UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024 Maksim Zhelvakov

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Laboratorní tepelná soustava
Bakalářská práce

2024 Zhelvakov Maksim

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Maksim Zhelvakov**
Osobní číslo:	**I21074**
Studijní program:	**B0714A150008 Automatizace**
Téma práce:	**Laboratorní tepelná soustava**
Zadávající katedra:	**Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cíl práce: Cílem práce je podle dokumentace na AutomationShield.com vyrobit tepelnou soustavu HeatShield, otestovat její chování a vytvořit laboratorní úlohy pro studenty.

Obsah teoretické části: Student provede rešerši laboratornich tepelných soustav používaných pro výuku řízení a automatizace.

Obsah praktické části: Student vytvoří laboratorni tepelnou soustavu HeatShield, ověří její funkčnost, otestuje a zdokumentuje její vlastnosti. Pro potřeby předmětů modelování a řízení vytvoří několik návodů, tak aby byla soustava použitelné ve výuce.

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

SELECKÝ, Matúš. Arduino: uživatelská příručka. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.
TIMMIS, Harold. Practical Arduino engineering: end to end development with the Arduino, Fusion 360, 3D printing, and Eagle. Second edition. Technology in action. New York: Apress, [2021]. ISBN 978-1--4842-6851-3.
AutomationShield, Control Systems Engineering Education [online]. AutomationShield [cit. 13. 10. 2023]. Dostupné na: < https://github.com/gergelytakacs/AutomationShield/wiki>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Daniel Honc, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2024**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. ledna 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Laboratorní tepelná soustava jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12. 1. 2024

Maksim Zhelvakov

PODĚKOVANÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Danielu Honcovi, Ph.D., za trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Stejně tak bych chtěl poděkovat panu Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D., za pomoc s 3D tiskárnou.

ANOTACE

Bakalářská práce se zaměřuje na problematiku laboratorních tepelných systémů pro výuku řízení a automatizace. Příkladem takových systémů je tepelná soustava HeatShield, která byla vyrobena, oživena a otestována během vzniku této práce. Podrobně popsaná je její funkcionalita, způsoby naprogramování. Pro studenty automatizace byly vytvořeny dvě laboratorní úlohy.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Mikrokontroler, MATLAB, tepelná laboratorní soustava.

TITLE

Laboratory thermal system

ANNOTATION

The bachelor's thesis focuses on the laboratory thermal systems for teaching control and automation. An example of such systems is the HeatShield thermal systém. This systém created and tested during this work. manufactured, revived and tested during the creation of this work. Its functionality and programming methods are described in detail. Two laboratory tasks were prepared for students of automation.

KEYWORDS:

Microcontroller, MATLAB, thermal laboratory systém.

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACE A TABULEK 10

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK 12

ÚVOD 13

1 Teoretická část 14

1.1 Laboratorní tepelné soustavy pro výuku automatizace 14

1.2 Jednočipové mikropočítače 18

1.3 Měřicí člen 19

1.4 Akční členy 19

1.5 Programové rozhraní 19

1.6 Komunikace 20

2 Praktická část 21

2.1 Funkcionality soustavy, návrh 21

2.2 Hardwarové řešení 23

2.2.1 Arduino 24

2.2.2 Termistor 25

2.2.3 Heating cartridge 26

2.2.4 Montáž 27

2.3 Softwarové řešení Arduino IDE 30

2.4 Testování funkčnosti soustavy 31

2.5 Ukázkové laboratorní úlohy 33

2.5.2 PI regulátor 34

2.5.3 Výpočet parametrů pro PI regulátor 36

2.5.4 Přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu 39

2.5.5 Závěr 41

2.5.6 Laboratorní úloha: Řízení soustavy HeatShield dvoupolohovým regulátorem... 42
2.5.7 Dvoupolohový regulátor... 42
2.5.8 Přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu s dvoupolohovým regulátorem... 43
2.5.9 Závěr... 44
ZÁVĚR... 45
POUŽÍTA LITERATURA... 46
SEZNAM PŘÍLOH... 48

SEZNAM ILUSTRACE A TABULEK

Obrázek 1 TD 400 14
Obrázek 2 Heat Exchanger service unit H102 15
Obrázek 3GUNT WL 110.20 Water Chiller 16
Obrázek 4 Gleeble 3800-GTC 17
Obrázek 5 Tepelná soustava HeatShield 21
Obrázek 6 BUZ 11 22
Obrázek 7 Safe box 23
Obrázek 8 Plošný spoj PSB 24
Obrázek 9Arduino UNO R3 24
Obrázek 10 USB kabel 25
Obrázek 11 Měnič 5–12 V 25
Obrázek 12 Termistor NTC 25
Obrázek 13 Charakteristika termistoru 26
Obrázek 14 Heating cartridge 27
Obrázek 15 Připojení součástek k HeatShield 28
Obrázek 16 Elektrický obvod tepelné soustavy 29
Obrázek 17 Vyrobená tepelná soustava HeatShield 30
Obrázek 18 Statická charakteristika 31
Obrázek 19 Graf výkonu 32
Obrázek 20 Přechodová charakteristika soustavy (skok z 40 °C do 50 °C) 33
Obrázek 21 Regulační obvod 34
Obrázek 22 Bloková schéma řízení soustavy HeatShield PI regulátorem 36
Obrázek 23 Knihovna HeatShield 37
Obrázek 24 Blok HeatShield 37
Obrázek 25 Bloky Actuator Write a Sensor read 38
Obrázek 26 Schéma Actuator write 38
Obrázek 27 Schéma Sensor Read 38
Obrázek 28 Graf přechodové charakteristiky URO 39
Obrázek 29 Bloková schéma soustavy HeatShield s dvoupolohovým regulátorem 42
Obrázek 30 Přechodová charakteristika URO dvoupolohovým regulátorem 43

Tabulka 1 Rozměry safe boxu 23
Tabulka 2 Součástky 28
Tabulka 3 Parametry 32
Tabulka 4 Doba náběhu a průtahu 33
Tabulka 5 Vypočet parametrů regulátora 36
Tabulka 6 Parametry PI regulátoru 36

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

URO – uzavřený regulační obvod.

ÚVOD

Automatické řízení je klíčovým oborem v moderní technice, jež se zaměřuje na navrhování a implementaci systémů schopných samostatně řídit zařízení nebo procesy bez potřeby lidského zásahu. Používá se v průmyslu, např. v továrnách a výrobních procesech, pro zajištění konzistence, kvality a efektivity výroby, dále v dopravních systémech, jako jsou ABS, adaptivní tempomaty, autonomní vozidla, letectví a námořní dopravě. Automatické systémy se rovněž používají v elektrárnách, rozvodnách a distribučních sítích k optimalizaci výroby a distribuce energie.

Teorie a aplikace automatického řízení jsou součástí moderního technického vzdělání. Neoddělitelnou součástí jsou laboratorní systémy, které poskytují studentům lépe pochopit teorii, rozvinout praktické dovednosti, správně připravit na práci nejenom v oboru automatizace, ale i v dalších technických oblastech. Tato práce je věnována tvorbě a testování laboratorní tepelné soustavy.

1 Teoretická část

V teoretické části se bakalářské práce bude věnovat problematice laboratorních tepelných soustav pro výuku automatického řízení a jejich použití ve praxe. Budou představeny různé typy soustav, s popisem principu jejich fungovaní.

1.1 Laboratorní tepelné soustavy pro výuku automatizace

Laboratorní tepelné soustavy jsou speciální zařízení navržená pro studium a testování různých tepelných procesů a algoritmů pro jejich řízení. Tyto soustavy často obsahují komponenty jako ohřívače, chladiče, čidla teploty, řídící jednotky a měřicí přístroje.
Řídicí jednotky hrají klíčovou roli při zajišťování přesného a stabilního řízení systémem [1]**.**
Rozlišuje několik typů jednotek:

- Jednoduché termostaty: Základní modely, které umožňují pouze nastavení a udržování jedné pevné teploty.
- Programovatelné logické automaty (PLC): Využívají se pro složité soustavy s více proměnnými a procesy, kde je vyžadována komplexní automatizace a integrace více zařízení.

Dále budou představeny různé příklady tepelných soustav používaných pro výuku automatizace od různých výrobců. Jedním z příkladů je tepelná soustava TD400 od společnosti TecQuipment [2]. Tento experimentální zdroj je určen pro výuku přenosu tepla a teplotní regulace. Tepelná soustava TD 400 využívá elektrický ohřívač, který poskytuje kontrolované a měřitelné dodání tepla do systému.

Obrázek 1 TD 400 [2]

Zařízení umožňuje provádět simulace různých zapojení, včetně dvou-, tří – a čtyřhodinových konfigurací, a je vybaveno odporovým teploměrem. Mezi jeho funkcemi je kalibrace a kontrola linearity měření teploty, včetně sledování teplotního zpoždění. Nabízí tepelné infračervené měření teploty na površích s různou emisivitou. Umožňuje také práci s termočlánky, a to jak v sérii, tak paralelně, a zkoumá Seebeckův efekt a odpor v termočlánkových obvodech.

Soustava obsahuje termočlánky, které umožňují přesné měření teploty v různých bodech. Data získaná z těchto termočlánků jsou shromažďována a analyzována pomocí datové sběrnice, což umožňuje provádět analýzu tepelného výkonu, účinnosti a dalších parametrů.

Další ukázková tepelná soustava pro výuku je HEAT EXCHANGER SERVICE UNIT H102 od výrobce PA Hilton [3].

Modulární výuková soustava je určena k experimentálnímu studiu různých metod přenosu tepla. Umožňuje prakticky pozorovat, jak teplo přechází mezi vodou prostřednictvím různých výměníků tepla. Soustava umožňuje porovnávat tepelné vlastnosti různých výměníků a analyzovat, jak jejich tvar a rozměry ovlivňují efektivitu přenosu tepla.

