

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Senzorový systém pro řízení potravinářského procesu

Bc. Kryštof Smitka

Vedoucí: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Obor: Elektrotechnika

Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smitka** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **483882**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Senzorový systém pro řízení potravinářského procesu

Název diplomové práce anglicky:

Sensor System for Food Process Control

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s rmutovacím procesem výroby sladiny. Určete vstupní a výstupní parametry procesu.
- 2) Prostudujte možnost řízení procesu pomocí senzorového systému.
- 3) Zvolte vhodné senzory a akční členy pro řízení a vzdálený monitoring výrobního procesu.
- 4) Navrhněte zapojení senzorového systému s možností archivace dat.
- 5) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 6) Proveďte ověřovací měření.
- 7) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KREIDL, M., Měření teploty. Senzory a měřicí obvody., BEN 2005, ISBN 80-7300-145-4.
- [2] BALÁTĚ, J., Automatické řízení. Praha: BEN 2003, ISBN 80-7300-020-2.
- [3] HUSÁK, M., Mikrosenzory a mikroaktuátory. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008, ISBN 978-80-200-1478-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Jan Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé diplomové práci. Také bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 26. května 2023

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou návrhu a konstrukce modelu potravinářského výrobního procesu rmutování, který je součástí výroby piva. V práci je popsán postup výroby piva následovaný detailním popisem rmutovacího procesu. V práci je rozebráno průmyslové zařízení pro rmutování a na jeho základě navržena konstrukce funkčního modelu a elektroniky včetně řídicího algoritmu. Dále je popsán proces sestavení zmíněného modelu. Součástí práce je i nastavení regulátoru, které bylo následně otestováno. Při regulaci nepřesáhla odchylka 0,5 °C od nastavené hodnoty v požadovaném časovém rozsahu. V závěru práce jsou zhodnoceny dosažené výsledky a uvedena možná budoucí vylepšení.

Klíčová slova: Rmutovací proces, senzorový systém, PID regulátor, dvoustavový regulátor, mikrokontrolér, pivovarství

Vedoucí: Ing. Jan Novák, Ph.D.

Abstract

This thesis focuses on designing and constructing a model of the food production process called mashing, which is an integral part of beer production. The thesis provides an overview of the beer production process, followed by a detailed description of the mashing process. Additionally, the thesis analyzes industrial equipment used for mashing and proposes the construction of a functional model, along with its electronics, including a control algorithm. Next, the process of constructing the mentioned model is described. A crucial aspect of this work involves configuring the regulator, which was subsequently tested. During the regulation process, the deviation from the set value did not exceed 0.5 °C within the required time range. Finally, the achieved results are evaluated, and potential future improvements are discussed.

Keywords: Mashing process, sensor system, PID regulator, ON/OFF regulator, microcontroller, beer brewing

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	xi		
Fyzikální veličiny	xi		
Seznam zkratk	xii		
1 Úvod	1		
2 Popis procesu výroby piva	3		
2.1 Šrotování	4		
2.2 Vystírání, zapářka a rmutování	4		
2.3 Scezování a vyslazování	4		
2.4 Chmelovar	5		
2.5 Chlazení a vířivá kád'	5		
2.6 Kvašení	5		
2.7 Ležení	5		
2.8 Podrobný popis rmutovacího procesu	6		
2.8.1 Technologické teploty a prodlevy	6		
2.8.2 Druhy rmutovacích postupů	7		
3 Technologické zařízení pro rmutování a řízení rmutovacího procesu	9		
3.1 Topologie zařízení pro rmutování v praxi	9		
3.2 Možnosti řízení vyhřívání	10		
3.3 Koncepce modelového zařízení pro rmutování	12		
3.4 Sledované parametry procesu	13		
3.5 Diagram rmutovacího procesu	14		
4 Návrh modelu zařízení pro rmutování	17		
4.1 Výběr senzorů a akčních členů	17		
4.1.1 Vyhřívání nádob a výběr topného elementu	17		
4.1.2 Výběr teplotního senzoru	20		
4.1.3 Průtokoměr	22		
4.1.4 Senzor výšky hladiny	25		
4.1.5 Výběr čerpadla	27		
4.1.6 Výběr ventilů	30		
4.1.7 Výběr pohonu míchadel	32		
4.2 Návrh řídicí elektroniky	33		
4.2.1 Mikrokontrolér	34		
4.2.2 Napájení	35		
4.2.3 Spínání ventilů	36		
4.2.4 Spínání topného elementu	38		
4.2.5 Řízení motorů míchadel a čerpadla	41		
4.2.6 Zapojení senzorů	43		
4.2.7 Zapojení zařízení pro styk s uživatelem	43		
4.2.8 Ukládání dat	45		
5 Mechanická část	47		
6 Programová část	55		
6.1 Programové řešení řízení teploty	56		
7 Měření	57		
7.1 Nastavení regulátoru pomocí empirických metod	58		
7.2 Nastavení regulátoru pomocí experimentálního ručního ladění	58		
8 Závěr	63		
Literatura	65		
A Konkrétní naměřená odezva na jednotkový skok (tříparametrový model)	69		

Obrázky

2.1 Výroba piva (převzato z [1])	3	4.8 Průtokoměr YF-S201 [13]	25
2.2 Dvourmutový dekokční postup (převzato z [1])	7	4.9 Průběh činnosti ultrazvukového senzoru HC-SR04 [15]	27
2.3 Třírmutový dekokční postup (převzato z [1])	8	4.10 Schéma funkce typů kmitavých čerpadel [19]	28
2.4 Infuzní postup (převzato z [1]) . .	8	4.11 Schéma funkce typů rotačních čerpadel [19]	29
3.1 Schématické znázornění technologického zařízení pro rmutování (kresleno dle [3])	9	4.12 Vybrané čerpadlo R385 [20] . .	29
3.2 Blokové schéma PID regulátoru (kresleno dle [4])	11	4.13 Uspořádání solenoidového ventilu - 1.cívka, 2. armatura, 3. stínící kroužek, 4.pružina, 5.píst, 6.těsnění, 7.tělo ventilu [22]	31
3.3 Koncepce modelového zařízení rmutovacího procesu	12	4.14 Použitý solenoidový ventil [23]	31
3.4 Schematické zobrazení umístění jednotlivých prvků (senzory/akční členy)	14	4.15 Typické schéma zapojení frekvenčního měniče [24]	32
3.5 Obecný vývojový diagram dekokčního rmutování	15	4.16 Použitý solenoidový ventil [23]	33
3.6 Obecný vývojový diagram dekokčního rmutování	16	4.17 Typický průběh PWM signálu (převzato a upraveno z [26])	33
4.1 Vnitřní zapojení litinové ploténky (kresleno dle [7])	19	4.18 Schéma propojení mikrokontroléru s periferiemi	34
4.2 Schéma obecného uspořádání termočlátku [9]	21	4.19 Schéma zapojení modulu s regulátorem napětí LM2596ADJ . .	36
4.3 Teplotní senzor DS18B20 v nerezové trubičce	22	4.20 Schéma zapojení spínání solenoidového ventilu	37
4.4 Schématické uspořádání tlakového průtokoměru [11]	23	4.21 Schéma zapojení spínání topného elementu (ploténky) - vychází z doporučeného zapojení katalogového listu [37]	39
4.5 Schématické uspořádání magnetického průtokoměru [11] . . .	23	4.22 Příklad spínání triaku za využití obvodu pro spínání v 0	39
4.6 Schématické uspořádání ultrazvukového Dopplerova průtokoměru [11]	24	4.23 Příklad průběhu jednoho spínacího cyklu, kdy je triak zapnut 50% délky cyklu	40
4.7 Schématické uspořádání turbínkového (A) a lopatkového (B) průtokoměru [12]	24	4.24 Schéma obvodu pro detekci přechodu napájecího napětí 0 podle [40]	40
		4.25 Schéma připojení DC motoru k obvodu L293D [41]	41

4.26 Schéma připojení DC motoru k obvodu L293D [41]	42
4.27 Schéma zapojení spínání čerpadla	42
4.28 Schéma připojení senzorů	43
4.29 Schéma klávesnice a okamžitá signalizace	44
4.30 Schéma připojení LCD displejů (sběrnice I2C)	44
4.31 Schéma zapojení modulu microSD karty	45
5.1 Hrubé konstrukční uspořádání systému	47
5.2 Pohled na vnitřek kádě	48
5.3 Detailní pohled na míchadlo	49
5.4 Vrchní pohled na víko kádě s osazeným pohonem, servisním otvorem a uložením senzoru	49
5.5 Vrchní pohled na uložení topného elementu (ploténky)	50
5.6 Pohled na vnitřek boxu s elektronikou (fotografie z průběhu stavby)	50
5.7 Ovládací panel systému	51
5.8 Pohled na kompletní systém	52
5.9 Boční pohled na kompletní systém	53
6.1 Ilustrace činnosti regulátoru	56
7.1 Tříparametrový model soustavy s konstantami	57
7.2 Výstup měření ($K_p = 300$; $K_i=0$; $K_d=0$)	59
7.3 Výstup měření ($K_p = 300$; $K_i=0,015$; $K_d=0$)	60
7.4 Výstup měření ($K_p = 300$; $K_i=0,015$; $K_d=0$)	61

Tabulky

2.1 Přehled technologických teplot.	7
3.1 Přehled výstupních parametrů rmutovacího procesu.	13
3.2 Přehled vstupních parametrů rmutovacího procesu.	13
4.1 Typické hodnoty účinností topných těles a vařičů. [1]	18
4.2 Výkony jednotlivých stupňů ploténky	20
4.3 Vybrané parametry teplotního čidla DS18B20 [10]	22
4.4 Vybrané parametry průtokoměru YF-S201 [13]	25
4.5 Vybrané parametry senzoru HC-SR04 [15]	27
4.6 Vybrané parametry čerpadla R385 [20]	30
4.7 Vybrané parametry solenoidového ventilu [23]	31
4.8 Vybrané parametry motoru JGA25-370 [25]	32
4.9 Vybrané parametry mikrokontroléru ATmega2560 [27]	35
4.10 Seznam komponent systému s maximálním udávaným/odhadovaným odběrem	35
4.11 Logické úrovně pro řízení motorů [41]	41
4.12 Uspořádání dat zálohovaných na microSD kartu	45
7.1 Teoretické předpoklady chování odezvy systému (převzato z [45])	59

Seznam zkratek a symbolů

Fyzikální veličiny

Symbol	Jednotka	Význam
Q_{MAX}	W	Maximální tepelný výkon
c	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	Tepelná kapacita
ρ	$kg.m^{-3}$	Hustota
V	m^3	Objem
dT	$^{\circ}C.s^{-1}$	Rychlost ohřevu
η	-	Účinnost
P	W	Výkon
f	Hz	Frekvence
Q	$l.min^{-1}$	Průtok
D	-	Střída
U_{AV}	V	Průměrné napětí za periodu
U_{ON}	V	Amplituda modulovaného napětí
U_{OUT}	W	Výstupní napětí
U_{REF}	W	Referenční napětí
R_1	Ω	Zvolený odpor děliče
R_{V1}	Ω	Hodnota odporu potenciometru děliče
P_Z	W	Ztrátový výkon
I_{MAX}	A	Maximální proud součástkou
$R_{DS(on)}$	Ω	Odpor součástky v sepnutém stavu
T_a	$^{\circ}C$	Teplota okolního prostředí
T_j	$^{\circ}C$	Teplota součástky
R_{thJ-C}	$W.^{\circ}C_{-1}$	Tepelný odpor přechodu čip-pouzdro
R_{thC-R}	$W.^{\circ}C_{-1}$	Tepelný odpor přechodu pouzdro-chladič
R_{thR-A}	$W.^{\circ}C_{-1}$	Tepelný odpor přechodu chladič-okolní prostředí
$e(t)$	-	Chyba (vstup regulátoru)
$u(t)$	-	Řídící proměnná (výstup regulátoru)
k_p	-	Konstanta proporcionálního členu
k_i	-	Konstanta integračního členu

.....

k_d - Konstanta derivačního členu

■ Seznam zkratek

Zkratka	Význam
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
I ² C (IIC)	Internal Integrated Circuit Bus
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
NC	Normaly Closed
NMOS	N-type Metal Oxide Semiconductor
NO	Normaly Open
NTC	Negative Temperature Coefficient
PID	Proportional Integral Derivative controller
PTC	Positive Temperature Coefficient
PWM	Pulse Width Modulation
RTD	Resistance Temperature Detector
SD	Secure Digital
SPI	Serial Peripheral Interface



Kapitola 1

Úvod

Výroba piva je lidstvu známa již po staletí a má velmi bohatou historii. Podle některých historiků se dokonce jedná o nejstarší lidmi vyráběný nápoj. Na světě existuje nepřehledné množství receptů a druhů tohoto nápoje, který kromě velikých průmyslových zařízení vyrábí také mnoho lokálních a restauračních pivovarů, či nadšenců, kteří si pivo vyrábí sami v domácích podmínkách.

