízké optimu a při porovnání obrázků 16 a 17 je jasně vidět, ideální průběh stabilizace na obrázku 17 v kontrastu s dlouhou dobou ustálení na obrázku 16. Problém dlouhotrvajícího ustálení je způsoben příliš vysokými parametry integrační a derivační části PID řízení.

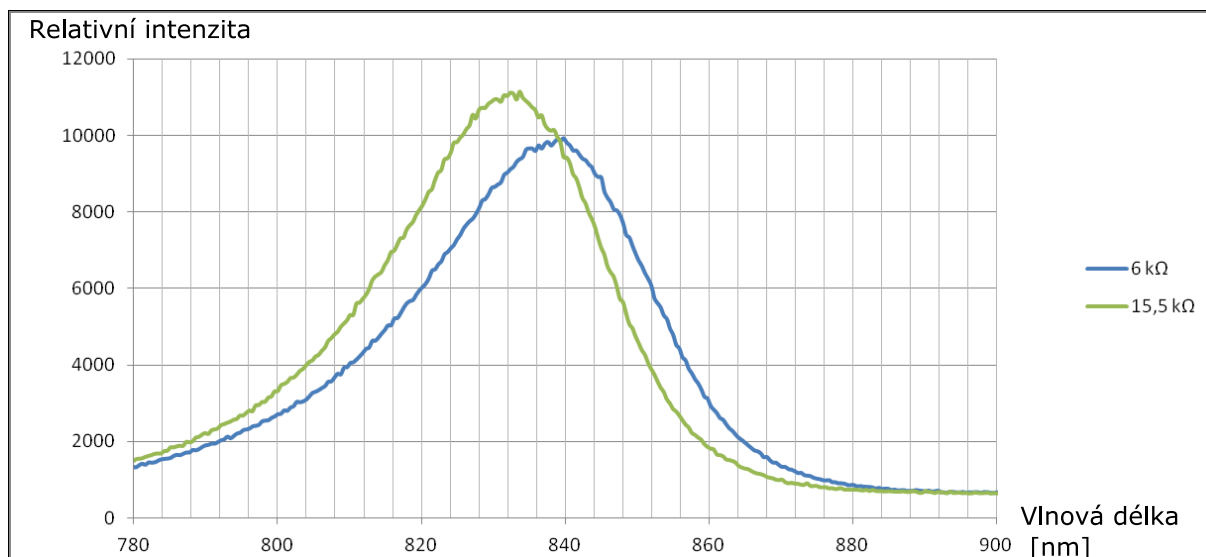
Protože zobrazené grafy obsahovaly hodnoty naměřené nezávislým multimetrem, vykreslil jsem hodnoty stabilizace s optimálními parametry z pohledu senzoru v kontroléru.



**Obrázek 18 - Teplotní stabilizace z pohledu kontroléru.**

Záznam teploty na obrázku 18 ukazuje, že se kontrolér dostal na hranice své rozlišovací schopnosti. To odpovídá předpokladům, které lze odvodit z napěťových hodnot, které se objevují na termistoru v porovnání s rozlišovací schopností analogově-digitálního převodníku. Rozlišení je přibližně  $0,006\text{ °C}$  při teplotách mezi  $25\text{ °C}$  a  $30\text{ °C}$ . V této fázi může být nestabilita výsledné teploty způsobena i technickými parametry dalších součástek jako například stabilita reference napětí na vývojové desce.

V rámci testování funkce kontroléru jsem tepelně stabilizoval LED diodu THSG 8200 [16] napájenou stabilním proudem  $80\text{ mA}$  při dvou různých teplotách  $15\text{ °C}$  a  $38\text{ °C}$ . Kontrolér hladce zvládl udržování nastavené teploty včetně plynulého přechodu mezi nimi. Zároveň jsem tak prozkoumal závislost parametrů LED diody na provozní teplotě.



Obrázek 19 – Spektrální charakteristika LED diody.

Jak je vidět na obrázku 19 vlnová délka laserové diody se mění úměrně s teplotou. Posun spektra byl 6 nm při změně teploty z 15 °C na 38 °C ( $\Delta T=25$  °C), v přepočtu tedy o 0,25 nm na 1 °C. Což odpovídá teoretickým předpokladům.

## 5 Shrnutí

Zkoumal jsem vliv teploty na polovodičové zdroje světla s cílem konstrukce kontroléru, který by umožnil co nejpřesnější stabilizaci teploty. Měřením na laserové diodě jsem si potvrdil, jak velký vliv má teplota na funkční parametry diody. Konkrétně se jednalo o prahový proud, který rostl úměrně s teplotou, vlnovou délku spektra, která se měnila s teplotou, optický výkon, který klesá pro vyšší teploty a další. Ukázalo se tedy, že teplotní stabilizace je pro správnou funkci polovodičových zdrojů světla, i když samozřejmě nejenom pro ně, nezbytná.