Obrázek 2 Heat Exchanger service unit H102 [3]

Panel namontovaný na lavici je vybaven integrovanou elektrickou konzolou. Teplá voda pochází z elektrického zásobníku, který ji ohřívá, zatímco studená voda je dodávána z vodovodu. Obě vody procházejí čerpadly a regulátory, které zajišťují jejich správný průtok. Směrovány jsou do různých volitelných výměníků tepla, kde teplá voda předává své teplo studené vodě, čímž ji ohřívá.

Průtoky a teploty jsou měřeny a řízeny pomocí průtokoměrů a termočlánků, což umožňuje optimální nastavení parametrů pro experiment. Elektrická bezpečnost je zajištěna dvoupólovými jističi proti přetížení a zemnímu proudu. Systém teplé vody obsahuje bezpečnostní omezení teploty.

Standardní vybavení zahrnuje až 12 termočlánků typu T zobrazených na digitálním panelovém měřiči a dva průtokoměry pro měření horké a studené tekutiny.

Ještě jedna představená laboratorní tepelná soustava pro výuku od GUNT WL 110.20 Water Chiller výrobce GUNT [4].

Přídavné zařízení k základní jednotce GUNT WL 110 Heat Conduction Unit, které se používá pro chlazení vody. Umožňuje udržovat konstantní teploty vody, efektivně odvádět teplo z testovaných vzorků. Takže lze provádět analýzu ztráty tepla, testování oběhových čerpadel a vyhodnotit spotřeby energie chladicího systému v závislosti na různých provozních podmínkách.

Obrázek 3GUNT WL 110.20 Water Chiller [4]

Soustava se skládá z napájecí jednotky WL 110 s dotykovou obrazovkou PLC a integrovaným chladicím systémem, který zahrnuje nádrž na vodu a oběhové čerpadlo. V nádrži slouží trubkový had jako výparník pro chladicí cyklus, který ochlazuje vodu. Regulátor řídí systém, stabilizuje teplotu na požadované hodnotě.

Existuje ještě spousta další tepelných soustav pro výuku od různých výrobců, zaměřených na automatické řízení. Ale tepelné systémy mají praktické využití i v jiných oblastech.

Laboratorní tepelné soustavy mohou být součástí testovacích zdrojů. Slouží pro náhřev nebo chlazení vzorků. Příkladem takového systému je testovací zařízení od výrobce Gleeble [5].

Obrázek 4 Gleeble 3800-GTC [5]

Gleeble 3800-GTC je testovací systém nabízený společností Dynamic Systems Inc. a je schopen vyvinout až 20 tun statické síly a ohřívat vzorky. Flexibilita systému umožňuje širokou škálu testovacích a simulačních možností, nicméně díky svým působivým schopnostem je zvláště vhodný pro simulace válcování za tepla a vícenásobného kování.

Gleeble 3800-GTC nabízí možnosti pro simulace deformace za tepla na velkých vzorcích. Je vybaven odolným mechanickým systémem a vysokorychlostními servoventily pro rychlou odezvu. Prostřednictvím svých výkonných schopností fyzické simulace poskytuje technickou páku, kterou konkurenční organizace potřebují ke snížení nákladů, zkrácení doby uvedení na trh a otevření dveří novým nápadům.

Testovací soustava je vybavena integrovaným dotykovým displejem s počítačem s operačním systémem Windows. Poskytuje extrémně uživatelsky přívětivé rozhraní pro přípravu simulačních programů.

Gleeble 3800-GTC je vybaven pro použití mobilních konverzních jednotek (MCU), které umožňují snadnou změnu Gleeble z jedné testovací konfigurace do druhé. Výsledkem je systém, který nemá obdoby ve fyzických simulačních schopnostech.

Systém přímého odporového ohřevu Gleeble 3800-GTC může ohřívat vzorky rychlostí vyšší než 10 000 °C/s, nebo může udržovat rovnovážné teploty v ustáleném stavu v rozmezí ±1 °C.

Termočlánky nebo volitelný infračervený pyrometr poskytují signály pro přesnou zpětnovazební kontrolu teploty vzorku.

Nosiče čelistí chlazené vodou drží vzorek, díky tomu je maximální rychlost chlazení určena velikostí, tvarem, teplotou a složením vzorku. Volitelný kalicí systém může produkovat rychlosti chlazení vyšší než 10 000 °C/s na povrchu vzorku.

Možnost indukčního ohřevu doplní špičkový výkon známé technologie přímého odporového ohřevu Gleeble. Indukční ohřev je vhodný pro použití při jednoosém kompresním testování (průtokové napětí), kde může zajistit rovnoměrnou teplotu.

Systém umožňuje uživateli vybrat buď indukční, nebo odporový ohřev na základě potřeb každého konkrétního testu. Plná kapacita vysokorychlostního systému přímého odporového ohřevu Gleeble je stále zachována.

Z těchto příkladů lze vysledovat, že tepelné soustavy se mohou využívat jak ve výuce, tak i v kontrole kvality nebo jiných testů, kde je zapotřebí práce s teplotou. Hlavní rozdíl mezi testovacími soustavami a soustavami pro výuku je v tom, že druhý typ potřebuje více energie a umožňuje větší rozsah teplot než první typ. Ale všechny mají jednu celkovou hardwarovou strukturu, která se skládá z řídicí jednotky (PLC, mikrokontroler), akčního a měřicích členů.

1.2 Jednočipové mikropočítače

Jedna z možných variant řídicí jednotky je jednočipový mikrokontroler. To je integrovaný obvod, který obsahuje základní prvky počítače: procesor, paměť a vstupně-výstupní (I/O) periferie. Jednočipové mikrokontrolery jsou optimální pro jednoduché, nízkonákladové a energeticky úsporné aplikace, kde je důležitá kompaktnost a integrace [6].

Výhody jednočipových mikrokontrolerů:

- Integrace;
- Nízká spotřeba energie;
- Kompaktnost;
- Nízká cena.

1.3 Měřicí člen

Měřicím členem se v automatizaci nazývá zařízení nebo komponenta, která slouží k měření fyzikálních veličin v systémech. Poskytuje informace pro řízení a optimalizaci procesů, zajišťuje bezpečnost a efektivitu. K měřicím členům patří senzory a převodníky. V tepelné soustavě je jako měřicí člen používán termistor NTC.

1.4 Akční členy

Akční člen v automatizaci je zařízení nebo komponenta, jež provádí fyzickou akci na základě příkazu z řídicího systému. Umožňuje pohyb, otáčení, ohřev nebo chlazení. To mohou být: ventily, motory, topné články. V tepelné soustavě je akčním členem topná patrona (Heating cartridge).

1.5 Programové rozhraní

Řídicí systémy laboratorních soustav lze programovat pomocí různých vývojových rozhraní, která mohou využívat různé programátorské jazyky. Konkrétně to závisí na řídicí jednotce soustavy a cíli toho zdroje. V našem případě využijeme vývojové prostředí MATLAB.

MATLAB je vývojové prostředí pro modelování a simulace, použitelné pro zpracování a analýzu dat, zpracování signálů, obrazů a videosekvencí. Umožňuje modelovat fyzikální soustavy i systémy diskrétních událostí, optimalizovat procesy, navrhnout řídicí systémy.
Obsahuje množství funkcí: metody strojového učení, zpracování velkých objemů dat, 3D snímky, umožňuje generování kódů pro různé platformy, práci v reálném čase a další. Jeho možnosti vizualizace dat jsou velmi propracované, ale přitom jednoduché k použití.
MATLAB má svůj vlastní programovací jazyk, ale je schopen využívat řadu grafických uživatelských rozhraní. MATLAB je používán v průmyslové oblasti, středních a vysokých školách pro výuku.
MATLAB je modulární nástroj – kromě základního modulu obsahuje přibližně stovku nadstaveb – aplikačních knihoven, které obsahují nástroje a funkce zaměřené na danou oblast. Například pro simulace dynamických systémů obsahuje nadstavbu Simulink. V ní je možno pomocí předdefinovaných bloků jednoduše modelovat a simulovat nejrůznější fyzikální děje popsané diferenciálními rovnicemi. Pro událostně řízené systémy obsahuje nástroj Stateflow. Řada nadstaveb obsahuje prostě jen knihovny specializovaných funkcí, které lze volat pomocí

příkazů, nebo obsahují předpřipravená rozhraní pro intuitivní využití. Všechny funkce jsou dobře zdokumentované a v nápovědě často najdete i odkazy na zdrojovou publikaci popisující danou metodu a její parametry [7].

1.6 Komunikace

Pro komunikaci mezi mikrokontrolerem Arduino a MATLAB se využívá The MATLAB Support Package for Arduino. To je software, který umožňuje komunikaci mezi Arduino a vývojovým počítačem. Různé příkazy přistupující k hardwaru jsou prováděny v reálném čase bez nutnosti kompilace kódu. To znamená, že kód není nasazen do procesoru a Arduino funguje pouze jako externí laboratorní měřicí karta.
Aby se předešlo záměně mezi C/C++ a MATLAB API, jsou tato dvě rozhraní co nejvíce podobná. MATLAB API je napsáno v objektově orientovaném skriptu a uživatel musí nejprve vytvořit instanci ze třídy, takže naprogramovat jednočipový počítač lze za pomoci Simulinku [8].

Simulink API využívá balíček podpory Simulink pro hardware Arduino, který dodává algoritmické jednotky v blocích, které přistupují k hardwarovým funkcím. V přímém kontrastu se způsobem, jakým MATLAB zpracovává Arduino, je blokové schéma v Simulinku přepsáno do C/C++, poté zkompilováno do strojového kódu a nahráno do MCU [8]. Simulink nejen přepisuje bloková schémata pro hardware, ale také udržuje spojení mezi vývojovým počítačem a MCU. Tímto způsobem mohou být ovladače jemně vyladěny v živé relaci, nebo mohou být data pohodlně zobrazena a protokolována.