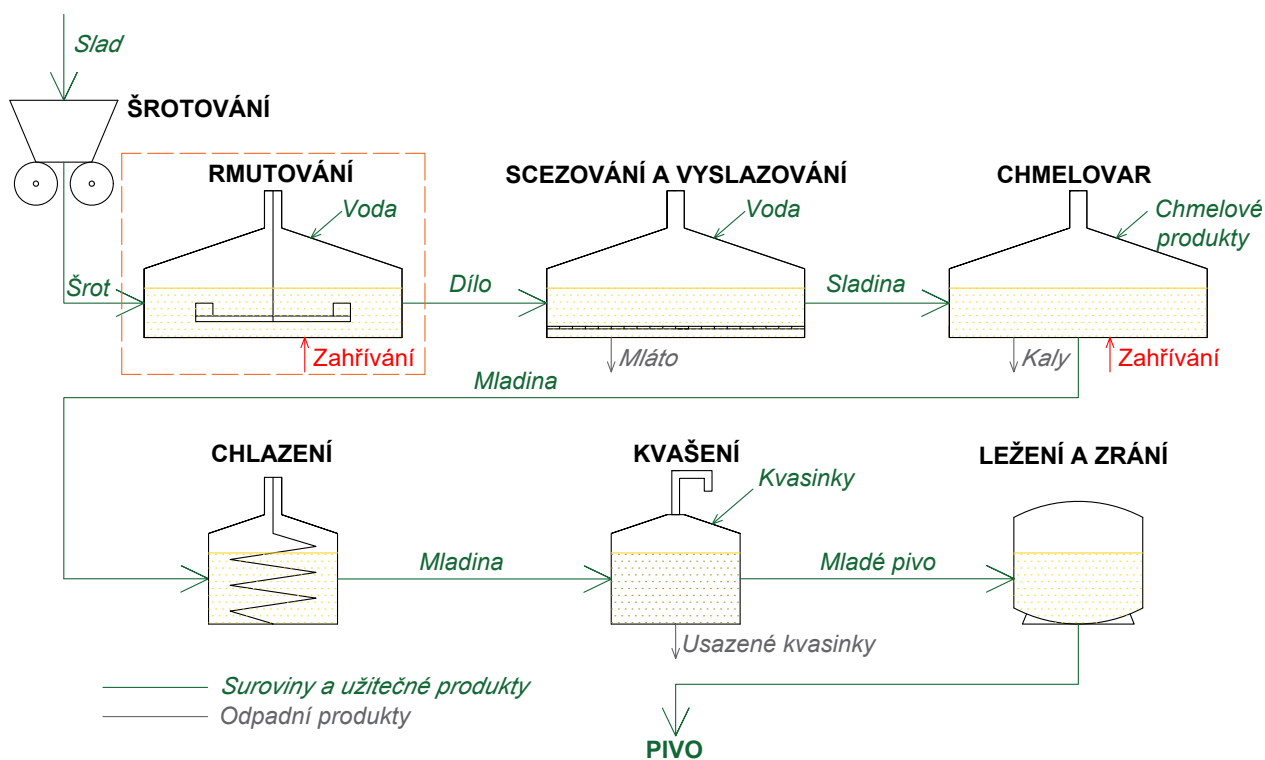
S pivem jsou také neodmyslitelně spjaty důležité suroviny pro jeho výrobu a to především chmel, slad, voda a kvasinky. Než se však z těchto surovin stane známý nápoj, musí projít komplexním výrobním procesem. Tento proces obsahuje mnoho dílčích kroků, jedním z nich je i proces rmutování. Právě na tento proces se zaměřuje tato práce, konkrétně na senzorový systém zajišťující jeho sledování a řízení. Toto téma jsem si zvolil, neboť jsem se chtěl blíže seznámit se zajímavou problematikou tohoto výrobního procesu a ověřit si, zda budu schopen navrhnout, sestavit a vyzkoušet funkční model celého systému.

V práci bude popsán kompletní postup výroby piva a blíže prozkoumán proces rmutování. Na základě poznatků o průmyslové realizaci rmutovacího procesu pak bude proveden návrh modelu systému včetně řídicí elektroniky a bude popsán proces jeho sestavení. V neposlední řadě bude také vyzkoušeno nastavení a průběh regulace.

Kapitola 2

Popis procesu výroby piva

Výroba piva je poměrně komplexní proces, který zahrnuje několik různých kroků. Každý takový krok má své opodstatnění a projeví se na výsledné kvalitě, chuti a charakteru piva. Důležitý je zde však také výběr kvalitních surovin. Základními surovinami pro vaření piva jsou voda, slad, chmel a kvasinky. V následujících podkapitolách bude pro zorientování se v problematice stručně popsán postup výroby piva. Tato práce se pak konkrétně zabývá krokem zvaným rmutování, který bude dále prozkoumán do větší hloubky. Postup výroby piva je graficky shrnut na obrázku 2.1. Krok výrobního procesu řešený v této práci je v obzázku zvýrazněn oranžovým obdélníkem.



Obrázek 2.1: Výroba piva (převzato z [1])

2.1 Šrotování

Jedná se o první krok výroby piva. Vstupní surovinou tohoto procesu je slad. Slad se získává procesem zvaným sladování nejčastěji z ječných obilíků (méně často jsou pak využívány i jiné druhy obilí)[1]. Jde o obilná zrna, která se po namočení nechají naklíčit, čímž dochází k aktivaci enzymatických procesů uvnitř obilky. Při šrotování dochází k narušení slupky obilky (pluchy) a rozdrobení její vnitřní části (endosperm), která se skládá ze škrobů a cukrů. Cílem šrotování je oddělení a rozemletí vnitřní části obilky, při zachování pluch vcelku (pomáhají pak při následném scezování a nedochází k vyluhování nežádoucích látek [1]). Díky tomuto procesu můžeme tak popzději při rmutování získat co největší množství cukerného extraktu. [1].

2.2 Vystírání, zapáčka a rmutování

Před samotným započítím rmutování se obvykle nejprve provádí vystírání a zapáčka [1]. Nejprve je celkový podíl vody který chceme použít pro rmutování rozdělen na dvě poloviny. První polovina objemu je udržována při teplotě vystírky (buď studená do 20 °C, nebo teplá do 35 °C) a je smíchána se sladovým šrotem. Následně je provedena zapáčka, kdy se do vystírky nalije druhá polovina objemu vody při teplotě přibližně 80 °C [1]. Při výše popsaném procesu dochází k bopnutí zrn a přípravě šrotu pro další kroky výroby. Zapáčkou jsou pak podpořeny enzymatické procesy [1].

Následujícím krokem je rmutování. Jedná se o důležitý proces při kterém dochází k rozložení složitých cukrů obsažených ve sladovém šrotu na jednodušší zkvasitelné cukry. Toho je docíleno postupným provařováním podílů celkového objemu díla při různých technologických teplotách [1]. Na řízení procesu rmutování se zaměřuje tato práce, proto bude dále podrobněji rozepsán v části 2.8.

2.3 Scezování a vyslazování

Při rmutování došlo k rozpuštění cukrů ve škrobu do roztoku, tekutina však není čirá, ale obsahuje zbytky sladového šrotu zvané mláto [1]. Při scezování chceme docílit oddělení mláta od tekutiny. Jde hlavně o mechanický proces - filtraci. Při scezování nejprve získáme tzv. předek, který obsahuje největší část extraktu. Poté přejdeme k vyslazování, tedy prolévání mláta čistou horkou vodou. Tím získáme další podíly extraktu (tzv. výstřelky), které by jinak zůstaly v mlátě. po smíchání s předkem získáme konečný produkt - sladinu [1].

2.4 Chmelovar

Jde o povaření mladiny získané při svezování a vyslazování s chmelem. Chmel je dnes nejčastěji přidáván ve formě chmelových přípravků (chmelové pelety, chmelový extrakt). Chmelení většinou probíhá v několika dávkách a obvykle netrvá déle než 90 minut [1]. Výsledným produktem chmelovaru je mladina. Při chmelovaru dochází k rozpouštění hořkých látek obsažených v chmelu, které ve výsledku dodávají pivu jeho typickou hořkou chuť [1]. Mimo hořčení dochází také k dalším významným dějům jako je odpaření přebytečné vody a získání pevné stupňovitosti mladiny, ukončení všech enzymatických procesů, vytěkání nežádoucích látek, sterilizaci mladiny a vysrážení bílkovin.

2.5 Chlazení a vířivá kád'

Při tomto kroku dojde ke schlazení mladiny na zkvásnou teplotu [1]. Při chlazení také dochází k vylučování nerozpustných kalů, které jsou tvořeny bílkovinami pocházejícími hlavně ze sladu [1]. Kaly se pak odstraňují v tzv. vířivé kádě, kdy se využívá rotujícího pohybu mladiny [1]. Kaly se při tomto pohybu postupně usazují uprostřed kádě. Po ustálení toku je pak mladina opatrně stažena. Mladina bývá chlazená pomocí deskových či trubkových chladičů.

2.6 Kvašení

Po schlazení následuje neméně důležitá část výroby piva - kvašení. Při tomto kroku jsou do mladiny přidány kvasnice. Tyto mikroorganismy konzumují cukry rozpuštěné v mladině a vylučují jednak dva hlavní žádoucí produkty - alkohol a oxid uhličitý a dále pak celou řadu dalších vedlejších produktů [1]. Během kvašení nemají kvasnice přístup ke kyslíku, jedná se tedy o anaerobní fermentaci [1]. Používaných kvasnic existuje více druhů, hlavní dělení je však na spodní a svrchní pivovarské kvasinky. Každý druh se používá při výrobě různých druhů piva a má také různou optimální teplotu kvašení [1]. Výstupem tohoto procesu je mladé pivo.

2.7 Ležení

Mladé pivo získané při procesu kvašení ještě nelze konzumovat, jelikož mívá agresivní chuť a obsahuje řadu vedlejších nežádoucích produktů kvašení [1]. Mladé pivo se proto stáhne od kvasnic a přemístí se do dalších nádob, kde bude zrát. Jedná se o finální fázi výroby piva, jejímž výstupem je hotové pivo. Během této fáze dobíhají kvasné procesy, pivo se dosyčuje, dochází k

odbourávání nežádoucích látek a pivo také získává říz [1]. Při výrobě piva v pivovaru následuje po tomto kroku ještě filtrace a pasterizace, kdy je jeho chuť zafixována a je prodloužena jeho trvanlivost [1].

2.8 Podrobný popis rmutovacího procesu

Jak již bylo zmíněno výše, rmutovací proces je jedním z nejdůležitějších a nejkomplexnějších procesů při výrobě piva. Celý proces má výrazný vliv na výsledný charakter piva (jeho plnost a chuť) [1].

Cílem rmutování je převést obsah našrotovaného sladu (nadrčených naklíčených ječných obilek) do varní vody. Nadrčený slad obsahuje škrob, který je tvořen složitými cukry (konkrétně se jedná o polysacharidové řetězce). Během procesu rmutování na tyto řetězce působí enzymy, které je postupně štěpí na jednodušší cukry, konkrétně glukózu a maltózu, která je považována za nejdůležitější pivovarnický cukr [1]. Tyto cukry jsou důležité v dalších krocích výroby piva - v kvašení. Kvasinky tyto jednoduché cukry uvolněné při rmutování požívají a během toho vylučují alkohol a oxid uhličitý [1].

2.8.1 Technologické teploty a prodlevy

Existuje vícero druhů rmutovacích procesů. Pro všechny jsou však podstatné technologické teploty, kterých je během rmutování nutno dosáhnout a technologické prodlevy, tedy doby po které je nutné udržet dílo na dané teplotě. Tyto prodlevy se pohybují od 10 minut do 20 minut a mohou být specifické pro daný recept [1]. Při různých technologických teplotách jsou aktivní různé druhy enzymů a dochází k štěpení různých druhů cukrů a dalším dějům. Podstatná je také rychlost zahřívání na jednotlivé teploty, která se pohybuje v rozsahu 0,7 - 1,5 °C/min [1].

Proces rmutování se ukončuje po dokončení zcukření škrobu. Kontrola zcukření se provádí pomocí tzv. jodové zkoušky. Jodová zkouška se provádí smícháním kapky jodového roztoku s kapkou vařeného díla. Výsledná barva roztoku určí dostatečné zcukření díla (pokud má roztok žlutou barvu, došlo k úspěšnému zcukření; pokud je však barva fialová či červenohnědá k úspěšnému zcukření ještě nedošlo) [1]. Na konci celého procesu rmutování se dílo zahřeje na tzv. odrmutovací teplotu, kdy dojde k zastavení většiny enzymatických procesů a je tak zafixováno složení sladiny [1].

Přehled jednotlivých technologických teplot je uveden v tabulce 2.1. Je také dobré poznamenat, že při rmutovacím procesu nemusí být přítomny technologické prodlevy na všech teplotách, závisí vždy na daném receptu a surovinách. Pro rmutovací proces je obecně nejdůležitější nižší cukrovarná teplota, vyšší cukrovarná teplota a odrmutovací teplota [1].

Tabulka 2.1 : Přehled technologických teplot.

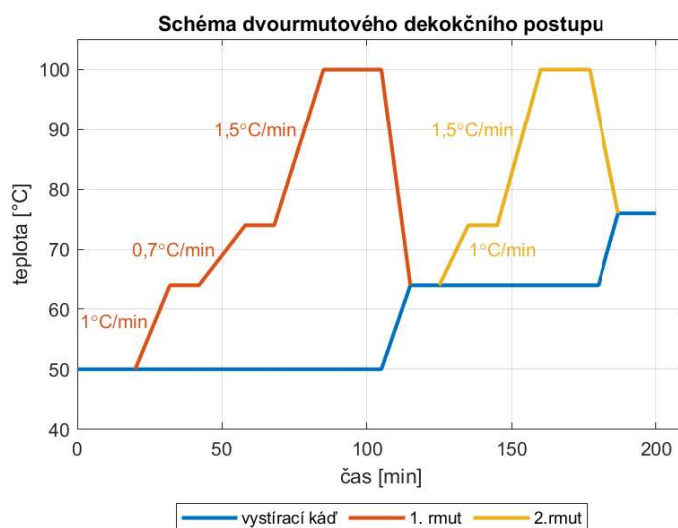
Název technologické teploty	teplota (°C)
Kyselinotvorná teplota	35 - 38
Peptonizační teplota	45 - 50
Nižší cukrotvorná teplota	60 - 65
Vyšší cukrotvorná teplota	70 - 75
Odrmutovací teplota	76 - 80

2.8.2 Druhy rmutovacích postupů

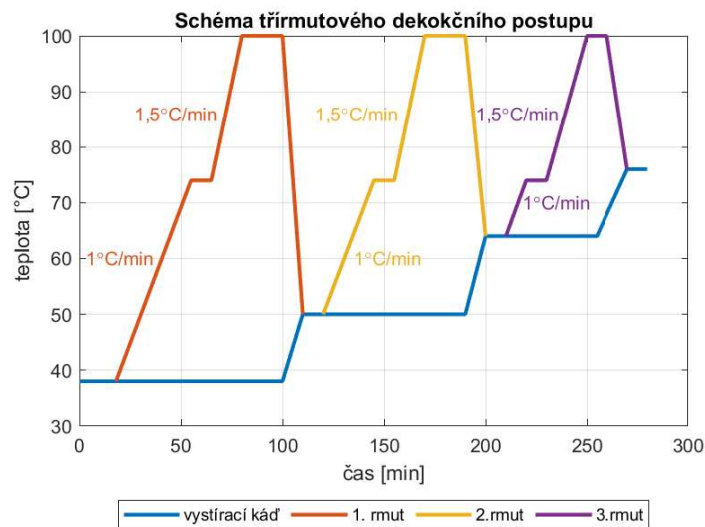
Z hlediska druhu můžeme rmutovací postupy rozdělit na:

- Dekokční** - tento typ rmutování spočívá v provařování dílčích rmutů, což jsou obvykle třetinové podíly celkového objemu vařeného díla [1]. Pro tento způsob rmutování je charakteristické použití dvou nádob - rmutovací a vystírací kádí, kdy se část díla (rmut) ohřeje na požadovanou technologickou teplotu v samostatné nádobě, kde je míchán (rmutovací kád) a poté se vrátí zpět ke zbytku díla, které je udržováno při požadované teplotě ve vystírací kádí[1].