Za účelem tepelné stabilizace jsem zkonstruoval dva prototypy teplotních kontrolérů. První kontrolér se skládal z 10 k $\Omega$  termistoru, který zapojený v děliči napětí sloužil k vyčítání teploty s pomocí 10 bitového analogově-digitálního převodníku zabudovaného ve vývojové desce firmy Arduino. Zde byly data zpracovány digitální metodou a výsledné hodnoty spouštěly přes 8 bitové PWM modulaci napájení Peltierova článku připojeného přes H-můstek ke zdroji napětí.

Při testování prvního prototypu se ukázalo, jak důležité jsou správné parametry pro PID řízení, které zajišťuje zpracování vstupních dat na výstupní signál. Také se ukázalo, že ani v případě ideálních podmínek není kontrolér schopný zajistit stabilizaci teploty s odchylkou menší než 0,05°C. Proto jsem přikročil ke konstrukci druhého prototypu.

Druhý prototyp využíval opět jako senzor 10 k $\Omega$  NTC termistor zapojený v děliči napětí, tentokrát však pro zvýšení přesnosti vyčítaný 16-bitovým analogově-digitálním převodníkem. Převodník posílá vyčtená data do mikrokontroléru pro digitální zpracování. Mikrokontrolér provádí totožné PID zpracování jako v případě prvního prototypu a výsledná hodnota je využita digitálně-analogovým převodníkem k lineárnímu řízení. Abych zajistil bipolární funkci kontroléru a zlepšil přesnost napájení, transformoval jsem výstupní signál z převodníku pomocí operačního zesilovače z rozsahu 0 až 5 voltů na -5 až 5 voltů. Toto napětí je následně potenciometrem coby děličem napětí úměrně zmenšeno tak, aby byl využit plný rozsah Peltierova elementu. Výsledné napětí přes napěťový sledovač spouští výkonové tranzistory, které napájejí Peltierův článek.

I v případě druhého prototypu bylo potřeba správně vyladit PID parametry. Tentokrát jsem se tomuto problému věnoval hlouběji a využil dva parametry, které jsou při ladění potřeba. Nejprve jsem na základě vyhodnocení teplotní stabilizace vybral nejpravděpodobnější PID parametry a tyto parametry následně testoval na schopnosti adaptace kontroléru na skokovou změnu nastavení pracovního bodu. Výsledná přesnost druhého prototypu se poté pohybovala v rámci setin stupňů. Testování však také ukázalo, že jsem se dostal na hranice možné přesnosti kontroléru.

Na základě testovacích měření můžu potvrdit, že jsem schopen postavit správně pracující teplotní kontrolér, kde zpracování signálu probíhá digitálně. Již při testování se projevil výhody digitálního zpracování, kdy změny různých parametrů mohly být automatizovány a zadávány mnohem přesněji než je tomu u zpracování analogového. Přesnost takového kontroléru se ukázala být dostačující pro méně náročné laboratorní aplikace, ale je zde ještě dostatek prostoru pro zlepšení. V konstrukční části by mimo jiné, mohl být využit lepší

analogově digitální převodník spolu se stabilnější napěťovou referencí na napěťovém děliči. V programové části by pak za pozornost jistě stála tvorba programu ladícího automaticky PID parametry.

## Zdroje

- [1] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, Základy fotoniky, Matfyzpress, Praha, 1994.
- [2] Vývojová deska Arduino UNO, Arduino.  
<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno> 19.8.2015.
- [3] Mikrokontrolér ATmega328P, ATMEL corporation,  
<http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf>, 19.8.2015.
- [4] Peter R. N. Childs, Practical temperature measurements, Oxford, 2001.
- [5] Integrovaný teplotní senzor LM35, National Semiconductors  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>, 20.7.2015.
- [6] 10kΩ NTC termistor B57551G1, Epcos,  
<http://uk.rs-online.com/web/p/thermistors/7691892/>, 20.7.2015
- [7] Analogově-digitální převodník ADS1115, Texas Instruments,  
<http://www.ti.com/product/ads1115>, 25.7.2015.
- [8] Digitálně-analogový převodník AD 420, Analog Devices,  
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD420.pdf>,  
29.7.2015.
- [9] Termoelektrický článek RC3-6, Marlow industries,  
<http://www.marlow.com/media/marlow/product/downloads/rc3-6-011s/RC3-6.pdf>, 18.6.2015.
- [11] Digitální multimetr HM 8112-3, Hameg industries,  
<http://www.hameg.com/0.146.0.html>, 5.8.2015.
- [12] Platinový odporový teploměr Pt100 PTL 1112, Vishay,  
<http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/Datasheets-D9/DSAHI000169211.pdf>,  
16.8.2015.
- [13] [http://www.omega.com/prodinfointegrated\\_circuit\\_sensors](http://www.omega.com/prodinfointegrated_circuit_sensors), 16.8.2015.
- [14] <http://blog.opticoncontrols.com/archives/153>, 16.8.2015.
- [15] Operační zesilovač LM358P, Texas Instruments,  
<http://www.tme.eu/cz/Document/fb009604970124232b15622b304f9f94/lm258.pdf>, 9.8.2015.
- [16] LED dioda HTSG 8200, Vishay,  
<http://www.mouser.com/ds/2/427/tshg8200-266679.pdf>, 17.8.2015.