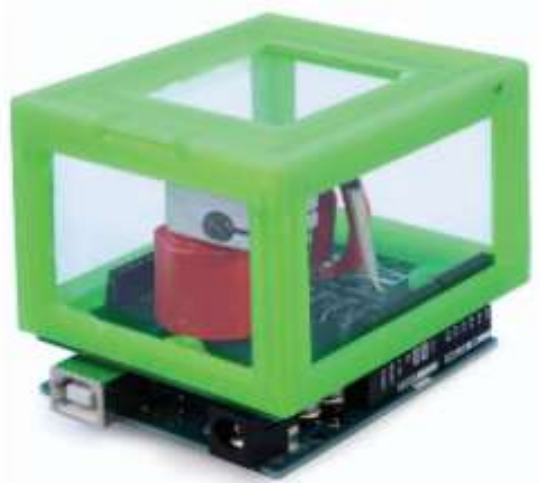
Uživatel může kdykoliv zastavit běh kódu pomocí tlačítka STOP v programátorském rozhraní MATLAB \SIMULINK.

2 Praktická část

Cílem praktické části bakalářské práce je výroba, oživení a otestování tepelné soustavy. Návod k praktickému použití ve výuce se bude věnovat funkcionalitě systému, hardwaru a softwarovému řešení.

Při výrobě tepelné soustavy bylo postupováno podle návodu uvedeného v projektu AutomationShield [8]. Soustava HeatShield se zaměřuje na vzdělávání v oblasti automatického řízení teploty. Je součástí projektu AutomationShield, který nabízí řadu nástrojů pro učení se automatizaci a řízení pomocí platformy Arduino.

2.1 Funkcionality soustavy, návrh



Obrázek 5 Tepelná soustava HeatShield [12]

Hlavním cílem soustavy HeatShield je automatické řízení teploty. Řízení je realizováno pomocí PWM modulace Arduino, tranzistoru BUZ11 a negátoru. Arduino generuje PWM signál pomocí funkce analogWrite. Tento signál je přiveden na tranzistor MOSFET, který funguje jako spínač. Gate (G) tranzistoru je připojen k pinu D3 Arduino, drain (D) připojen k akčnímu členu (cartridge) a source (S) je připojen k zemi.

Obrázek 6 BUZ 11

Napětí na pinu D3 řídí otevření, nebo zavření MOSFET tranzistoru následujícím způsobem:

Otevření MOSFET: Když PWM signál z pinu D3 dosáhne dostatečného napětí (logická hodnota HIGH), gate tranzistoru je nabitý. To vede k otevření tranzistoru, což umožní proudu projít z drain do source a aktivuje tepelný článek.

Zavření MOSFET: Když PWM signál z pinu D3 klesne na nízké napětí (logická hodnota LOW), gate tranzistoru se vybije. Tranzistor se tím uzavře a odpojí tepelný článek.

Jedna z dalších možných funkcionalit je simulace dynamického systému.
Simulace se používá k modelování a analýze systému, který se mění v čase. Umožňuje zkoumat chování systému bez nutnosti provádět nákladné nebo časově náročné experimenty.
Princip simulace zahrnuje následující kroky:

1. Modelování systému: Prvním krokem je vytvoření matematického modelu, který popisuje dynamiku systému. Model může být lineární nebo nelineární, spojitý nebo diskrétní. Matematický model tepelné soustavy je možné popsat pomocí Fourierova zákona pro vedení tepla.
2. Identifikace vstupních a výstupních veličin systému. Vstupy mohou být řídicí signály nebo jiné externí vlivy, zatímco výstupy jsou obvykle měřené hodnoty, které nás zajímají. U soustavy HetShield je vstupní signál určen akční veličinou a výstupní naměřenou hodnotou teploty.
3. Parametrizace modelu: Parametry modelu jsou často určovány experimentálně nebo jsou známé z literatury. Tyto parametry ovlivňují chování systému.
4. Simulace: Pomocí numerických metod se řeší rovnice modelu, aby se zjistilo, jak se stav systému mění v čase.

5. Analýza výsledků: Po provedení simulace se analyzují výsledky, které ukazují, jak se systém chová s různými podmínkami.

Takovým způsobem lze provádět modulace dynamických systémů a dostávat přesné výsledky.

Tepelná soustava hraněná proti fyzickému poškození speciálnímu safe boxem (obr. 7), který zakrývá část hardwaru. Slouží k bezpečnému použití soustavy během práce, aby byl uživatel ochráněn před náhodným dotykem horké části soustavy.

Tento box byl vytisknut na 3D tiskárně a má rozměry podle tab. 1.

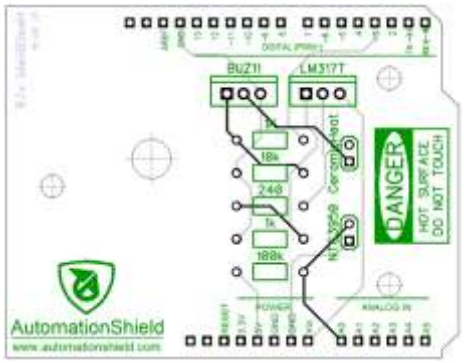
Tabulka 1 Rozměry safe boxu

Název	Délka (mm)	Šířka (mm)	Výška (mm
Krabice	78	56	48
Víčko	82	60	8

Obrázek 7 Safe box

2.2 Hardwarové řešení

HeatShield je plošný spoj (obr. 8), který patří k rodině modulů AutomationShield. Je speciálně navržen pro řízení procesů s použitím desky Arduino. Obsahuje několik pinů pro připojení součástek, včetně senzoru, topného článku a mikrokontroleru.



Obrázek 8 Plošný spoj PSB [12]

2.2.1 Arduino

Mikrokontroler Arduino UNO R3 (obr. 9) je jeden z nejpopulárnějších a nejrozšířenějších desek pro začátečníky i pokročilé uživatele v oblasti elektroniky a programování. Mikrokontroler je vybaven 32 KB flash paměti (programovatelná paměť), 2 KB SRAM a 1 KB EEPROM [9].

Arduino má tlačítko reset, jež umožňuje rychlé a efektivní restartování mikrokontroleru bez nutnosti fyzického odpojování napájení, což usnadňuje práci a zvyšuje produktivitu při vývoji. Funguje to tak, že tlačítko je propojeno s pinem RESET k mikrokontroleru. Když se tlačítko stiskne, vytvoří se krátký impulz na pinu reset, který přivede mikrokontroler do stavu resetování [10].

Obrázek 9Arduino UNO R3

Pro komunikace Arduino s počítačem se používá USB kabel (obr. 10). To snadno umožnuje přenos informace.

Obrázek 10 USB kabel

Pro napájení deska má port DC napájecí Jack.

Tento port je určen pro připojení externího napájecího adaptéru, (měnič) (obr.11), který přizpůsobuje napětí potřebné pro správné fungování zařízení (z 5 V na 12 V).

Obrázek 11 Měnič 5–12 V

2.2.2 Termistor

Termistor NTC (Negative Temperature Coefficient) (obr.12) je pasivní odporový snímač teploty, který měří na základě závislosti elektrického odporu na teplotě. U termistorů platí, že s rostoucí teplotou se elektrický odpor termistoru snižuje.

Často se používá k: kompenzaci teplotních vlivů v elektronických obvodech a k řízení teploty. Poskytuje jednoduchý způsob monitorování tepla a řízení obvodů.

Obrázek 12 Termistor NTC

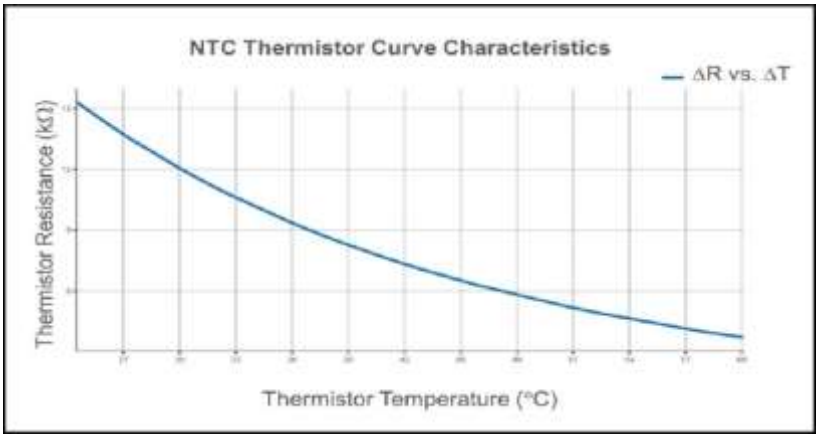
Parametry termistoru jsou:

- Odpor při 25 °C: 10 kΩ
- Teplotní koeficient: Záporný, typicky −35 % na °C

Vyráběn práškovou technologií z oxidů chromu, železa, mědi, kobaltu, niklu a manganu; například: MnO + CoO.

Hodnocení teploty: 300 °C – maximální teplota, kterou je termistor schopen tolerovat bez poškození [11].

Hlavní důvod k použití tohoto termistoru v soustavě je, termistor NTC typu nemá svůj vlastní napájecí zdroj, což usnadňuje integraci do obvodu, zjednodušuje návrh systému a snižuje náklady.



Obrázek 13 Charakteristika termistoru [11]

2.2.3 Heating cartridge

Heating cartridge je zařízení používané k ohřevu často v aplikacích jako 3D tisk, průmyslové tepelné procesy a podobně. Tato patrona je obvykle vyrobena z odporového drátu uvnitř kovového pouzdra a připojuje se k napájecímu zdroji. Elektrický proud procházející drátem vytváří teplo, které se přenáší na ohřívaný blok.

Obrázek 14 Heating cartridge

Parametry Heating cartridge:

- Napětí: 12 V DC,
- Výkon: 30 W,
- Průměr: 6 mm,
- Délka: 20 mm.

Tyto parametry jsou důležité pro správnou montáž a integraci tepelného zásobníku do zařízení.