Dekokční rmutování můžeme pak dále rozdělit podle počtu rmutů. Rozlišujeme třírmutový postup, který je zřejmě nejstaří a je také časově nejvíce náročný (obvykle 4-5 hodin). Dále pak rozlišujeme dvourmutový postup, který je dnes nejčastěji používaný a oproti třírmutovému postupu má nižší časovou náročnost (obvykle přes 200 minut). Dále bývá také občas používán jednormutový postup [1]. Typické průběhy dvourmutového a třírmutového postupu jsou znázorněny na obrázcích 2.2 a 2.3. Na dekokční dvourmutový postup se zaměřuje i tato práce.

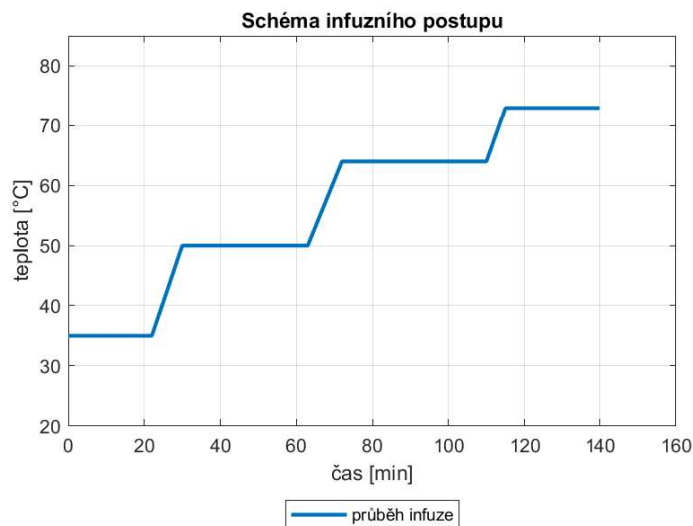


Obrázek 2.2: Dvourmutový dekokční postup (převzato z [1])



Obrázek 2.3: Třířmutový dekokční postup (převzato z [1])

- Infuzní rmutování** - u tohoto druhu rmutování dochází k dosažení jednotlivých technologických teplot pomalým zahříváním celého díla. Hlavním rozdílem oproti dekokčnímu rmutování je, že pro infuzní rmutování je potřeba pouze jedna nádoba. Tento postup je také energeticky a časově méně náročný (obvyklá doba trvání je do 180 minut) [1]. Infuzní rmutování bývá běžné v Německu, Velké Británii a dalších zemích[2]. příklad typického průběhu infuzního rmutování je na obrázku 2.4.

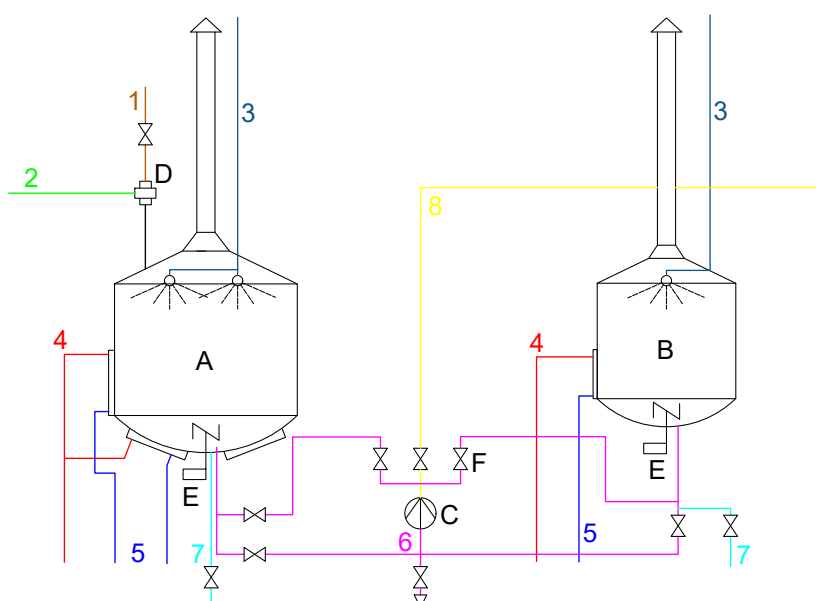


Obrázek 2.4: Infuzní postup (převzato z [1])

Kapitola 3

Technologické zařízení pro rmutování a řízení rmutovacího procesu

3.1 Topologie zařízení pro rmutování v praxi



A - Vystírací kád' s mycími hlavicemi
B - Rmutovací kád' s mycími hlavicemi
C - Rmutovací čerpadlo
D - Vystěradlo sladu
E - Míchadlo s pohonem
F - Ventil

1 - Vystírací trubka slad. šrotu
2 - Přívod vystírací vody
3 - Přívod sanitačního roztoku
4 - Vstup topné páry
5 - Odvod kondenzátu
6 - Potrubí pro přečerpávání rmutu
7 - Vratné sanitační potrubí
8 - Čerpání díla do scezovací kádě

Obrázek 3.1: Schématické znázornění technologického zařízení pro rmutování (kresleno dle [3])

Z předcházejících kapitol plyne, že pro dekokční rmutování jsou potřeba dvě vyhřívané nádoby - vystírací kádě a rmutovací pánev, naopak pro infúzní rmutování se používá pouze jedna nádoba.

Zařízení pro rmutovací proces je zobrazeno na obrázku 3.1. V průmyslových pivovarech se používají hranaté nebo oválné vyhřívané nádoby odpovídajícího objemu. Nádoby pro rmutování mívají zpravidla menšího objem (3-4 hl na 100 kg sypání) oproti vystíracím kádím (6-7 hl na 100 kg sypání) a jsou vyrobeny z mědi nebo z nerezové oceli [3]. Ohřev je zde nejčastěji prováděn pomocí nepřímého plášťového vyhřívání (topné těleso není v přímém kontaktu s kapalinou, respektive s nádobou) s využitím syté vodní páry ale i přehřáté vody (pro tento typ vyhřívání je nutná tlaková nádoba). Existuje však i možnost přímého vyhřívání, kdy se ohřev provádí pomocí spalování pevných paliv (uhlí, dřevo), případně pomocí plynových hořáků. Tento způsob ohřevu je však v současnosti používán již jen zřídka, jelikož přímým působením plamene na nádobu může docházet k připalování díla. Dále zde pak vyvstává nutnost adekvátního odvodu spalin. [3]. U parního vyhřívání se výhřevná plocha dělí do několika sekcí pro vyhřívání různých objemů rmutů [3]. Dalším důležitým vybavením je výkonné míchadlo, jehož úkolem je zajistit promíchání a zabránit případnému napékání vařeného díla. Otáčky míchadla se pohybují v rozmezí 20-25 ot.min⁻¹ a bývají plynule nebo stupňovitě řízeny. Nutnou součástí varny piva je také senzorové vybavení pro měření teploty a výše hladiny, případně pH rmutů. V neposlední řadě je pak také nutné vybavení pro regulaci teploty v nádobách. Celý proces bývá dnes již plně automatizován a bývá řízen pomocí programovatelných průmyslových automatů nebo počítačem z centrálního velína. [3].

3.2 Možnosti řízení vyhřívání

Pro řízení vyhřívání varných nádob se nabízí dva hlavní druhy zpětnovazební regulace.

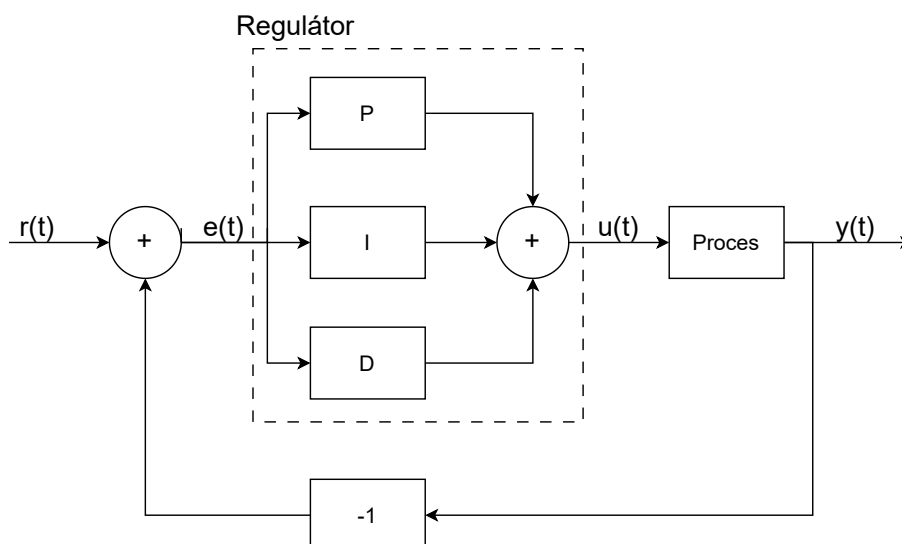
První možností je dvoustavová (ON/OFF) regulace. Jak už napovídá název, akční člen (zde topný element) je buď naplno zapnut nebo úplně vypnut v závislosti na nastavené hodnotě, respektive rozdílu požadované a aktuální hodnoty systému [4]. Výsledná hodnota tedy osciluje okolo požadované hodnoty, což je přijatelné v případě, že se jedná o nekritický systém a oscilace přijatelně malé. Výhodou tohoto druhu regulace je však její jednoduchost bez nutnosti úpravy a nastavování dalších parametrů [4].

Druhou možností je pak využití spojitě regulace, konkrétně PID řídicího algoritmu. Tento způsob regulace se využívá pro řízení veliké většiny průmyslových procesů [4]. Vstupem PID regulátoru je chyba e , což je rozdíl nastavené cílové hodnoty r a aktuální hodnoty sledované proměnné y , jeho výstupem je pak řídicí signál u . Samotný regulátor se skládá z proporcionálního členu (P), který závisí na hodnotě chyby e v daném okamžiku, se zmenšující se chybou

se pak snižuje výstup P regulátoru. Problémem však je že pokud $e = 0$ pak i $u = 0$, tímto tak vzniká určitá chyba v ustáleném stavu. Řešením pak je přidání integračního členu (I) závisícího na minulých hodnotách e (jejich integrálu), v ideálním případě by tedy po připojení integračního členu měla být chyba v ustáleném stavu nulová. Poslední částí je derivační člen (D) který regulátoru poskytuje predikci hodnot lineární extrapolací [4]. Regulátor pak lze popsat známým výrazem

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

kde u je řídicí signál, e je chyba a k_p , k_i a k_d regulační konstanty (zisky) jednotlivých členů [4]. PID regulátoru pak lze také znázornit blokovým schématem (obrázek 3.2).



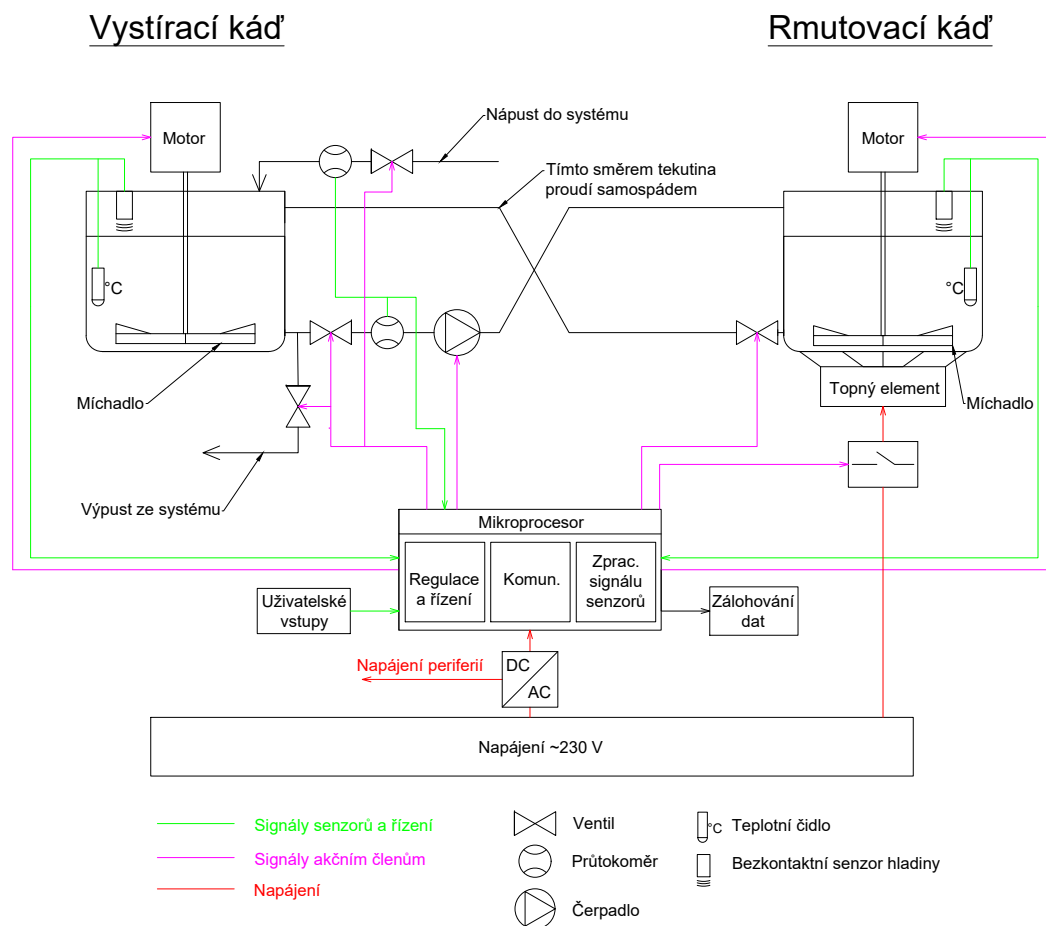
Obrázek 3.2: Blokové schéma PID regulátoru (kresleno dle [4])

Zjevnou výhodou je, že systém řízený tímto druhem regulátoru spojitě udržuje požadovanou hodnotu kontrolované veličiny (při správném nastavení) a na rozdíl od dříve zmíněné dvoustavové regulace zde nejsou přítomny oscilace kolem požadované hodnoty. Nevýhodou je pak nutnost správného nastavení regulačních konstant, které může být v závislosti na systému velmi komplikované [4]. Dále je dobré poznamenat, že existují variace PID regulátoru, které mají některé regulační konstanty rovny nule (člen který násobí se tedy neuplatňuje). Velice časté bývají například PI regulátory, jelikož derivační člen může u mnoha procesů způsobit vznik nežádoucích kontrolních signálů například kvůli vlivu rušení [4].