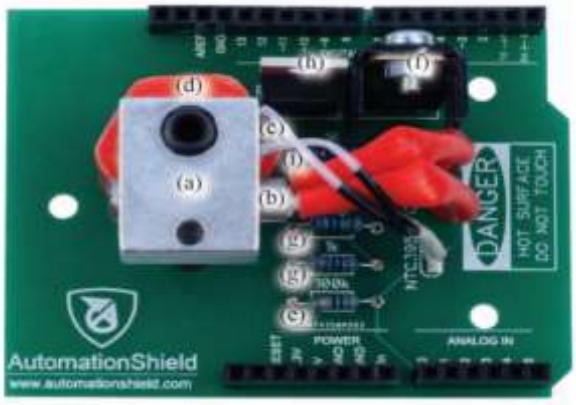
2.2.4 Montáž

Plošný spoj (PCB) HeatShield je připojen k desce Arduino UNO R3 pomocí dutinových lišt (header pins). Tyto lišty o délce 11 mm umožňují snadné připojení a odpojení desky od plošného spoje. Speciálně navržené piny na PCB jsou zarovnány s odpovídajícími piny na desce Arduino, což zajišťuje pevné a spolehlivé elektrické spojení.

Ostatní součástky kromě izolátoru musí být připájené k pinům na spoje. Všechny piny mají podpisy, jež umožňují lehkou montáž.

Izolátor (d) je připevněný dolů šroubem k plošnému spoji, aby nedošlo k poškození teplem. Na horní straně izolátoru je pomocí šroubu zajištěn hliníkový blok (a), ke kterému jsou nainstalovány cartridge (b) a negátor (c).

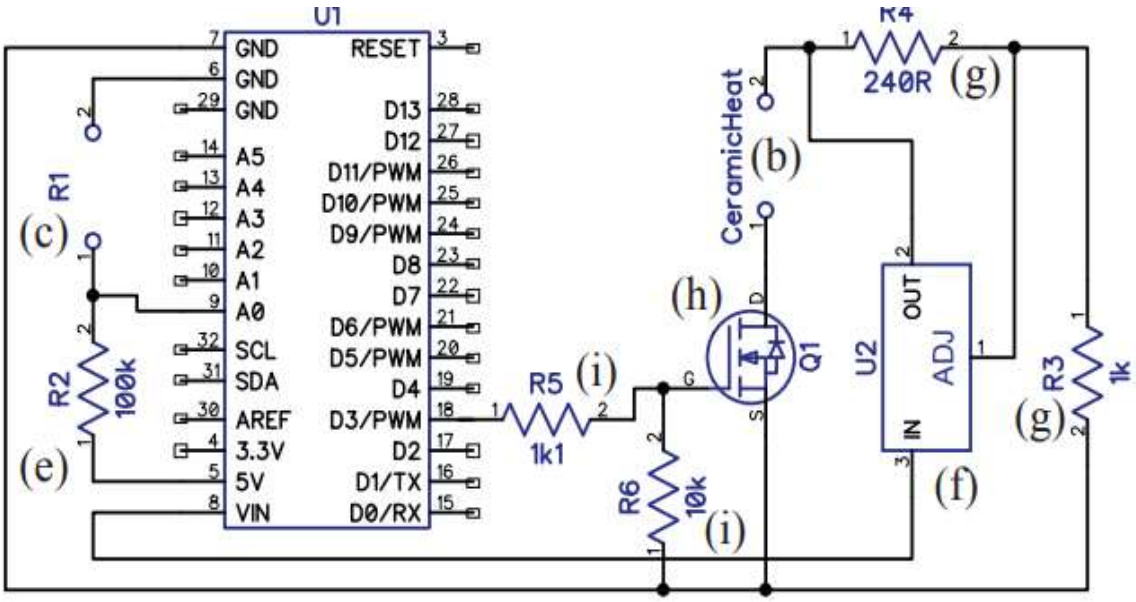
Celkem to musí vypadat jako na obrázku 15.



Obrázek 15 Připojení součástek k HeatShield [12]

Tabulka 2 Součástky

Číslo	Název	Počet
1	Arduino UNO	1
2	HeatShield	1
3	Tranzistor Buz 11, N-channel power MOSFET, 50 V, TO-220, THT	1
4	Voltage regulátor LM317T, adjustable positive linear voltage regulator, 1.2-37 V, TO-220, THT	1
5	Thermistor NTC 3950, 100 kΩ, rated 300 °C with wiring	1
6	Rezistor 100 kΩ	1
	Rezistor 1 kΩ, ¼ W, THT	2
	Rezistor 240 kΩ, ¼ W, THT	1
7	Heat Sink for the voltage regulátor, TO-220 package	1
8	Heating cartridge 24 V, 30 W, 20 × 6 mm	1
9	Heating block aluminum, 20 × 16 × 12 mm	1
10	Thermal insulator hexagonal glass-filled polyester insulator, M6 IS20HH625, 25 × 20 mm	1
11	Bolt M 6 × 20 mm, headless, block to insulator	1
	Bolt M6 ×10 mm, rounded 3,3 mm flat head, insulator to PCB	1



Obrázek 16 Elektrický obvod tepelné soustavy [12]

Topný blok používaný v 3D tiskárně je vyroben z hliníku a má rozměry 20 × 16 × 12 mm. Tento blok obsahuje keramickou topnou patronu, která je klíčová pro ohřev a udržování požadované teploty v systému.

Zpětná vazba v systému je zajišťována pomocí rezistoru s negativním teplotním koeficientem (NTC) o hodnotě 100 kΩ. Tento NTC rezistor měří aktuální teplotu bloku a poskytuje zpětnou vazbu pro řízení teploty.

Topný blok je namontován na tepelném izolátoru, který zabraňuje přenosu tepla na desku plošných spojů (DPS) a tím chrání elektrické komponenty před poškozením. Ocelový šroub je použit k upevnění topného bloku na izolátor a zároveň slouží jako místo přívodu pro roztavené plastové vlákno vytlačované z hlavy [12].

Termistor je připojen k analogovému vstupu A0 na desce Arduino prostřednictvím napěťového děliče, který je spárován s rezistorem o hodnotě 100 kΩ.

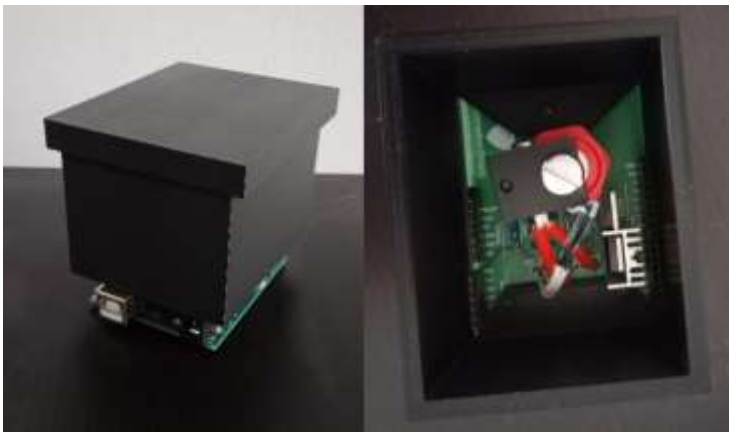
Bezpečné použití maximální teploty topného bloku bylo stanoveno na 80 °C. Protože kombinace teploty a času může být kritická, zajišťuje, že expozice teploty nad tuto úroveň je omezena na méně než jednu sekundu. I když to stále může představovat určité riziko zranění, pokud dojde k náhodnému kontaktu, je zde dostatek času na rychlou reakci a stažení prstu [12].

I kdyby bylo možné omezit teplotu tiskové hlavy hardwarově, rozhodli jsme se implementovat toto omezení pouze softwarově z důvodů bezpečnosti.

Maximální možné napětí a tím pádem i proud a výkon dodávaný do topné patrony je omezen a regulován pomocí lineárního regulátoru napětí (f). Tento regulátor napětí odebírá externí 12V vstup z pinu Vin a snižuje jej na požadované napětí, které je konfigurováno pomocí odporů (g) připojených k jeho nastavitelnému vstupnímu terminálu [12].

Sériový odpor chrání mikrokontroler při přechodových jevech, zatímco paralelní odpor se zemí zajišťuje, že plovoucí elektrické stavy nezpůsobí náhodné vypnutí ohřívače (i).

Na obr. 17 je ukázána laboratorní tepelná soustava HeatShield, která byla vyrobena.



Obrázek 17 Vyrobená tepelná soustava HeatShield

2.3 Softwarové řešení Arduino IDE

Jak bylo vysvětleno dříve, naprogramovat soustavu HeatShield je možné nejen v MATLAB, ale také v programovém rozhraní Arduino IDE.

Arduino IDE (Integrated Development Environment) je vývojové rozhraní určené pro naprogramování mikrokontrolerů Arduino. Umožňuje lehké psaní kódu, kompilaci a nahrávání přímo do mikrokontroleru [13].

K soustavě HeatShield byl vymyšlen ukázkový kód, který přiveden v příloze A. Pomocí toho kódu je možné provádět kontrolu schopností systému, regulovat teplotu dvoupolohovým regulátorem. Tento kód umožňuje, v reálném čase monitorovat stav regulace a běh programy.

Na začátku programu jsou zahrnuty knihovny heatshield.h a sampling.h, které poskytují funkce pro interakci s hardwarem a správu vzorkování. Dále jsou načteny proměnné obsahující konfiguraci pro periodu vzorkování, referenční trajektorii a parametry regulátoru. Pole R definuje požadované hodnoty teplot v různých fázích.

Funkce loop neustále kontroluje, zda je povoleno vzorkování. Pokud ano, provede krok regulace a následně zakáže vzorkování až do dalšího přerušení.