Pro nastavení regulačních konstant existuje celá řada postupů, mezi nimi například Ziegler-Nicholova, či Cohen-Coonova metoda. O několika empirických metodách nastavení PID (PI) regulátoru pojednává článek [5].

3.3 Koncepce modelového zařízení pro rmutování

Úkolem této práce je zhotovení funkčního vzorku rmutovacího zařízení. Rozvržení demonstračního modelového zařízení pro rmutování bude uspořádáním vycházet z průmyslového provedení. Hlavním rozdílem bude objem vařeného díla, který bude tvořit jednotky litrů. Některé části modelu pak budou uzpůsobeny tak, aby je bylo možné vyrobit svépomocí, či je pořídit s ohledem na mé ekonomické možnosti. Nebude možné využít senzory či akční členy, které by jinak byly použity v praxi, a které by byly certifikovány pro styk s potravinami, jelikož cena takovýchto komponent bývá velmi vysoká. Přesto však budou ve funkčním modelu zachovány všechny podstatné procesy a postupy. Koncepce modelu je vyobrazena na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Koncepce modelového zařízení rmutovacího procesu

Obrázek obsahuje všechny podstatné prvky modelu. Detailní rozbor a výběr jednotlivých komponent bude uveden v následujících kapitolách. Jedná se o dvounádobové uspořádání s jednou vyhřívanou nádobou (rmutovací kád). Vystírací kád v tomto případě nebude vyhřívána, ale bude izolována

kvůli co nejmenšímu snížení tepelných ztrát. Obě nádoby budou vybaveny míchadly. Rmutovací kád' bude umístěna výše než vystírací kád' a tekutina bude tedy jedním směrem moci proudit samospádem, tím pádem bude pro přečerpávání díla potřeba pouze jedno čerpadlo. Model bude řízen digitálně pomocí mikroprocesoru, který se bude starat o zpracování signálů ze senzorů a ovládání akčních členů, které do řízení procesu zasahují a také bude zajišťovat komunikaci mezi uživatelem a systémem přes uživatelské rozhraní. Model bude také s využitím vhodného programového nastavení schopen jak dekokčního, tak infuzního rmutování.

3.4 Sledované parametry procesu

Pro průmyslové i domácí zařízení budou shodné důležité sledované parametry procesu. Sledované parametry procesu lze rozdělit na vstupní, jejichž změnou můžeme ovlivnit průběh procesu (např. výkon topného tělesa) a výstupní, jejichž snímáním získáme informaci o dějích a stavu kontrolovaného procesu (např. teplota nebo výška hladiny). Výstupní parametry rmutovacího procesu jsou shrnuty v tabulce 3.1, vstupní parametry pak v tabulce 3.2.

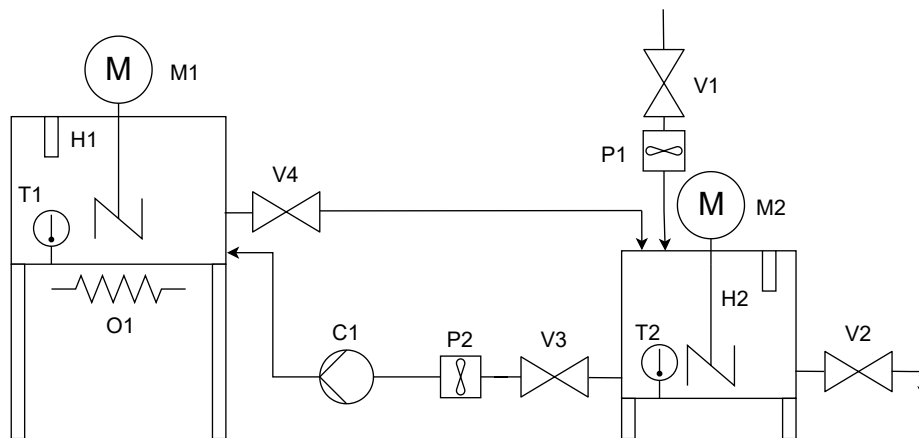
Tabulka 3.1 : Přehled výstupních parametrů rmutovacího procesu.

Název parametru	Senzor (obr. 3.4)
Teplota ve vystírací kád'í	T1
Teplota v rmutovací kád'í	T2
Výška hladiny vystírací kád'í	H1
Výška hladiny v rmutovací pánvi	H2
Průtok do vystírací kád'ě (resp. objem)	P2
Průtok do rmutovací kád'ě (resp. objem)	P1
Čas od počátku procesu	-

Tabulka 3.2 : Přehled vstupních parametrů rmutovacího procesu.

Název parametru	Akční člen (obr. 3.4)
Výkon ohřevu rmutovací kád'ě	O1
Otáčky míchadla vystírací kád'ě	M1
Otáčky míchadla rmutovací kád'ě	M2
Otáčky přečerpávací pumpy	C1
Stav ventilu - nápustní ventil (O/Z)	V1
Stav ventilu - výpustní ventil (O/Z)	V2
Stav ventilu - rmutovací kád' (O/Z)	V3
Stav ventilu - vystírací kád' (O/Z)	V4

Nejdůležitějším sledovaným výstupním parametrem je teplota a to jak ve vystírací kád'í, tak v rmutovací pánvi, teplota musí být dostatečně přesně snímána a udržována, jelikož dodržení technologických teplot

Rmutovací kád'Vystírací kád'

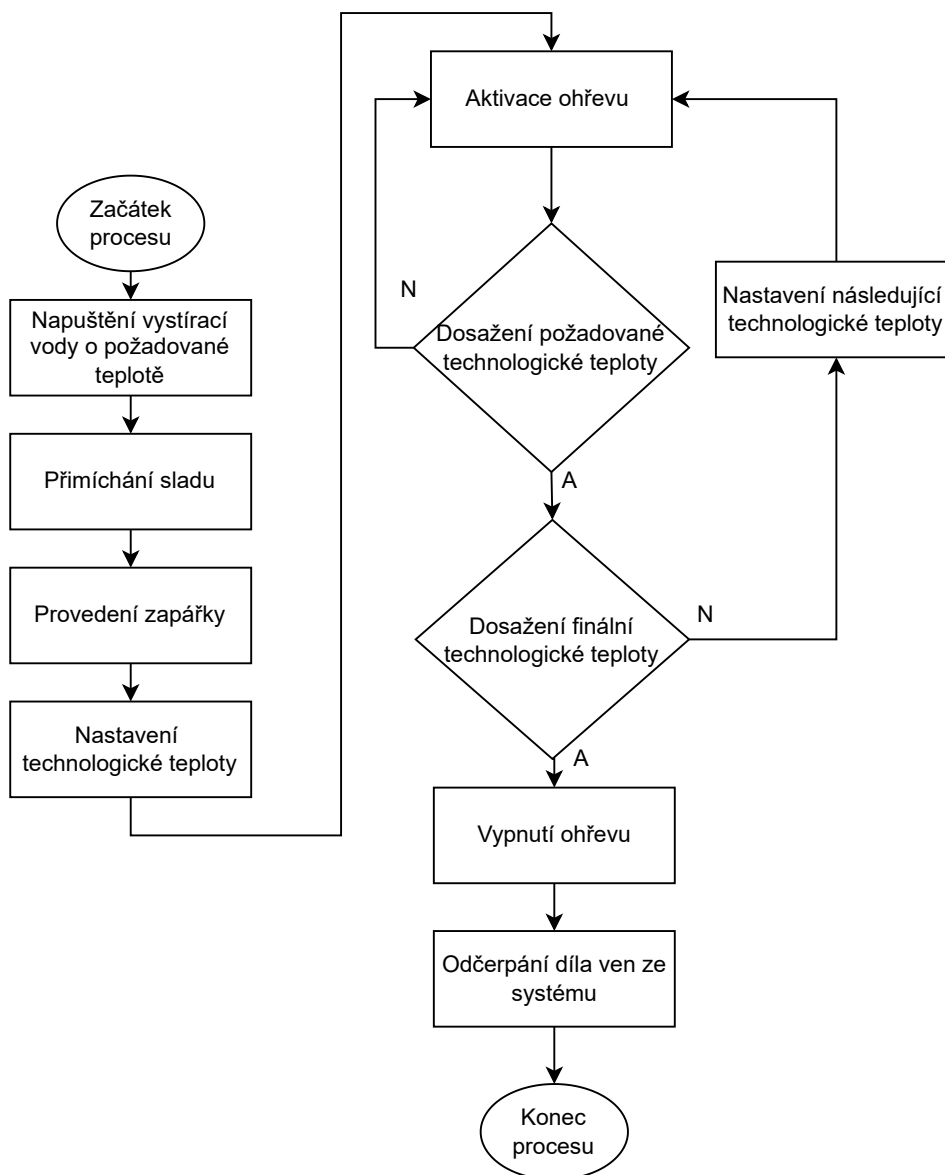
Obrázek 3.4: Schematické zobrazení umístění jednotlivých prvků (senzory/akční členy)

je podstatné pro správný průběh rmutovacího procesu. S teplotou souvisí také sledování času uplynulého od započetí rmutovacího procesu, je totiž nutné dodržet požadované technologické prodlevy, na kterých dílo setrvává (viz. kapitola 2.8.1). K dalším parametrům patří sledování výšky hladiny v obou nádobách a sledování průtoku při přečerpávání díla. To je důležité při dekokčním rmutování, kdy potřebujeme přečerpat určitý objem díla při provařování dílčích rmutů.

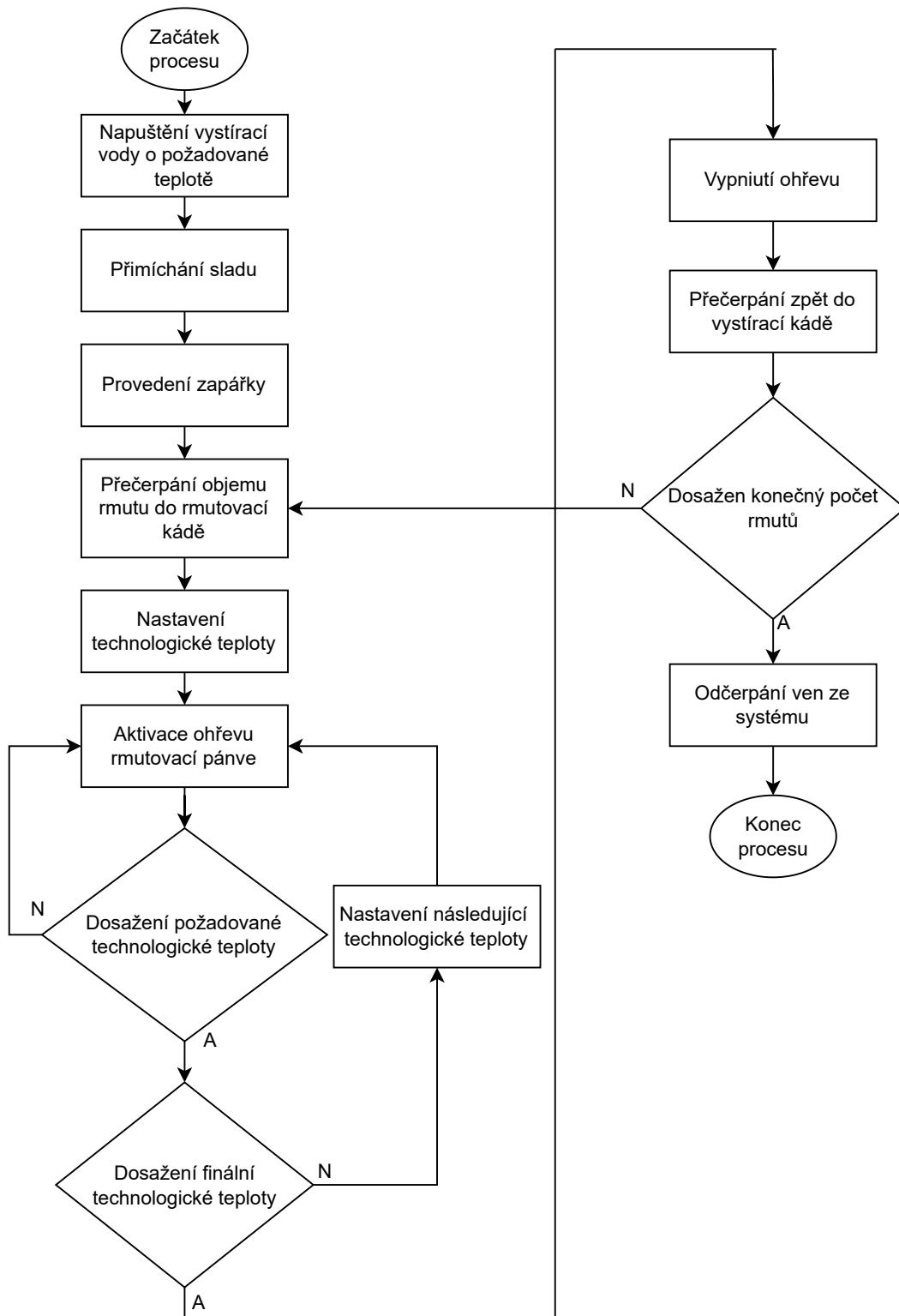
Z hlediska vstupních parametrů je důležité ovládání vyhřívání obou nádob, tedy výkonu topného elementu. Při přečerpávání rmutů je nutné ovládat ventily (otevřené/zavřené) a otáčky pumpy. Dalším vstupním parametrem jsou otáčky míchadla rmutovací pánve.

■ 3.5 Diagram rmutovacího procesu

Pro přehlednost a později snazší vytvoření řídicího algoritmu jsem na základě informací z kapitoly 2 sestavil vývojové diagramy jak pro dekokční rmutování na 1 až 3 rmuty (obrázek 3.5), tak pro infuzní rmutování (obrázek 3.6)



Obrázek 3.5: Obecný vývojový diagram dekokčního rmutování



Obrázek 3.6: Obecný vývojový diagram dekokčního rmutování

Kapitola 4

Návrh modelu zařízení pro rmutování

4.1 Výběr senzorů a akčních členů

4.1.1 Vyhřívání nádob a výběr topného elementu

Existuje vícero možností vyhřívání nádob, v průmyslu se nejčastěji využívá vyhřívání parou [2], tento způsob však není pro použití v modelu zařízení vhodný, jelikož vyžaduje poměrně komplexní a drahé zařízení. Další možností je vyhřívání plynovým hořákem. Jedná se o pohodlnou variantu, která se vyznačuje malou setrvačností a bývá často využívána v domácím pivovarnictví.[1] jedná se však o variantu náročnější na způsob regulace a také realizace v případě funkčního modelu. Pro tento konkrétní případ jsem se rozhodl využít poslední variantu, kterou je vyhřívání pomocí elektrického topného tělesa, tato varianta je z hlediska snadné regulace a ekonomické náročnosti nejpříznivější.

Na trhu existuje celá řada topných těles o různém výkonu. Hlavním požadavkem je v tomto případě kromě ceny také jednoduchost montáže, kterou by bylo možné provést svépomocí a dále pak možnost změny maximálního topného výkonu pro ohřívání různých objemů rmutů.

Pro výběr optimálního topného tělesa je však vždy v první řadě nutné orientačně určit minimální požadovaný příkon.

Jako varné nádoby jsem využil dva nerezové hrnce, jeden o objemu 6,1l, který bude využit jako vystírací kád a druhý o objemu 3,6 l, který bude sloužit jako rmutovací pánev.

Celkový zvolený objem díla bude 6l. Tepelný výkon potřebný pro ohřátí daného objemu při optimální rychlosti (1-1,5 C°/min), která je šetrná vůči enzymům lze určit ze vztahu 4.1,

$$Q_{celk} = c\rho V \frac{dT}{dt} (W), \quad (4.1)$$

kde Q_{celk} je potřebné teplo (W), c je měrná tepelná kapacita díla ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ρ je hustota díla ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), V je celkový objem díla (m^3) a dT je teplotní přírůstek ($^{\circ}\text{C}$) za jednotku času dt (s). Z praktických důvodů předpokládáme hustotu a tepelnou kapacitu díla stejnou jako u vody ataké předpokládáme, že se tyto hodnoty s rostoucí teplotou nemění ($\rho = 997 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $c = 4180 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Posledním předpokladem je rovnoměrnost prohřívání díla. Po dosazení získáme hodnotu uvedenou ve 4.2

$$Q_{\text{celk}} = 4180 \cdot 997 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,5}{60} = 625 \text{ W}. \quad (4.2)$$

Z výsledku předcházející rovnice pak můžeme určit teplo potřebné pro ohřátí jednoho rmutu, který je zpravidla tvořen třetinovým podílem celkového objemu (zde 2l) jako

$$Q_{\text{rmut}} = \frac{1}{3} Q_{\text{celk}} = \frac{1}{3} \cdot 625 = 208 \text{ W}. \quad (4.3)$$

Dále je do celkové výkonové bilance je také potřeba započítat účinnost samotného topného tělesa. V tabulce 4.1 jsou uvedeny typické hodnoty účinnosti topných těles a vařičů, které by bylo možné využít pro realizaci modelu.

Tabulka 4.1 : Typické hodnoty účinností topných těles a vařičů. [1]

Typ ohřevu	η (%)
Litínová ploténka	50-60
Sklokeramická deska	60-70
Indukční vařič	80-90
Topná spirála	90-95
Tištěné topné těleso	70-95

Z tabulky je patrné, že nelepší účinnosti dosahují topné spirály a tištěná topná tělesa. Oba topné elementy mají velmi dobrý kontakt s ohřívaným dílem. Topná spirála je přímo ponořena do ohřívané tekutiny, její nevýhodou je však problematické čištění a hlavně možnost napékání a přehřívání díla v okolí spirály, což by ve výsledku mohlo způsobit karamelovou pachut' výsledného produktu[1].

Tento problém odpadá při použití tištěného topného tělesa. zde je však nutné mít nádobu s plochým dnem, na kterou by bylo možné tištěné topné těleso upevnit [6]. Nevýhodou tištěného tělesa je jeho velmi vysoká cena, jelikož výroba takovýchto těles probíhá téměř výhradně zakázkově přímo na míru dané aplikace. Další problém by mohl vyvstat při připevňování tělesa ke dnu nádoby, se kterou musí být pevně spojeno (tepluodolným lepidlem, či šrouby).

Zvolenou možností se nakonec stala běžná elektrická litínová ploténka, která bývá využívána v elektrických sporácích. Oproti jiným řešením

má nižší účinnost (50 % - 60 %), avšak u ní odpadají všechny problémy uvedené u topných spirál a tištěných těles.

Potřebný příkon lze tedy zjistit jako

$$P = \frac{Q}{\eta} (W), \quad (4.4)$$

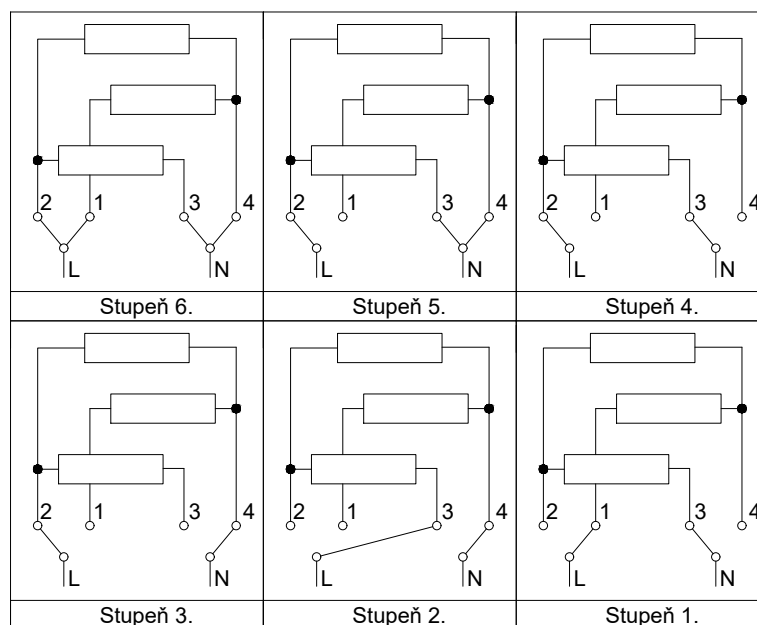
kde je P (W) celkový potřebný příkon, Q (W) je teplo potřebné pro ohřátí díla a η (-) je účinnost ohřevu. Výsledný příkon pro celý objem díla, pokud účinnost ohřevu odhadneme na 55 % je tedy roven

$$P_{celk} = \frac{625}{0,55} = 1136 W. \quad (4.5)$$

Příkon potřebný pro jeden rmut je pak roven

$$P_{rmut} = \frac{208}{0,55} = 378 W. \quad (4.6)$$

Pro úplnost ještě uvedme, že se při ohřevu vyskytují tepelné ztráty, jedná se o ztráty odparem a ztráty vedením skrz stěnu varné nádoby [6]. Ztráty odparem lze zanedbat, jelikož se projeví hlavně při varu [6], kterému se dílo během rmutovacího procesu přiblíží jen na krátkou dobu při závěrečném odrmutování. Dále jsou zde ztráty vedením zkrz stěnu nádoby. Tento druh ztrát jsem se však z praktických důvodů rozhodl zanedbat, především pro to, že výkon topného tělesa lze vybírat poze z konkrétních dostupných hodnot.



Obrázek 4.1: Vnitřní zapojení litinové ploténky (kresleno dle [7])

Vybraná ploténka má příkon 1000 W. Uvedená hodnota je maximální možný výkon. Výkon ploténky však lze regulovat; pokud je ploténka namontovaná v elektrickém sporáku regulace probíhá pomocí vačkového přepínače. Pro tento účel má ploténka vyvedeny čtyři vodiče, které jsou připojeny ke třem topným spirálám uvnitř ploténky. Při otáčení přepínače dochází k různému propojování topných spirál (sériově či paralelně) a tím ke změně maximálního příkonu. Vnitřní zapojení ploténky je uvedeno na obrázku 4.1. Toto uspořádání lze tedy s výhodou využít pro ohřev různých objemů rmutů.

V tabulce níže jsou uvedeny odpory jednotlivých zapojení a výkony konkrétní porizené ploténky zjištěné měřením a výpočtem.

Za základě výsledné vypočítané hodnoty výkonu 378 W pro jeden rmut jsem zvolil nejbližší vyšší možný výkon, což bylo nastavení na stupeň 4.

Tabulka 4.2 : Výkony jednotlivých stupňů ploténky

Stupeň	Odpor spirál (k Ω)	Výkon (při 230 V) (W)
1	0,538	98
2	0,232	164
3	0,215	246
4	0,107	495
5	0,072	734
6	0,054	1058

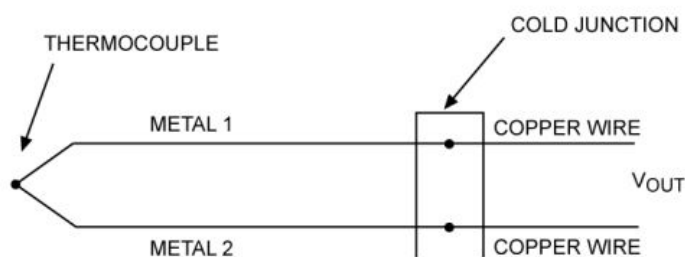
4.1.2 Výběr teplotního senzoru

Dostupné typy senzorů

Na trhu existuje řada teplotních senzorů využívajících různé fyzikální principy. Nejprve tedy shrňme běžně používané druhy teplotních senzorů.

- Kovové odporové teplotní senzory (RTD)** - Při změně teploty dojde ke změně elektrického odporu materiálu senzoru. Při vyhodnocování měříme odpor teplotního senzoru a na základě této hodnoty určíme teplotu. Nejčastěji používaným materiálem pro tento druh teplotních senzorů je platina. Prodávané senzory bývají označovány jako PT100 nebo PT1000 (odpor 100 Ω nebo 1000 Ω při 0 °C) [8]. Platinové teplotní senzory poskytují lineární odezvu na změnu teploty, jsou přesné, stabilní a odolné proti působení chemikálií. Nevýhodou je relativně pomalá odezva na změnu teploty a také fakt, že pro vyhodnocení odporu musí senzorem protékat proud (je tedy nutné napájení)[8].
- Termočláanky** - Jedná se o senzor složený ze dvou různých typů kovů. Pro svou funkci využívá Seebeckův efekt - teplotní rozdíl mezi dvěma spojeními dvou různých druhů způsobí vznik napětí mezi těmito dvěma

kovy (obrázek 4.2). Napětí je mimo jiné závislé na teplotě, naměřenou hodnotu napětí tak lze převést na teplotu.[8]. Výhodou tohoto typu senzoru je rychlá odezva na změny teploty a široký teplotní rozsah (v závislosti na použitých materiálech). Nevýhodou je pak nízká úroveň produkovaného napětí, které je třeba přesně zesílit a jeho náchylnost k zarušení [8].



Obrázek 4.2: Schéma obecného uspořádání termočládku [9]

- **Termistory** - Funkce je podobná jako u odporových teplotních senzorů, se změnou teploty dochází ke změně odporu. Existují dva druhy termistorů, NTC (s rostoucí teplotou klesá odpor) a PTC (s rostoucí teplotou roste odpor). Pro výrobu termistorů bývají využívány polymery nebo keramika [8]. Narozdíl od odporových teplotních senzorů vykazují nelineární teplotní závislost a nízkou přesnost, bývají ale levnější [8].
- **Polovodičové (digitální) teplotní senzory** - Tento typ senzorů využívá teplotní charakteristiky polovodičových součástek (bipolárních tranzistorů). Výstupem je napětí úměrné teplotě, v závislosti na typu senzoru může jít o analogovou hodnotu nebo digitální výstup ve formátu I²C, 1-Wire, či SPI[8]. Digitální senzory mají obvykle dobrou citlivost. Přesnost je pak závislá na konkrétním typu senzoru, může se pohybovat v rozsahu 0,5 °C ale například také v rozsahu jednotek °C. Měřitelný teplotní rozsah bývá nižší oproti RTD (může dosahovat od -55 °C až do 125 °C). Kromě měření teploty mohou tyto senzory mít zabudované další doplňkové funkce jako detekce překročení nastavené teploty, paměť, záznam chyb atd. [9].

■ Vybrané řešení

Při výběru senzoru pro realizaci modelu jsem kromě poznatků z předcházející kapitoly vycházel z minimální očekávané přesnosti senzoru, kterou jsem si stanovil na 0,5 °C a nutného minimálního teplotního rozsahu, který se pohybuje od přibližně 20 °C (pokojová teplota) do 100 °C. V úvahu však také bylo nutné vzít v potaz ekonomické hledisko.

Vybraným teplotním senzorem je DS18B20 od firmy Maxim Integrated [10] a to jak pro vystírací kád, tak v rmutovací pánev. Jedná se o digitální senzor,

jehož výstupem je již převedená teplota (ve °C nebo °F). Senzor má přesnost $\pm 0,5$ °C a to v rozsahu -10 °C to +85 °C. Komunikace s mikroprocesorem probíhá po sběrnici 1-Wire. Konkrétní pořízený senzor je pak ještě uzavřen v nerezové trubičce (obrázek 4.3).