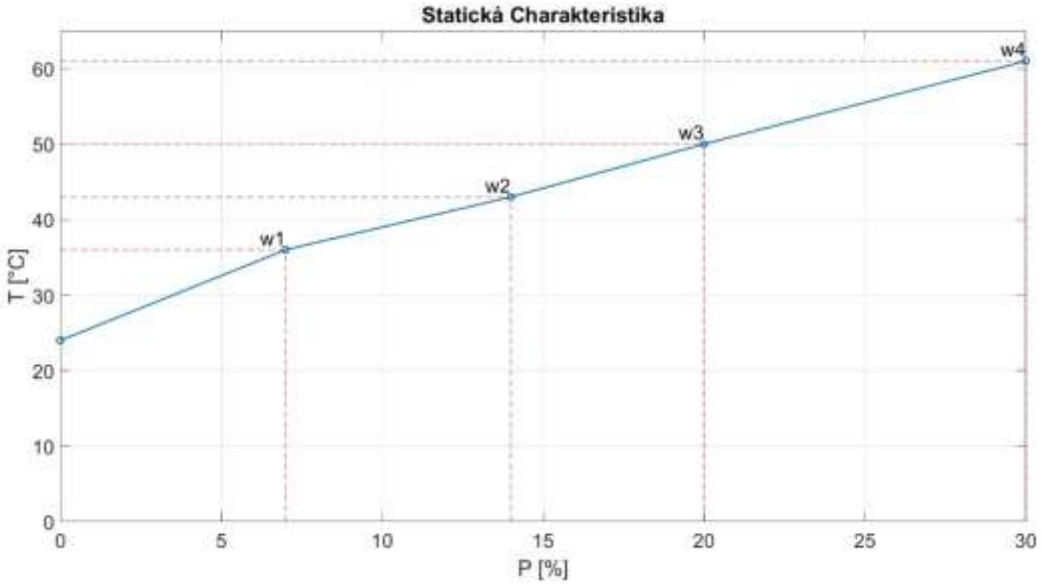
Funkce stepEnable je přerušovací servisní rutina (ISR), která nastaví příznak enable na true, což umožňuje hlavní smyčce provést krok regulace.

Pro správný běh kódu v programovém prostředí musí být nainstalována speciální knihovna pro HeatShield, kterou lze nalézt na webové stránce [8]. Knihovna HeatShield.h umožňuje psát kód, který mikrokontroler může přečíst a řídit tepelnou soustavu.

2.4 Testování funkčnosti soustavy

Statická charakteristika systému je graf nebo rovnice, jež popisuje vztah mezi vstupem a výstupem systému v ustáleném stavu, tedy když všechny přechodné jevy pominuly a systém dosáhl rovnováhy. Statická charakteristika ukazuje, jak systém reaguje na různé hodnoty vstupu za podmínek, kdy se čas nebere v úvahu [14].

Matematicky může být vyjádřena jako y = f (u)



Obrázek 18 Statická charakteristika

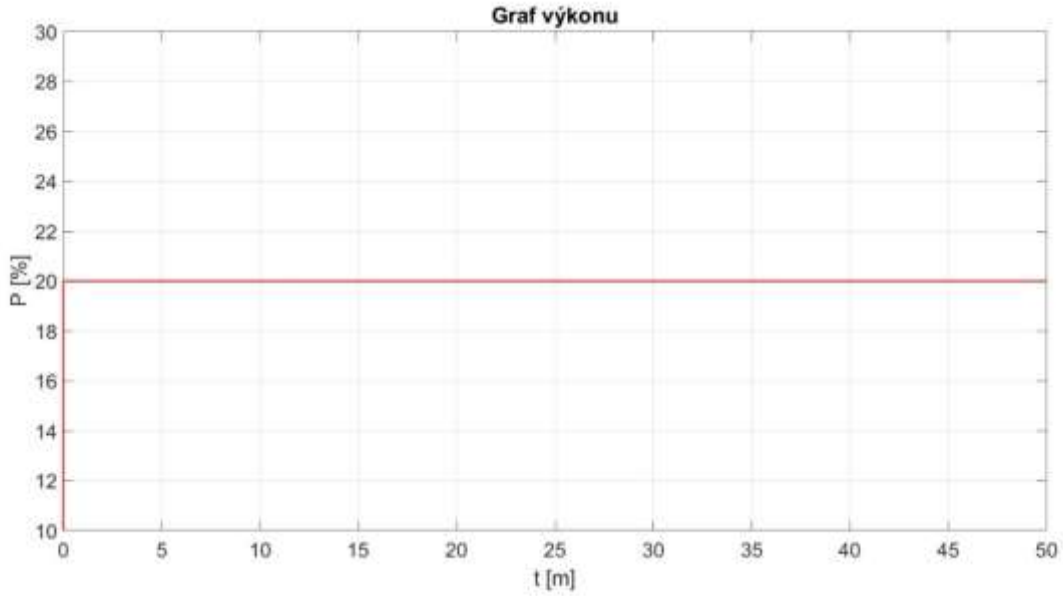
Podle statické charakteristiky tepelné soustavy se zjistí závislost teploty T na výkonu P:

Tabulka 3 Parametry

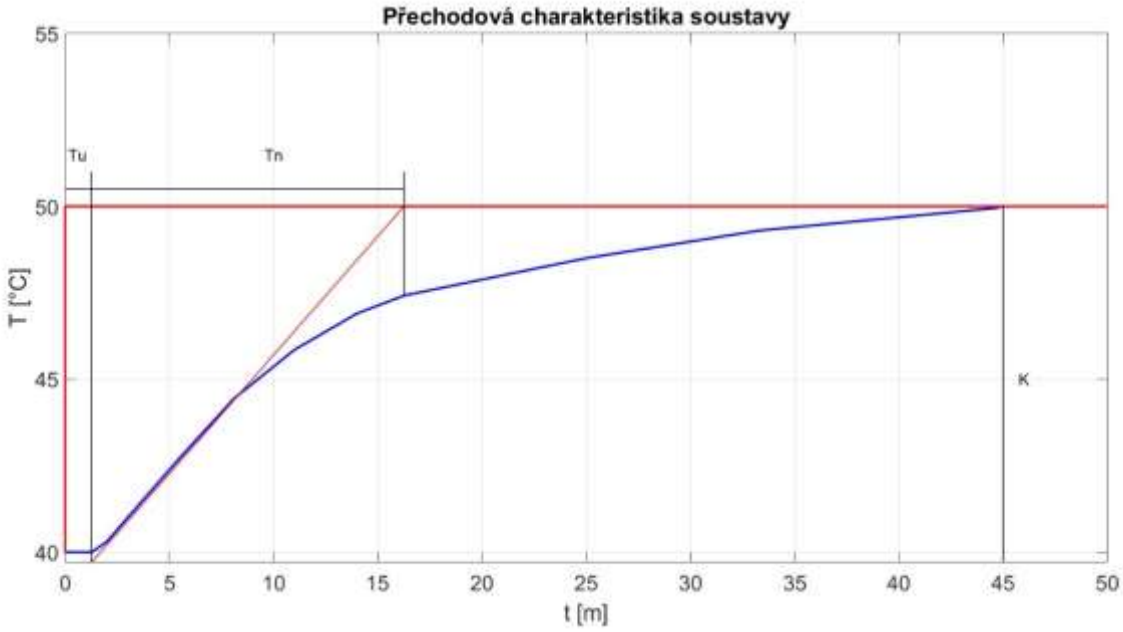
P [%]	T [°C]
7	**36**
14	**43**
20	**50**
30	**61**

Pro přechodovou charakteristiku soustavy se použije skok z 10 % do 20 % výkonu.

Na grafu přechodové charakteristiky se nakreslí přímka a najde se doba náběhu a průtahu.



Obrázek 19 Graf výkonu



Obrázek 20 Přechodová charakteristika soustavy (skok od 40 °C do 50 °C)

Z grafu lze vyčíst, že teplota má lineární růst. Doba ustálení při výkonu 20 % je 45 minut. Zesílení (k), které je potřebné pro dosažení 50 °C, je rovno 1. Na grafu jsou uvedeny doby náběhu a průtahu.

Ve příloze B je ukázán kód MATLAB pro sestavení grafu přechodové charakteristiky soustavy.

Tabulka 4 Doba náběhu a průtahu

Název doby	**t [m]**
Doba průtahu (Tu)	1.26
Doba náběhu (Tn)	15

2.5 Ukázkové laboratorní úlohy

Dál se práce bude věnovat praktickému použití soustavy ve výuce. K tomu byly navrženy dvě laboratorní úlohy, která jsou zaměřené na řízení tepelné soustavy.

Úkol: najít vhodné parametry pro PI regulátor a provést regulační experiment. Nakreslit graf přechodové charakteristiky uzavřeného regulačního obvodu.

Použití: Mikrokontroler Arduino UNO R3, tepelná soustava HeatShield, MATLAB-SIMULINK.

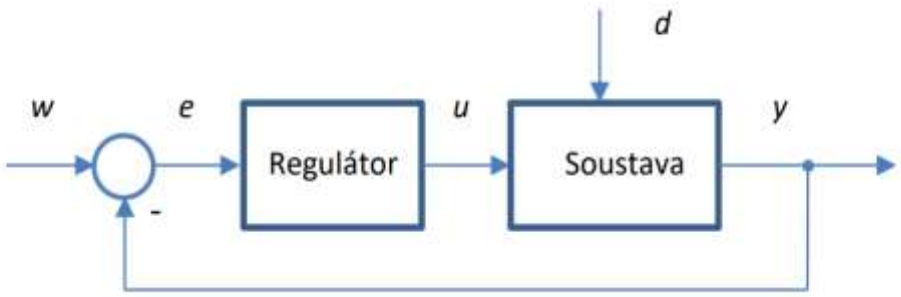
Cíl práce: Provést řízení tepelné soustavy, sestavit přechodovou charakteristiku uzavřeného regulačního obvodu a provést ladění PI regulátoru.

Popis práce: HeatShield je dynamický systém, kde při změně výkonu topení dochází k dynamické změně teploty.

2.5.2 PI regulátor

(Proporcionálně integrační) regulátor obsahuje pouze proporcionální a integrační členy. Proporcionální člen zajišťuje okamžitou reakci na chybu mezi skutečným a požadovaným výstupem, zatímco integrační člen koriguje dlouhodobé odchylky a zajišťuje, aby systém dosáhl ustáleného stavu bez trvalé regulační odchylky. PI regulátor je často používán tam, kde je vyžadováno rychlé dosažení a udržení přesného nastaveného bodu, ale není zapotřebí reagovat na rychlé změny vstupních podmínek [14].

Řízení zařízení je realizováno pomocí uzavřeného regulačního obvodu na obr. 21.



Obrázek 21 Regulační obvod

Kde:

u je akční veličina,

y regulovaná veličina,

w je žádaná hodnota,

e je regulační odchylka (e = w–y).

d je porucha.