Obrázek 4.3: Teplotní senzor DS18B20 v nerezové trubičce

Tabulka 4.3 : Vybrané parametry teplotního čidla DS18B20 [10]

Parametr	Hodnota parametru
Napájecí napětí (V)	3,0 - 5,5
Rozsah teplot (°C)	-55 - 125
Přesnost (°C)	$\pm 0,5$
Komunikace	sběrnice 1-Wire

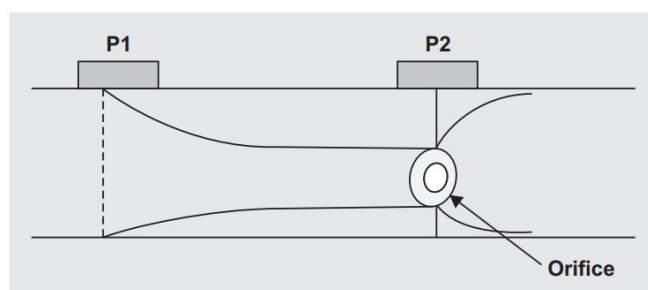
■ 4.1.3 Průtokoměr

Měření průtoků je důležitou součástí mnoha procesů nejen v potravinářském průmyslu. Vybraný senzor musí splňovat řadu požadavků odvíjejících se od konkrétní aplikace. Obecně se jedná hlavně o charakteristiku měřeného média (viskozita, abrazivnost, druh proudění atd.), dále jde o mechanická omezení (teplota a tlak proudícího média) nebo způsob komunikace a napájení v průmyslovém prostředí, kde se může vyskytovat rušení [11]. Kromě těchto požadavků jsou v potravinářském průmyslu také přítomny přísné hygienické požadavky.

Následuje souhrn jednotlivých druhů nejběžněji používaných druhů průtokoměrů.

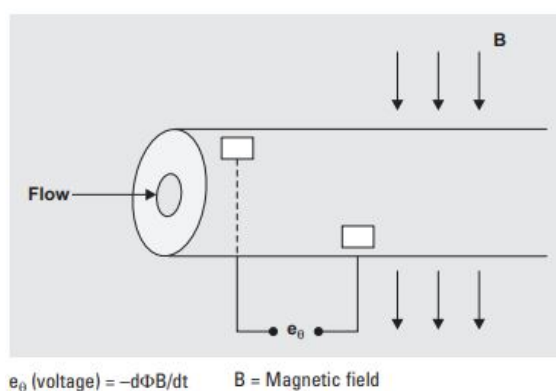
- **Tlakové průtokoměry** - Tento typ průtokoměrů využívá Bernoulliho rovnosti. Tekutina proudí průtokoměrem skrz překážku (zúžené ústí), která snižuje rychlost proudění a měří se rozdíl tlaků před a za překážkou. Tekutina za překážkou proudí rychleji než tekutina před překážkou, podle Bernoulliho rovnosti to znamená, že musí být před překážkou

vyšší tlak než za ní. Diferenciální tlakový senzor tak dává informaci o rychlosti proudění, ze které lze zjistit průtok[11]. Jedná se o spolehlivou technologii bez pohybujících se částí vhodnou pro turbulentní proudění, nevýhodou je však mírná ztráta tlaku kvůli způsobu měření a požadavky na mechanickou konstrukci potrubí (kolena, záhyby apod.)[11].



Obrázek 4.4: Schématické uspořádání tlakového průtokoměru [11]

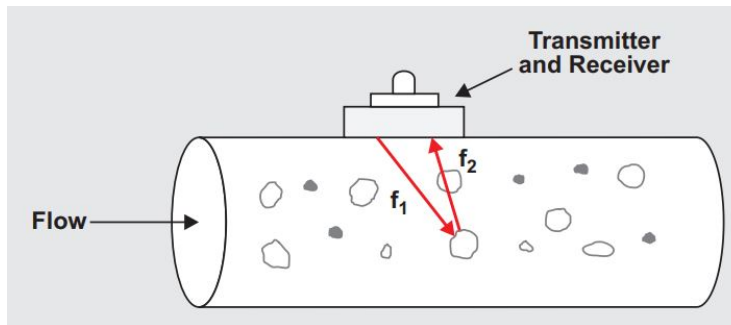
- Magnetické průtokoměry** - Pomocí elektromagnetů je generováno silné magnetické pole napříč trubkou, kterou protéká měřené médium. Při pohybu tekutiny trubkou dochází k indukci malého napětí, to je následně snímáno pomocí dvou měřících elektrod[11]. Rychlost proudění tekutiny je přímo úměrná amplitudě snímaného napětí. Cívky vytvářející magnetické pole mohou být buzeny jak stejnosměrným, tak střídavým proudem[11]. Už z principu tohoto senzoru je zřejmé, že může být využit pouze pro elektricky vodivé tekutiny. Elektrody musejí být vždy vybrány s ohledem na měřené médium. Nevýhodou je ale hlavně vysoká cena. Senzor však nabízí vysokou přesnost a spolehlivost a je vhodný pro korozivní či znečištěné tekutiny[11].



Obrázek 4.5: Schématické uspořádání magnetického průtokoměru [11]

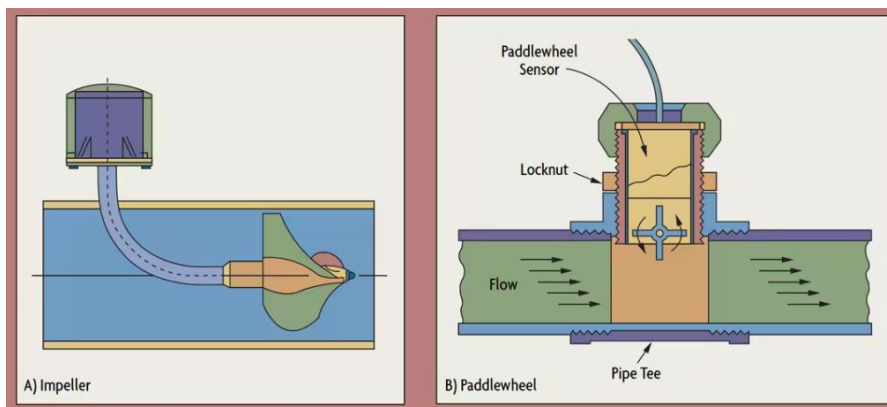
- Ultrazvukový (Dopplerův) průtokoměr** - Dopplerův průtokoměr je založen na Dopplerově jevu. Senzor se skládá z vysílače a přijímače. Vlna vyslaná vysílačem (0,5-10 MHz) se šíří tekutinou pohybující se rychlostí v a dorazí k přijímači s frekvenčním posunem. Frekvenční rozdíl je úměrný rychlosti proudění kapaliny[11]. Výhodou senzoru je především to, že lze

připojit k potrubí zvenku bez kontaktu s tekutinou a je možné tímto způsobem měřit korozivní či kašovitě tekutiny[11].



Obrázek 4.6: Schématické uspořádání ultrazvukového Dopplerova průtokoměru [11]

- Lopátkové/ turbínkové průtokoměry** - Jedná se o typ rychlostního průtokoměru. Hlavní součástí tohoto druhu průtokoměru je lopátkové kolo či turbínka (obrázek 4.7), jejíž průměr je o něco nižší než vnitřní průměr měřicí komůrky. Rychlost otáčení kola nebo turbínky je úměrná objemovému průtoku[12]. Detekce rotace může probíhat pomocí reliktančních, indukčních či kapacitních snímačů, nebo snímačů využívajících Hallův efekt. Výstupem senzoru v závislosti na typu a uspořádání mohou být sinusové pulzy, případně obdélníkové napěťové pulzy, jejichž frekvence odpovídá průtoku[12]. Výhodou těchto senzorů je přesnost, lineární závislost a relativně nízká cena. Nevýhodou je pak fakt, že přesnost může být ovlivněna viskozitou a teplotou měřené kapaliny, další zjevnou nevýhodou je přímý kontakt s měřenou tekutinou[12].



Obrázek 4.7: Schématické uspořádání turbínkového (A) a lopátkového (B) průtokoměru [12]

■ Vybrané řešení

Pro měření průtoku jsem zvolil průtokoměr YF-S201 [13] (obrázek 4.8). Jedná se o lopatkový typ průtokoměru. Tento druh by při použití v praxi nebyl vhodný, jelikož tekutina (díl) se skládá z vody a rozemletého sladu, z tohoto důvodu by mohlo docházet k zanášení a ucpávání průtokoměru. Pro použití v modelovém zařízení však plně postačuje, důvodem pro výběr bylo kromě příznivé ceny také dostatečný průtok, který je sensor schopen zpracovat a formát výstupu, který lze snadno zpracovat pomocí mikrokontroléru. Výstupem senzoru jsou obdélníkové pulzy generované hallovým senzorem na základě polohy permanentního magnetu umístěného v lopatkovém kole průtokoměru. Pro frekvenci pulzů, která je lineárně závislá na průtoku platí dle katalogového listu výrobce vztah

$$f = 7 \cdot Q \text{ (Hz)}, \quad (4.7)$$

kde f (Hz) je frekvence výstupních pulzů a Q ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$) je průtok. Takto generované pulzy lze přímo zaznamenávat čítačem na vstupu mikrokontroléru. Soupis vybraných parametrů je uveden v tabulce



Obrázek 4.8: Průtokoměr YF-S201 [13]

Tabulka 4.4 : Vybrané parametry průtokoměru YF-S201 [13]

Parametr	Hodnota parametru
Napájecí napětí (V)	3,5 - 24
Rozsah průtoků ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$)	1-30
Max. chyba měření (%)	5

■ 4.1.4 Senzor výšky hladiny

Senzory hladiny lze rozdělit do dvou hlavních kategorií a to na kontaktní (například plovákové či kapacitní) a bezkontaktní (ultrazvukové, radarové).

Níže jsou popsány hlavní typy hladinových senzorů.

- **Optické** - Jedná se o optické hladinové spínače. Senzor se skládá z optického vysílače (např. infra LED) a detektoru (fototranzistor). Důležitou součástí senzoru je také optický hranol, který když se nachází ve vzduchu odráží světlo vysílače k detektoru. Když je však senzor ponořen do tekutiny, dojde k rozptýlení světla, které tedy nepronikne k detektoru a dojde k rozepnutí obvodu. Výhodou je, že senzor je kompaktní a neobsahuje žádné pohyblivé části. Senzor však pro svou funkci vyžaduje přímý kontakt s tekutinou. Některé druhy tekutin mohou způsobit pokrytí senzoru povlakem a znemožnění jeho správné funkce [14].
- **Kapacitní** - využívají rozdílných dielektrických vlastností tekutin, které se výrazně liší od vzduchu. V podstatě jde o kapacitní senzor, kdy jsou jeho dvě elektrody ponořeny do tekutiny, se změnou hladiny tekutiny pak dochází ke změně dielektrických vlastností a v důsledku toho ke změně kapacity. Jedná se především o kontaktní typ senzoru, ovšem existují i bezkontaktní varianty, které lze připevnit zvenku na nádrž. Jedná se o přesný a citlivý senzor, který však vyžaduje pečlivý výběr a může vyžadovat kalibraci pro konkrétní druh tekutiny. Jeho spolehlivost však může být ovlivněna zanesením elektrod[14].
- **Ultrasonické** - Skládají se z vysílače a přijímače. Výšku hladiny zjišťují měřením doby, za kterou se vyslaný signál, který je odražený od hladiny dostane do přijímače (je úměrný vzdálenosti mezi senzorem a hladinou). Měření je tedy bezkontaktní a senzor neobsahuje žádné vnější pohyblivé mechanické části[14].
- **Radarové** - principiálně jsou velmi podobné ultrazvukovým sensorům, operují však s elektromagnetickým vlněním. Tento senzor dokáže poskytnout velmi přesné měření a kompenzovat vliv případných struktur uvnitř nádrže, nevýhodou je však velmi vysoká cena[14].
- **Plovákové** - Velmi jednoduchý a levný typ senzoru, který přímo detekuje hladinu. Senzor obsahuje magnet a magnetický jazýčkový spínač. Když dojde k nadzdvihnutí plováku při kontaktu s tekutinou, přiblíží se magnet v něm umístěný ke spínači a dojde k sepnutí a uzavření obvodu. Pro sepnutí je však vyžadováno relativně velké množství tekutiny, senzor je kontaktní a obsahuje pohyblivé mechanické části[14].

■ Vybrané řešení

Po zvážení výše popsaných charakteristik senzorů a konkrétní aplikaci, byl vybrán ultrazvukový senzor. Hlavním důvodem výběru byl charakter zpracovávané tekutiny, která bude obsahovat rozemletý slad a škrob, použití kontaktního typu senzoru by tedy mohlo být velmi problematické (zanášení

senzoru, nutnost častého čištění). Pro využití v modelu jsem zvolil bezkontaktní ultrazvukový senzor HC-SR04, jeho hlavní výhodou je velmi příznivá cena, poměrně vysoká přesnost a jednoduchost ovládání. Senzor kromě napájení disponuje piny trigger a echo. Po aplikování pulsu o délce $10\ \mu\text{s}$ na pin trigger dojde k vyslání dané osmice pulsů (transmit). Na pinu echo pak lze zaznamenat puls, jehož délka závisí na době putování vyslaného signálu k překážce a zpět [15]. Parametry senzoru jsou uvedeny v tabulce 4.5.



Obrázek 4.9: Průběh činnosti ultrazvukového senzoru HC-SR04 [15]

Tabulka 4.5 : Vybrané parametry senzoru HC-SR04 [15]

Parametr	Hodnota parametru
Napájecí napětí (V)	5
Jmenovitý proud (mA)	15
Pracovní frekvence (kHz)	40
Minimální vzdálenost (cm)	2
Maximální vzdálenost (m)	4
Přesnost (mm)	3

Senzor bude využit hlavně při kontrole hladiny během napouštění, případně během přečerpávání.

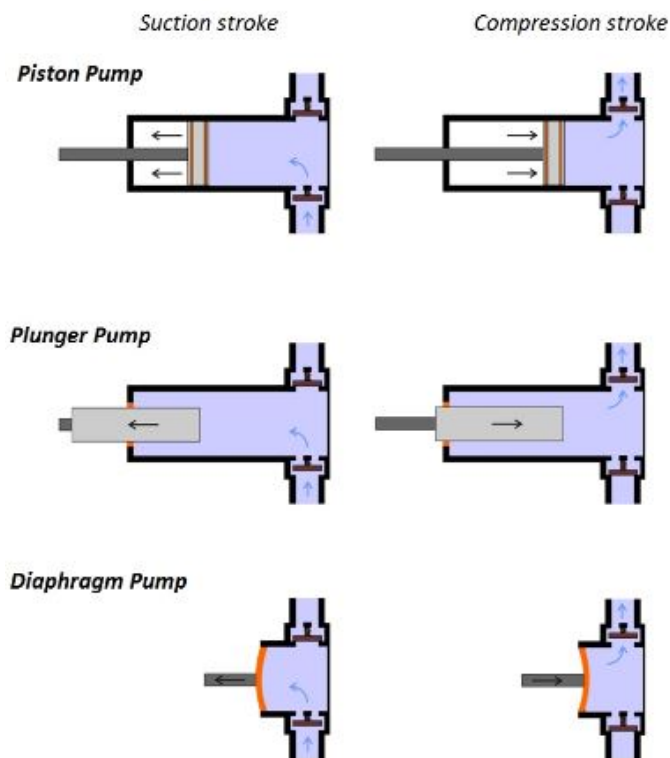
■ 4.1.5 Výběr čerpadla

Na čerpadla používaná v potravinářském průmyslu a konkrétně v pivovarském průmyslu je kladeno mnoho nároků. Především musí splňovat přísné hygienické požadavky, jelikož přichází do přímého styku s potravinami. Dalším požadavkem je šetrnost k přepravovanému produktu. V případě čerpání rmutu nesmí docházet k nežádoucímu rozemílání sladu ve varní vodě. Nesmí také docházet k častému zanášení a ucpávání čerpadla. Důležité je zvážit v závislosti na přečerpávaných objemech i průtok čerpadla. Nutností je také bezproblémové čištění a sanitace [16]. Referenci dostupných řešení poskytuje například firemní katalog firmy Packo Pumps [17].

Pro čerpání tekutin s vyšší hustotou (tedy i rmutu) jsou obecně vhodná objemová čerpadla. U tohoto typu čerpadel jejich pracující část tlačí přímo na kapalinu a mění mechanickou energii na tlakovou. Při jejich činnosti dochází

ke střídání nasávání tekutiny do pracovního prostoru čerpadla a její následné vytlačení ven. Objemová čerpadla se dále dělí na dvě podkategorie [18, 19].

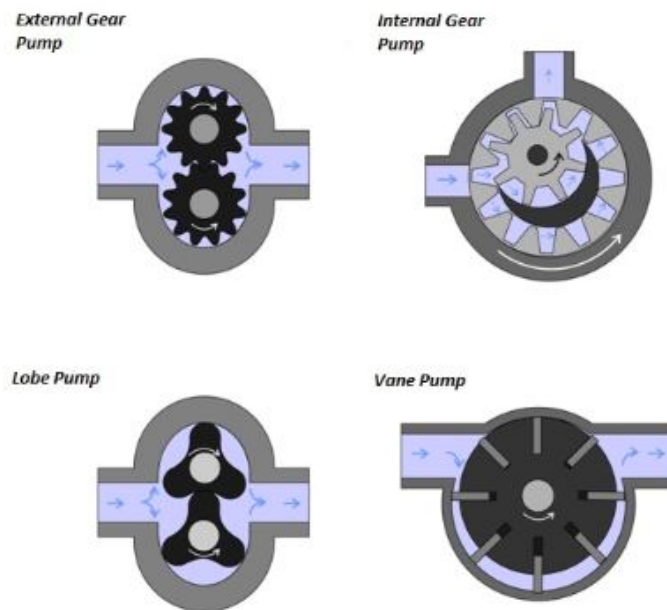
- **Kmitavá čerpadla** - do této kategorie spadají například pístová a membránová čerpadla. Během nasávání se při pohybu pístu nebo membrány vytvoří podtlak, který otevře vstupní ventil a nasaje tekutinu do komory čerpadla. Následně při opačném pohybu dojde k otevření výstupního a uzavření vstupního ventilu a vytlačení objemu komory čerpadla [18, 19]. Funkce je ilustrována na obrázku 4.10.



Obrázek 4.10: Schéma funkce typů kmitavých čerpadel [19]

- **Rotační čerpadla** - v této kategorii jsou například zubová, piškotová či lamelová čerpadla. K přesunu tekutiny dochází v mezerách mezi zuby či lamelami a tělesem čerpadla a při záběru zubů se pak kapalina vytlačuje [18, 19]. Funkce je patrná z obrázku 4.11.

Jak již bylo zmíněno objemová čerpadla jsou vhodná k čerpání hustých a viskózních kapalin, další výhodou je, že jsou šetrná k čerpanému médiu a zachovávají jeho vlastnosti. Nevýhodou je jejich vyšší cena a nižší průtok ve srovnání s jinými typy čerpadel [19].



Obrázek 4.11: Schéma funkce typů rotačních čerpadel [19]

■ Vybrané řešení

Pro využití v modelu jsem zvolil membránové čerpadlo R385 [20]. Čerpadlo je poháněno stejnosměrným motorkem. Napájecí napětí je 12 V, odebíraný proud při zátěži je 0,5 A - 0,7 A. Průtok čerpadla je $1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ - $3 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$, což je vzhledem k objemům se kterými model počítá dostatečné. Horní hranice teploty přečerpávaného média je 80°C . Což pro uvažované teploty dostačuje. V dostupné cenové kategorii se tak jedná o nejvhodnější volbu.



Obrázek 4.12: Vybrané čerpadlo R385 [20]

Tabulka 4.6 : Vybrané parametry čerpadla R385 [20]

Parametr	Hodnota parametru
Napájecí napětí (V)	6-12
Jmenovitý proud (A)	0.5-0.7
Max.přítok ($l \cdot \text{min}^{-1}$)	1-3
Max. teplota kapaliny ($^{\circ}\text{C}$)	80

4.1.6 Výběr ventilů

Ventily využívané v průmyslu, které jsou v přímém kontaktu s potravinami musí splňovat přísná hygienická pravidla. Hlavním požadavkem je zabránění vzniku plísní a šíření bakterií. Dále pak musí být odolné vůči rzi, vlhkosti, změnám teplot a případně působení čistících a dezinfekčních prostředků. Z výše uvedených důvodů se tyto ventily vyrábějí nejčastěji z nerezové oceli. Povrchy, které přicházejí do přímého styku s médiem bývají leštěné, aby se zabránilo usazování částic[21].

Existuje vícero druhů ventilů (např. klapkové, membránové nebo šoupátkové), ale často preferovaným typem v potravinářském průmyslu bývá kulový ventil, který nabízí kompletní uzavření a vysokou kontrolu nad průtokem[21].

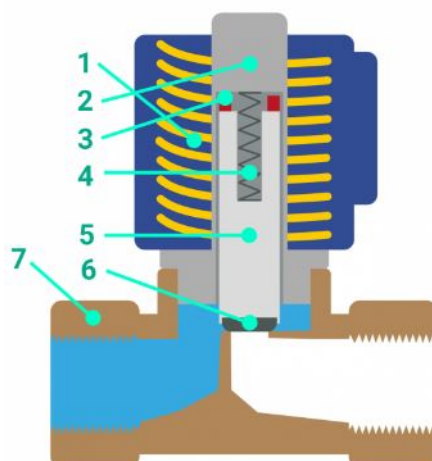
Ventily se pak dále liší aktuátorem použitým pro zavření či otevření ventilu. Aktuátory mohou být hydraulické, pneumatické či elektrické. Dominantním typem však bývají elektricky ovládané solenoidové ventily[21].

Vybrané řešení

V modelu jsem se rozhodl využít solenoidové ventily, jelikož je možné polohu těchto ventilů jednoduše ovládat pomocí elektrického signálu z mikroprocesoru.

Vnitřní uspořádání ventilu je vidět na obrázku 4.13. Funkce ventilu je podobná funkci elektromagnetického relé. Po přivedení elektrického proudu na cívku relé. V závislosti na velikosti proudu vznikne magnetické pole, které pohne kovovým pístem oproti pružině a dojde k otevření či uzavření ventilu. Po odpojení elektrického proudu síla pružiny vrátí píst do počáteční pozice[22]. Dvěma hlavními kategoriemi jsou NC (normálně uzavřené ventily) - ventil je bez přívodu energie uzavřen a NO (normálně otevřené ventily) - ventil je bez přívodu energie otevřen. Častěji používaným je typ NC, a to hlavně z bezpečnostního hlediska, kdy dojde při možném výpadku elektrické energie k uzavření ventilu [22].

Konkrétním zvoleným typem je solenoidový ventil s napájením 12V s mosazným tělem [23] (obrázek 4.14). Ventil má vnější závit 1/2" což koresponduje s ostatními použitými komponentami. Jedná se o typ NC. Stránka prodejce uvádí jmenovitý proud ventilem 3,5 A a maximální teplotu kapaliny 100 $^{\circ}\text{C}$,



Obrázek 4.13: Uspořádání solenoidového ventilu - 1.cívka, 2. armatura, 3. stínící kroužek, 4.pružina, 5.píst, 6.těsnění, 7.tělo ventilu [22]

což je pro použití v modelu dostačující. Dalším kritériem pro výběr daného ventilu byla ekonomická dostupnost.



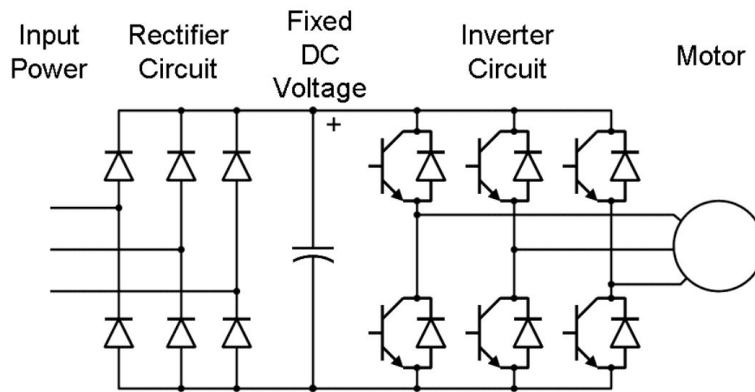
Obrázek 4.14: Použitý solenoidový ventil [23]

Tabulka 4.7 : Vybrané parametry solenoidového ventilu [23]

Parametr	Hodnota parametru
Napájecí napětí (V)	12
Jmenovitý proud (A)	3,5
Tlak (MPa)	0,02-0,8
Max. teplota kapaliny (°C)	100
Režim	NC

4.1.7 Výběr pohonu míchadel

Ve většině průmyslových provozů se dnes k pohonu různých typů zařízení využívají střídavé trojfázové elektrické motory [24]. Jejich hlavní výhodou je spolehlivost a jednoduchost konstrukce oproti stejnosměrným elektrickým motorům, jelikož nevyžadují komutátor či kartáče, tím pádem jsou i spolehlivější a levnější. Jejich nevýhodou je však komplexnější způsob řešení regulace rychlosti otáčení [24]. Ta je úměrná frekvenci napájecího napětí, k dosažení změny rychlosti otáčení se tak nejčastěji využívá frekvenčního měniče. Jedná se o zařízení, které nejprve usměrní střídavé síťové napětí na stejnosměrné a to je pak s využitím střídače převedeno na střídavé napětí požadované frekvence, součástí jsou také řídicí obvody a případně také různé typy ochrany [24].



Obrázek 4.15: Typické schéma zapojení frekvenčního měniče [24]

Vybrané řešení

Ve zmenšeném měřítku, ve kterém je realizován model pivovaru, není ze zřejmých praktických, prostorových a ekonomických důvodů možné pro pohon míchadel použít trojfázový motor s měničem. Na místo toho jsem k pohonu zvolil kartáčový stejnosměrný motorek JGA25-370 [25] pro vystírací i rmutovací kád. Motorek je vybaven čelní převodovkou. Kompletní přehled parametrů je uveden v tabulce 4.8.

Tabulka 4.8 : Vybrané parametry motoru JGA25-370 [25]

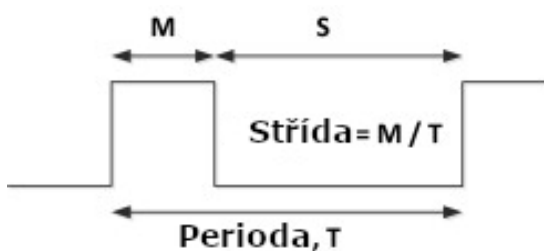
Parametr	Hodnota parametru
Redukční poměr (-)	103
Otáčky bez zatížení (ot/min)	60
Jmenovité otáčky (ot/min)	46
Jmenovitý točivý moment (kg.cm)	2,4
Napájecí napětí (V)	12
Jmenovitý proud (A)	0.45



Obrázek 4.16: Použitý solenoidový ventil [23]

Až 60 otáček za minutu (jmenovitě $46 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$) i s rezervou plně postačuje pro míchání, kdy je potřeba $20\text{-}25 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Jmenovitý točivý moment byl experimentálně také ověřen jako dostatečný.

Řízení otáček motoru bude probíhat pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Jedná se o metodu řízení analogových zařízení pomocí diskrétního signálu mikrokontroléru. Jedná se o unipolární obdélníkový signál u kterého pomocí mikrokontroléru řídíme čas sepnutí/vypnutí. Typický průběh PWM signálu je na obrázku 4.17, kde M je doba zapnutí a S je doba vypnutí [26].



Obrázek 4.17: Typický průběh PWM signálu (převzato a upraveno z [26])

Amplituda signálu obvykle zůstává neměnná a závisí na napájecím zdroji, či na pracovním napětí mikrokontroléru. Změnou střídavy v rozsahu 0 až 1 (resp. 0 % - 100 %) v případě elektrického motoru můžeme měnit výsledné průměrné napětí elektromotoru a tím měnit jeho otáčky [26]. Výsledné průměrné napětí U_{AV} (V) je dáno vztahem

$$U_{AV} = D \cdot U_{ON} \text{ (V)}, \quad (4.8)$$

kde D je střída a U_{ON} (V) je hodnota amplitudy modulovaného napětí.