Regulace směřuje k tomu, aby e = 0 nebo bylo blízké nule.

Regulátor má funkci sledování žádané hodnoty regulované veličiny a potlačení negativního vlivu poruchových veličin d.

Pro nastavení regulátoru bude se používat Ziegler Nicholsova metoda.

U metody lze určení doby průtahu a náběhu chápat jako určitou aproximaci modelem prvního řádu s dopravním zpožděním, a metoda tedy není vhodná pro nižší řády bez dopravního zpoždění, kde vychází malá doba průtahu a regulátor má ve výsledku velké zesílení a malou integrační časovou konstantu [14].
Pro hledaní vhodných parametru použije skok ze 10 % do 20 % výkonu (obr. 19). Podle statické charakteristiky soustavy (obr. 18), k tomu výkonu patří hodnoty: T1 = 40 °C a T2 = 50 °C.

Pak sestaví přechodová charakteristika soustavy (obr. 20) a z ní vypočtou doba náběhu, doba průtahu, a zasílaní.

Pro výpočet parametrů regulátora byly hodnoty doby náběhu a průtahu převedeny z minut na hodiny.
Tn (doba náběhu) = 0,25 h

Tu (doba průtahu) = 0,021 h

$k_I = 1$

Podle tab. 5 jsou vypočteny parametry PI regulátoru.

2.5.3 Výpočet parametrů pro PI regulátor

Tabulka 5 Vypočet parametrů regulátora

Regulátor	k_P	T_I	T_D
P	$\frac{T_n}{k_1 T_u}$	-	-
PI	$0{,}9\frac{T_n}{k_1 T_u}$	$3{,}33T_u$	-
PID	$1{,}2\frac{T_n}{k_1 T_u}$	$2T_u$	$0{,}5T_u$

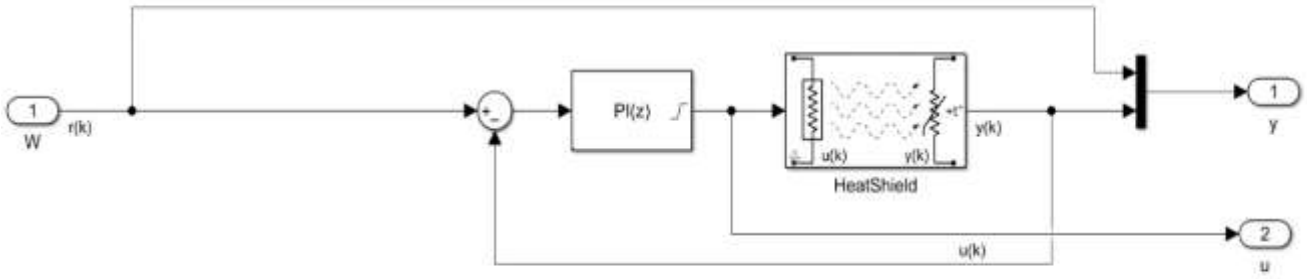
$$kp = 0{,}9 * \frac{0{,}25}{1*0.021} = 10{,}71 \quad (1)$$

$$Ti = 3{,}33 * 0{,}021 = 0{,}06993 \quad (2)$$

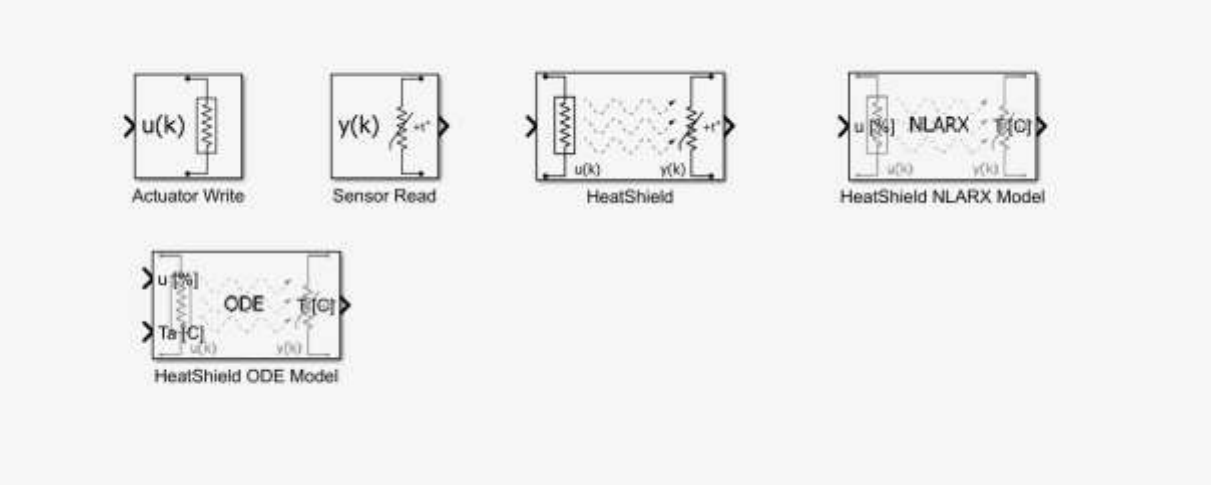
Tabulka 6 Parametry PI regulátoru

Parametr	Hodnota
kp	10.7
Ti	0.07

Pro páce v SIMULINK byla vytvořená schéma, jež obsahuje bloky z knihovny Heatlibrary.



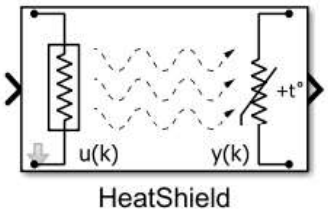
Obrázek 22 Bloková schéma řízení soustavy HeatShield PI regulátorem



Obrázek 23 Knihovna HeatShield [8]

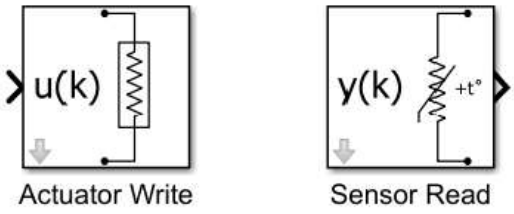
Pro sestavení schématu byly použity bloky z knihoven SIMULINK a HeatShield. Hlavní blok HeatShield měl na vstupu připojený blok PI regulátoru. Signál u(k) z bloku PI byl používán jako akční veličina, která ovlivňuje výkon systému. Tento signál byl zapojen do bloku OUT 2 a ke vstupu HeatShield.

Výstup y(k) byl spojen s hodnotou r(k) a dále zapojen do bloku OUT1. Hodnoty z bloku OUT ukazují reálnou teplotu a požadovanou teplotu. Kromě toho je signál y(k) zpětná vazba systému, která je připojena k bloku sumátor.



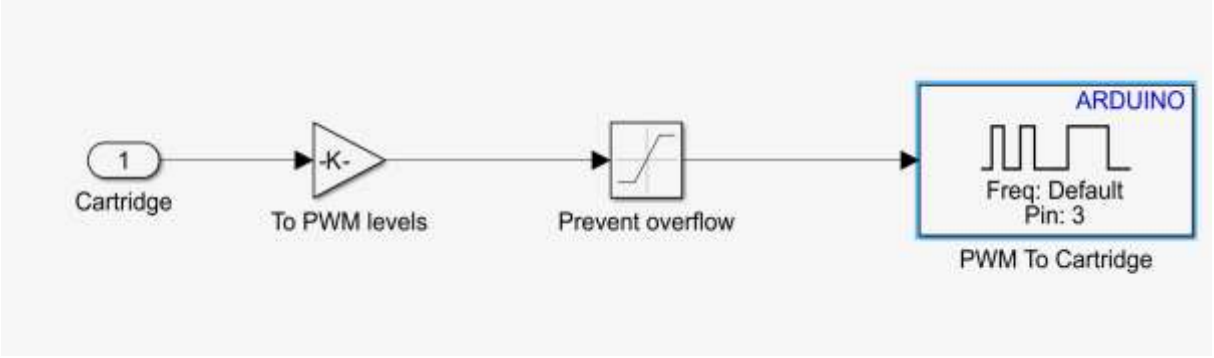
Obrázek 24 Blok HeatShield

Blok HeatShield se skládá z Actuator Write a Sensor Read.



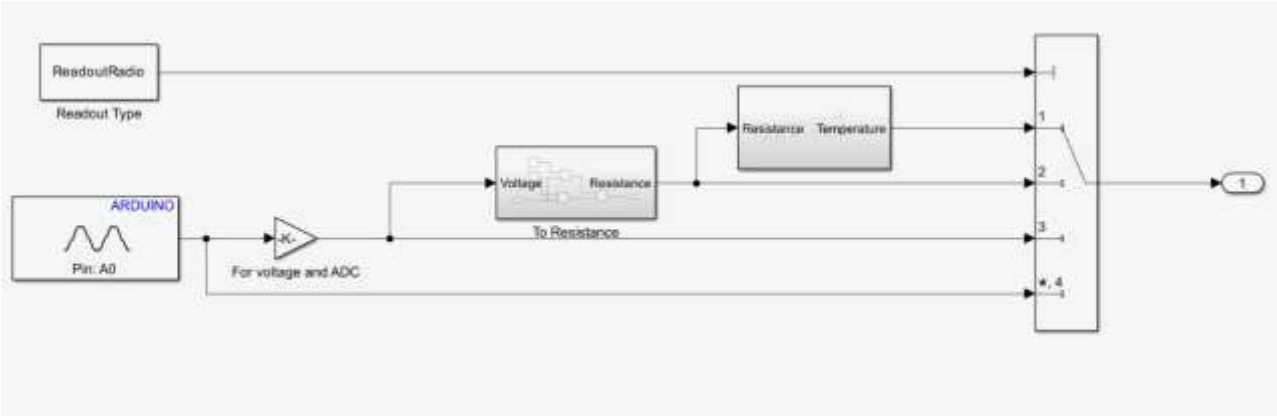
Obrázek 25 Bloky Actuator Write a Sensor read

Blok Actuator Write se skládá z několika bloků knihovny SIMULINK, které slouží k transformaci signálu z regulátoru na signál pro blok PWM Arduino. Blok přijímá hodnoty mezi 0 a 255. Vstup řídí pracovní cyklus čtvercového signálu. Vstupní hodnota 0 vytváří 0% pracovní cyklus a vstupní hodnota 255 vytváří 100% pracovní cyklus.



Obrázek 26 Schéma Actuator write

Sensor Read přijímá signál od termistoru a převádí ho v double a odesílá ho jako výstupní signál soustavy.

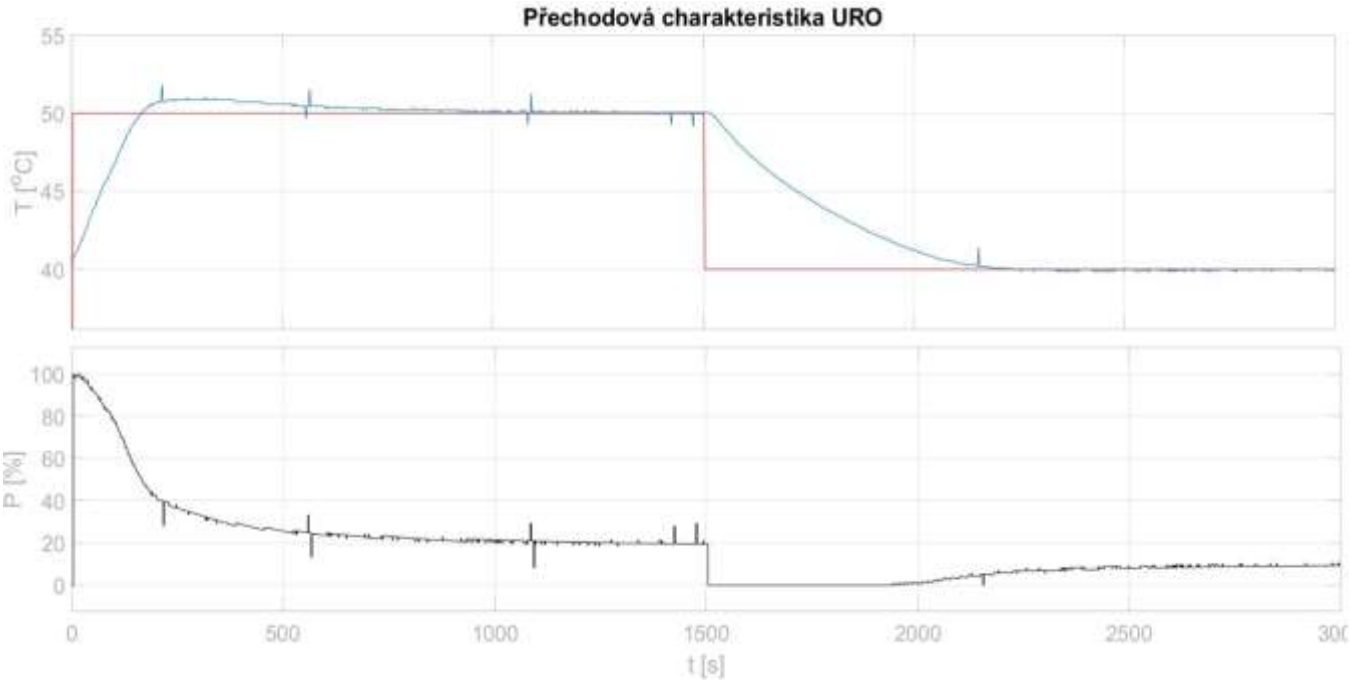


Obrázek 27 Schéma Sensor Read

2.5.4 Přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu

Přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu je grafické znázornění odezvy systému na změnu vstupního signálu. Charakteristika ukazuje, jak rychle a jak přesně systém reaguje na změny vstupního signálu. Mezi hlavní charakteristiky patří: rychlost odezvy, přetlumení, ustálená hodnota a přesnost.

- Rychlost odezvy udává, jak rychle systém dosáhne stabilního stavu po změně vstupního signálu.
- Přetlumení popisuje míru, do jaké systém přesahuje před dosažením ustálené hodnoty.
- Ustálená hodnota je konečná hodnota, které dosáhne výstup systému po ustálení.
- Přesnost se týká míry, do jaké výstup systému odpovídá vstupnímu signálu.



Obrázek 28 Graf přechodové charakteristiky URO

Na přechodové charakteristice (obr. 28) lze pozorovat, že teplota (modrá čára) začíná růst od 40 °C. Výkon (černá čára) výrazně klesá ze 100 % na 20 %. Hodnota výkonu se stabilizuje a díky tomu se teplota ustálí na požadované hodnotě 50 °C.

V čase 1500 [s] se požadovaná hodnota změní na 40 °C a systém na tuto změnu reaguje snížením výkonu na 0 %, což umožní ochlazení systému. Výkon se následně zvýší na hodnotu 10 %. Díky tomu se teplota ustálí, na novou požadovanou hodnotu.

Taková reakce výkonu na změnu umožňuje přesné řízení teploty v dynamickém systému.

2.5.5 Závěr

Cílem této laboratorní úlohy bylo vypočítat parametry pro PI regulátor, sestavit blokové schéma pro řízení tepelné soustavy a změřit přechodovou charakteristiku uzavřeného regulačního obvodu.

2.5.6 Laboratorní úloha: Řízení soustavy HeatShield dvoupolohovým regulátorem

Úkol: Sestavit blokové schéma pro řízení soustavy v SIMULINK, změřit přechodovou charakteristiky uzavřeného regulačního obvodu, provést hodnocení práce.

Použití: Mikrokontroler Arduino UNO R3, tepelná soustava HeatShield, MATLAB-SIMULINK.

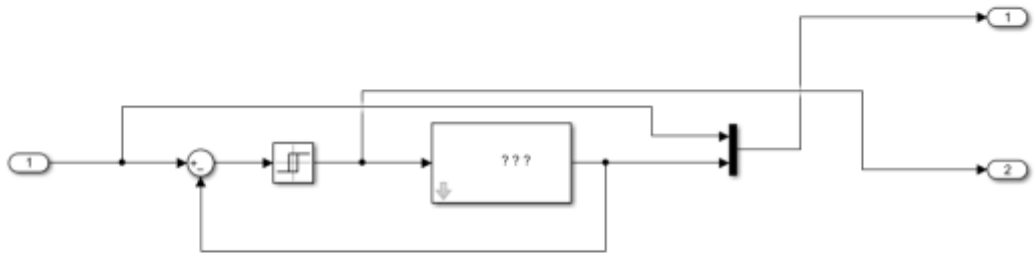
Cíl práce: Navrhnout řízení pomocí dvoupolohového regulátoru a provést regulační experiment.

Popis práce: Dvoupolohový regulátor je jednoduchý typ regulátoru, který má dvě diskrétní hodnoty výstupu: buď je v jednom stavu (například zapnutý), nebo v druhém stavu (vypnutý). Tento typ regulátoru je také známý jako regulátor se spínáním nebo jako reléový regulátor.

2.5.7 Dvoupolohový regulátor

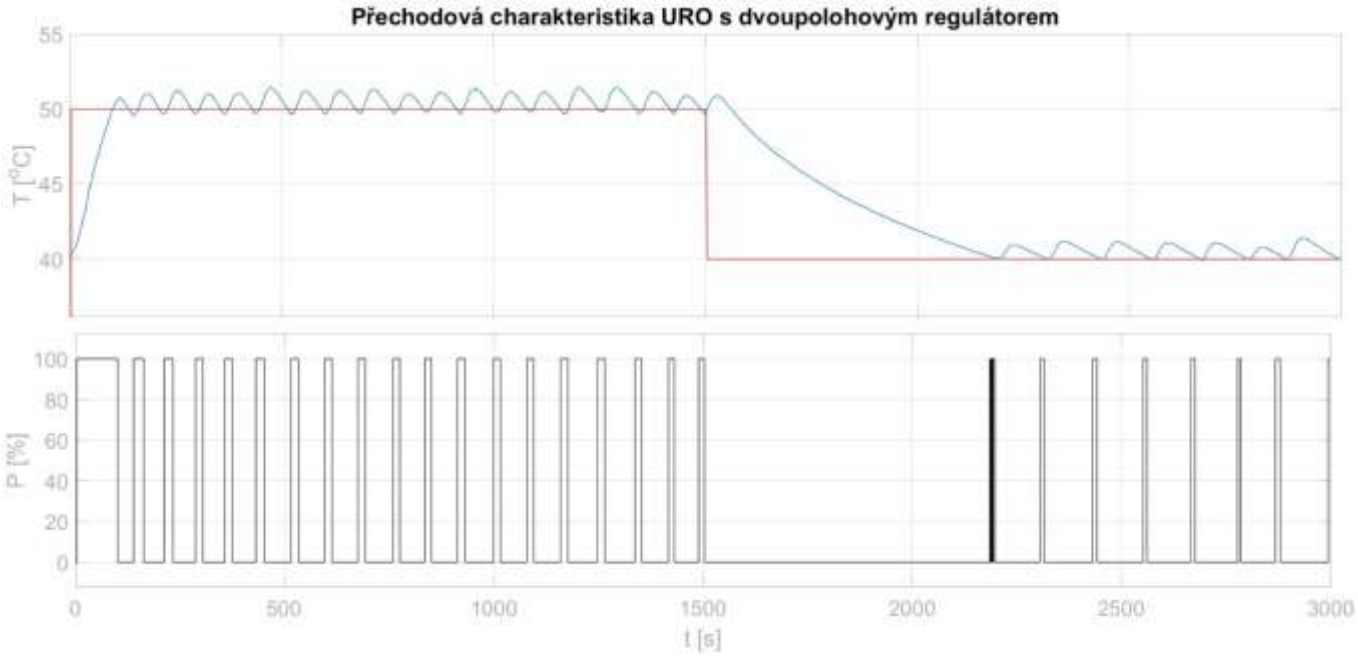
Princip fungování dvoupolohového regulátoru je velmi jednoduchý: pokud měřená veličina překročí žádanou hodnotu, regulátor přepne výstup do jednoho stavu (například zapne topení). Jakmile měřená veličina klesne pod žádanou hodnotu, regulátor přepne výstup do druhého stavu (například vypne topení) [14].

Blokové schéma uzavřeného regulačního obvodu s dvoupolohovém regulátorem



Obrázek 29 Bloková schéma soustavy HeatShield s dvoupolohovým regulátorem

2.5.8 Přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu s dvoupolohovým regulátorem



Obrázek 30 Přechodová charakteristika URO dvoupolohovým regulátorem

Z přechodové charakteristiky URO (obr. 30) lze vyjádřit, že měřená teplota (modrá čára) začíná růst od 40 °C. Když dosáhne požadované hodnoty (červená čára), která je rovna 50 °C, začíná mírně oscilovat, což je způsobeno tím, že dvoupolohový regulátor přepíná mezi zapnutým a vypnutým stavem. To lze vidět na grafu výkonu (černá čára).

Ve čase t = 1500 [s] dochází ke změně požadované hodnoty. Systém na tuto změnu reaguje vypnutím regulátoru. Regulátor se znovu zapne, pouze když teplota klesne na určitou hodnotu (40 °C).

2.5.9 Závěr

Cílem této laboratorní úlohy bylo sestavit blokové schéma pro řízení tepelné soustavy dvoupolohovým regulátorem a změřit přechodovou charakteristiku uzavřeného regulačního obvodu.

..

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo provést rešerši laboratorních tepelných soustav, vyrobit, oživit a otestovat tepelnou soustavu HeatShield. V práci byla popsaná také problematika automatického řízení.

V první části práce byly podrobně popsány laboratorní tepelné soustavy, jejich využití pro výuku automatizace. Uvedeny byly hlavní části soustavy a možnosti její naprogramování.

Ve druhé části byla představena tepelná soustava HeatShield, její funkcionality, hardwarové a softwarové řešení. Pro praktické použití byly navrženy dvě laboratorní úlohy.

V závěru bych chtěl ještě popsat hlavní výhody soustavy HeatShield.

- Nízká cena: Celkem všechny součástky stojí asi 4000 Kč. K tomu je možné přidat licenci k MATLABu, která stojí pro školy 5500 Kč (na rok). Pro úsporu nákladů je možné použít aplikaci Arduino IDE, která je zdarma. Pokud srovnáme cenu s jinými zařízeními, má HeatShield v tomto ohledu velkou výhodu.

- Malé rozměry: Další výhodou tohoto zdroje muže byt jeho kompaktní rozměr. Délka 74 mm, výška 80 mm, šířka 68 mm. Malé rozměry umožnuje snadné používaní tepelné soustavy.

- Rychlost a jednoduchost programování: Díky použití mikrokontroleru Arduino UNO je možné naprogramovat soustavu bez speciálních pomůcek. K tomu jen potřebné mít, počítač a instalované do něho programátorské prostředí.

Z toho lze usuzovat, že tepelná soustava HeatShield je vhodná pro výuku automatického řízení. Splňuje všechny požadavky a je vhodná pro uživatele, kteří chtějí jednoduše a levně experimentovat.

POUŽÍTA LITERATURA

[1] PLESKOT, Alois. *Základy automatizace*. Informatorium, 2019. ISBN 978-80-7333-136-8.

[2] TECQUIPMENT. *TEMPERATURE MEASUREMENT AND CALIBRATION*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.tecquipment.com/temp-measurement-and-calibration. [cit. 2024-08-04].

[3] PA. HILTON. *HEAT EXCHANGER SERVICE UNIT*. Online. 2022. Dostupné z: https://www.p-a-hilton.co.uk/products/heat-transfer/heat-exchanger-service-unit. [cit. 2024-08-04].

[4] GUNT. *GUNT WL 110.20 Water Chiller*. Online. 2024. Dostupné z: https://www.gunt.de/en/products/equipment-series/wl-110-series-heat-exchangers. [cit. 2024-08-04].

[5] GLEEBLE. *Gleeble 3800-GTC*. Online. Dostupné z: https://gleeble.com/products/gleeble-systems/gleeble-3800.html. [cit. 2024-08-04].

[6] BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 80-7300–148-9.

[7] *MATLAB*. Online. 2022. Dostupné z: https://matlab.mendelu.cz/. [cit. 2024-08-10].

[8] AutomationShield, Control Systems Engineering Education [online]. AutomationShield [cit.13. 10. 2023]. Dostupné z: https://github.com/gergelytakacs/AutomationShield/wiki/HeatShield.

[9] SELECKÝ, Matúš. Arduino: uživatelská příručka. Přeložil Martin HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.

[10] TIMMIS, Harold. Practical Arduino engineering: end to end development with the Arduino, Fusion 360, 3 D printing, and Eagle. Second edition. Technology in action. New York: Apress, [2021]. ISBN 978-1-4842-6851-3.

[11] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. *Senzory neelektrických veličin*, *1*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.

[12] Takács,G.,M. Gulan, J. Bavlna, R. Köplinger, M. Kovác, E. Mikuláš, S. Zarghoon a R. Salíni, 2019. HeatShield: a Low-cost didactic device for control education simulating 3D printer heater blocks. In *EDUCON 2019: IEEE Global Engineering Education Conference*, Dubai 9.–11. dubna 2019: Sborník konference *EDUCON 2019* [online]. Dubai: American University in Dubai [cit. 2024-06-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333492165.DOI: 10.1109/EDUCON.2019.8725201

[13] Nagel, Ch., Evjen, B., Glynn, J., Skinner, M.W. *C# 2005 – Programujeme profesionálně*. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 80-251-1181-4.

[14] VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. Základy automatické regulace. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A *Kód pro řízení tepelné soustavy dvoupolohovým regulátorem.* 49
Príloha B *MATLAB kód graf přechodové charakteristiky soustavy.* 51

Příloha A *Kód pro řízení tepelné soustavy dvoupolohovým regulátorem.*

```
#include <HeatShield.h>     // Include the library
#include <Sampling.h>       // Include sampling
unsigned long Ts = 2000;    // Sampling time in milliseconds
unsigned long k = 0;
bool enable = false;
float R = 0.0;              // Reference
float R[] = {37.0, 75.0, 35.0, 70.0, 50.0, 0.0}; // Reference trajectory
int T = 1800;               // krok
int i = 0;                  // Section counter
float Y = 0.0;              // vystup
float U = 0.0;              // vstup
#define THRESHOLD 10.0
void setup () {
  Serial.begin(9600);
  // Initialize  board
  HeatShield.begin();
  // Initialize
  Sampling.period(Ts * 1000);
  Sampling.interrupt(stepEnable);
}
void loop() {
  if (enable) {
    step();
    enable = false;
  }
}
void stepEnable() {
```

```
  enable = true;
}
//  algorithm
void step() {
  if (k % (T * i) == 0) {
    R = R[i];
    i++;
    if (i >= sizeof(R) / sizeof(R[0])) {
      i = 0;
    }
  }
  y = HeatShield.sensorRead(); // čtí sensor
// control logic
  if (Y < R - THRESHOLD) {
    U = 100;         // Actuator zapní
  } else if (Y > R + THRESHOLD) {
    U = 0;           // Actuator vypní
  } else {
    U = U;
  HeatShield.actuatorWrite(u); // Actuate
  Serial.print(R);        // Print požadovaná hodnota
  Serial.print(", ");
  Serial.print(Y);        // Print vystup
  Serial.print(", ");
  Serial.println(U);      // Print vstup
  k++;
}
```

Príloha B *MATLAB kód graf přechodové charakteristiky soustavy.*

```
% Definování hodnot x a y pro první graf
x = [0, 1.26, 1.4, 2, 3, 5.5, 8.1 ,11, 14, 16.27, 25, 33.33, 44.67, 45, 50];
y = [40, 40, 40.05, 40.3, 41, 42.724, 44.44, 45.85, 46.9, 47.42, 48.5, 49.3, 49.95, 50, 50];
% Definování hodnot x2 a y2 pro druhou čáru
x2 = [0, 0, 50];
y2 = [40, 50, 50];
x3 = [1.26, 16.26];
y3 = [39.7, 50];
Tn = 16.26;
Tu = 1.26;
K = 45; % Hodnota K (správně pojmenovaná proměnná)
% Vytvoření grafu
figure; % Otevře nové okno pro graf
% Plotování první série dat (modré body a čára)
plot (x, y, '-b', 'LineWidth', 2);
hold on; % Udrží aktuální graf, aby bylo možné přidat další data
% Plotování druhé série dat (červená čára)
plot (x2, y2, '-r', 'LineWidth', 2); % Červená čára
plot (x3, y3, '-r', 'LineWidth', 1); % Červená čára
% Přidání horizontální černé čáry od osy y do bodu Tu
plot ([0 Tu], [50.5 50.5], 'k-', 'LineWidth', 1); % Černá čára

% Přidání dalších černých čar
plot ([Tu Tn], [50.5 50.5], 'k-', 'LineWidth', 1);
plot ([Tn Tn], [47.42 51], 'k-', 'LineWidth', 1);
plot ([Tu Tu], [39.7 51], 'k-', 'LineWidth', 1);
plot ([K K], [39.7 50], 'k-', 'LineWidth', 1); % Přidání černé čáry na pozici K
% Přidání názvů os
```

```
xlabel('t [m]', 'FontSize', 14);
ylabel('T [°C]', 'FontSize', 14);
% Přidání názvu grafu
title('Přechodová charakteristika soustavy', 'FontSize', 16);
% Přidání popisků pro Tu, Tn a K
text (0.6, 51.5, 'Tu', 'HorizontalAlignment', 'center','FontSize', 14);
text (10, 51.5, 'Tn', 'HorizontalAlignment', 'center','FontSize', 14);
text (46, 45, 'K', 'HorizontalAlignment', 'center','FontSize', 14); % Opravený popisek K
% Nastavení rozsahu os
xlim([0 50]);
ylim([39.7 55]);
% Zobrazení mřížky
grid on;
% Ukončení držení grafu
hold off;
```