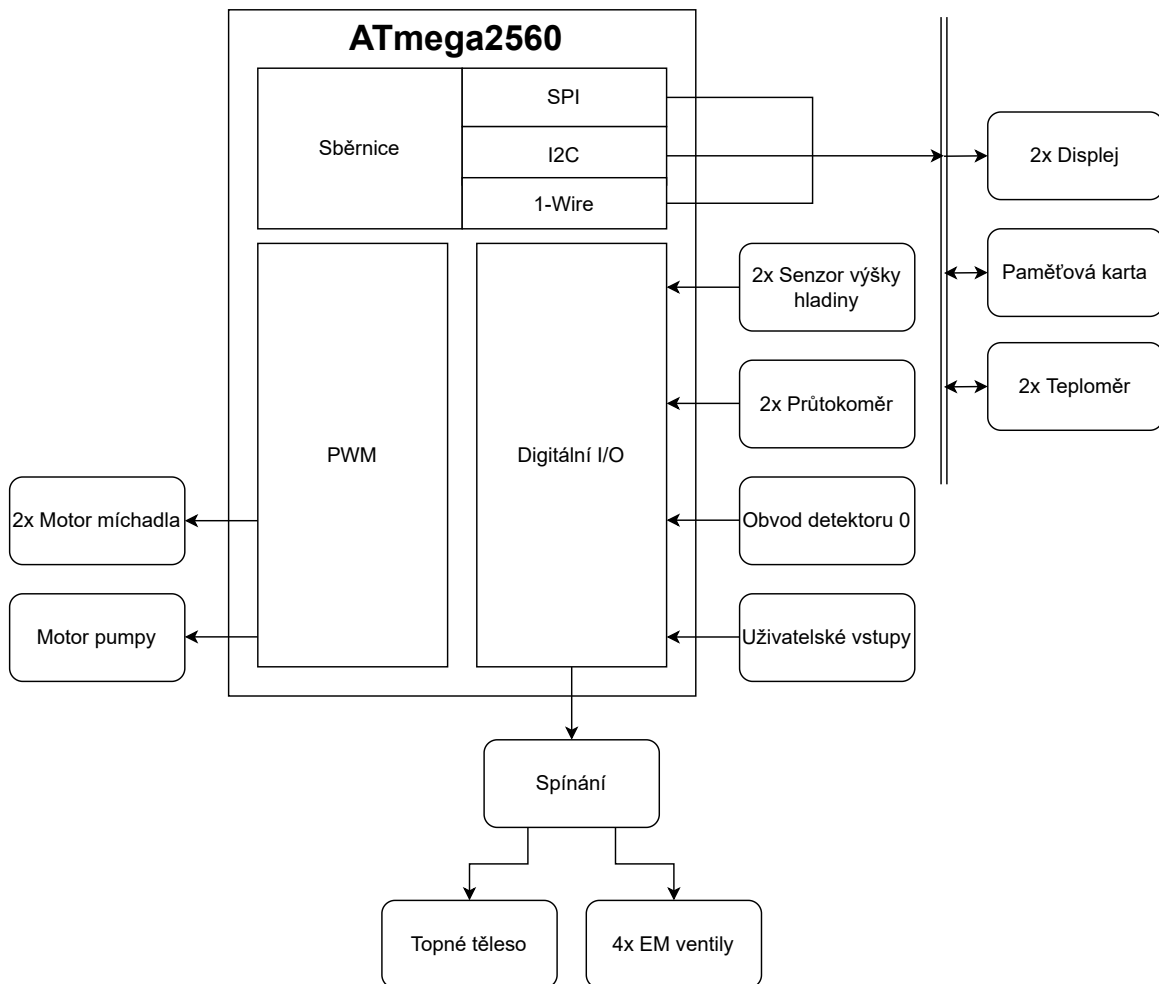
4.2 Návrh řídicí elektroniky

V této kapitole bude detailně rozebráno zapojení a výběr komponentů řídicí elektroniky. Jako poznámku zde uvádím, že elektronika bude realizována z

části z již hotových modulů a to zejména z časových důvodů. Přesto však bude jejich výběr a funkce náležitě popsána.

4.2.1 Mikrokontrolér

Pro řízení celého systému jsem zvolil mikrokontrolér od firmy Microchip, konkrétně se jedná o 8-bitový mikrokontrolér typu ATmega2560 [27]. Hlavním důvodem jeho výběru byl dostatečný počet digitálních I/O a dále pak přítomnost dalších integrovaných periférií jako například zabudovaná EEPROM paměť, sběrnice rozhraní, PWM výstupy, apod. Vybrané parametry mikroprocesoru jsou uvedeny v tabulce 4.9. Obrázek 4.18 pak znázorňuje propojení mikroprocesoru se všemi vnějšími perifériemi. Vybraný mikroprocesor je integrován na vývojové desce.



Obrázek 4.18: Schéma propojení mikrokontroléru s perifériemi

Tabulka 4.9 : Vybrané parametry mikrokontroléru ATmega2560 [27]

Parametr	Hodnota parametru
Taktovací frekvence (MHz)	16
Napájecí napětí (V)	5
Velikost EEPROM (KB)	4
Počet digitálních I/O	54
Počet digitální I/O poskytující PWM výstup	14
Počet analogových vstupů	16

4.2.2 Napájení

Systém používá 3 napájecí napětí, a to 230 V (AC) pro napájení topné spirály (ploténky), 12 V (DC) pro napájení elektrických ventilů, motorů a některých senzorů a dále 5 V (DC) pro napájení mikroprocesoru a ostatní elektroniky. Bližší soupis hlavních komponent je v tabulce 4.10 spolu s napájecím napětím a maximálním udávaným odebíraným proudem.

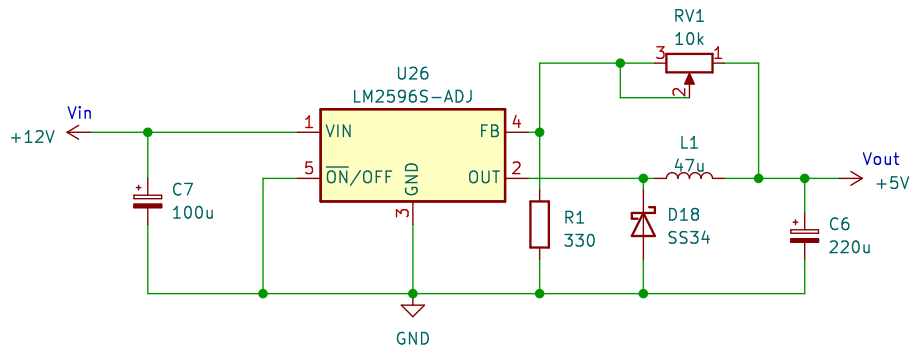
Tabulka 4.10 : Seznam komponent systému s maximálním udávaným/odhadovaným odběrem

Název zařízení	Napájecí napětí (V)	Proudový odběr (A)	Počet (ks)
Ventil	12	3,5	4
Čerpadlo	12	0,7	1
Motor míchadla	12	0,45	2
Mikroprocesor	5	0,2	1
Senzory	5/12	cca 0,12	-
Ostatní elektronika	5/12	cca 0,1	-

Napájení topné spirály (230 V) bude vyřešeno v samostatné kapitole. Pro napájení 12 V zařízení byl zvolen zdroj MEAN WELL LRS-100 [28]. O výstupním napětí 12 V a maximálním proudem 8,5 A s integrovanými ochranami proti přepětí, přetížení a zkratu. Hlavním důvodem výběru byl dostatečný výkon a dostupnost zdroje.

Je také dobré poznamenat, že nejvyšší proud odebírají solenoidové ventily (v sepnutém stavu - otevřeno). Během všech fází do kterých se systém bude moci dostat, však bude otevřen vždy pouze jeden ventil, což bude také příslušně programově ošetřeno. Zvolený zdroj tak bude s dostatečnou rezervou pokrývat odběr všech zařízení.

Napětí 5 V, které je požadováno některými zařízeními bude dodáno step-down regulátorem napětí LM2596ADJ od firmy Texas Instruments [29]. Zvolený regulátor je součástí samostatného modulu a jedná se o verzi s nastavitelným výstupním napětím, které v tomto případě bude 5 V. Po vizuální analýze modulu a porovnání s katalogovým listem bylo zřejmé, že se jedná o doporučené zapojení nastavitelného regulátoru. Schéma modulu je na obrázku 4.19.



Obrázek 4.19: Schéma zapojení modulu s regulátorem napětí LM2596ADJ

V daném zapojení je pro doladění hodnoty výstupního napětí použit trimr. Na trimru by měla být nastavena hodnota dle vztahu, který je udán výrobcem jako

$$R_{V1} = R_1 \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) (\Omega), \quad (4.9)$$

kde R_1 je zvolená hodnota odporu, V_{OUT} je požadované výstupní napětí a V_{REF} je referenční napětí generované generované vnitřním referenčním zdrojem. V tomto konkrétním případě pak vychází hodnota

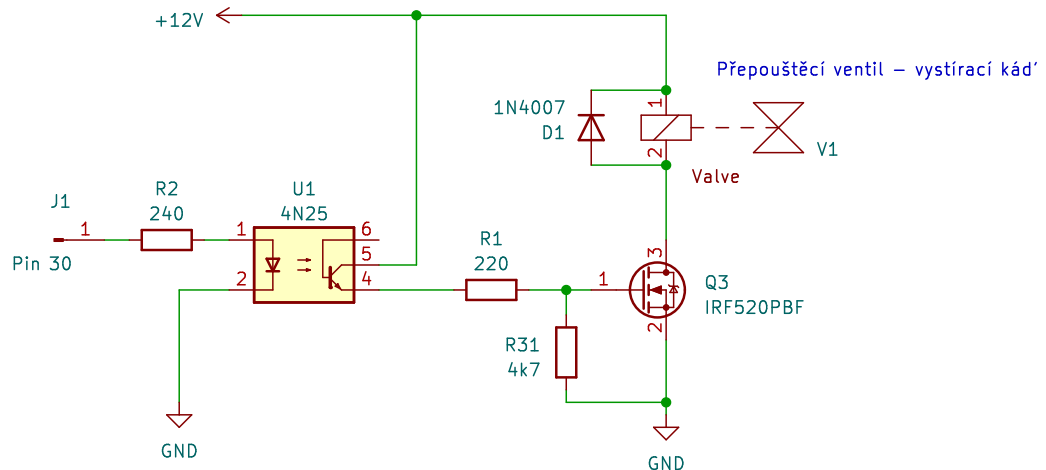
$$R_{V1} = 330 \cdot \left(\frac{5}{1,23} - 1 \right) = 1011\Omega. \quad (4.10)$$

4.2.3 Spínání ventilů

Jak bylo uvedeno dříve, systém obsahuje celkem 4 solenoidové ventily. Ventil samozřejmě nelze připojit přímo k výstupu mikrokontroléru a to jak kvůli vysokému odběru, tak kvůli faktu, že se jedná o induktivní zátěž, jejíž přímé napojení by na mikrokontrolér mělo negativní vliv v podobě rušení a neslo by celou řadu dalších problémů. Ventily mají pouze dvě polohy, nedochází tedy k jejich rychlému spínání. Schéma zapojení pro spínání ventilů je uvedeno na obrázku 4.20, kde je uvedeno zapojení pro spínání přepouštěcího ventilu vystírací kádě, pro ostatní ventily je zapojení totožné.

Spínacím prvkem je zde unipolární NMOS tranzistor IRF520PBF. Maximální udaný proud drainem je 9.2 A, což zde plně postačuje. Udávaný odpor tranzistoru v sepnutém stavu je $R_{DS(on)}=270 \text{ m}\Omega$. Při maximálním protékacím proudu $I_{MAX}=3,5 \text{ A}$ bude ztrátový výkon P_Z na součástce odpovídat hodnotě ze vztahu

$$P_Z = I_{MAX}^2 \cdot R_{DS(on)} (W) \quad (4.11)$$



Obrázek 4.20: Schéma zapojení spínání solenoidového ventilu

$$P_Z = 3,5^2 \cdot 0,27 = 3,31 \text{ W.} \quad (4.12)$$

Katalogový list uvádí, že maximální teplota čipu je $175 \text{ }^\circ\text{C}$ a tepelný odpor mezi čipem a okolním prostředím je $62 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. V tomto konkrétním případě je tedy nutné osadit tranzistor chladičem. Požadovaný tepelný odpor chladiče R_{thR-A} vypočítáme jako

$$R_{thR-A} = \frac{T_j - T_a}{P_Z} + R_{thJ-C} + R_{thC-R} \text{ (W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} \quad (4.13)$$

$$R_{thR-A} = \frac{175 - 25}{3,31} + 2,5 + 0,5 = 48,3 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}, \quad (4.14)$$

kde T_j je teplota čipu, T_a je okolní teplota, P_Z je ztrátový výkon, R_{thJ-C} je tepelný odpor přechodu čip-pouzdro a R_{thC-R} je tepelný odpor přechodu pouzdro-chladič. Chladič tedy musí mít tepelný odpor $48,3 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ a méně. Jelikož provoz součástky při její maximální dovolené teplotě by nebyl vhodný, byl zvolen chladič DO1 [31] s více než polovičním tepelným odporem $22 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Aby nedocházelo k přenosu rušení způsobeným spínáním indukivní zátěže na piny mikrokontroléru, je jeho výstupní pin galvanicky oddělen pomocí optočlenu 4N25. Rezistory R1 a R2 slouží jako ochrana diody a hradla tranzistoru, R31 pak slouží jako pull-down rezistor.

Dioda D1 je tzv. flyback dioda, která má za úkol ochránit spínací tranzistor proti proudovým špičkám, které vznikají při spínání indukivní zátěže [33].

4.2.4 Spínání topného elementu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1.1 bude pro vyhřívání rmutovací kádě použita 1000 W ploténka. S maximálním odběrem 4,26 A při napájení 230 V. To však pouze na nejvyšší stupeň, spínací obvod je pro větší univerzálnost a možnost případného budoucího vylepšení a jako rezerva na tyto hodnoty dimenzován.

Jako spínací prvek zde byl využit triak BTA06 [34]. S maximálním proudovým zatížením 6 A a napětím až 600 V je pro tuto aplikaci i s rezervou plně dostačující. V katalogovém listu lze nalézt, že odpor triaku v sepnutém stavu je $R_{DS(on)}=60\text{m}\Omega$ a dále hodnotu prahového napětí které činí $U_{t0}=0.85\text{V}$. Spolu s maximálním proudem, který byl stanoven na $I_{MAX}=4,5$ A lze podle vztahu z [35] vypočítat výkonové ztráty jako

$$P_Z = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{t0} \cdot I_{MAX} + R_{DS(on)} \cdot I_{MAX}^2 \text{ (W)}. \quad (4.15)$$

$$P_Z = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot 0,85 \cdot 4,5 + 0.06 \cdot 4,5^2 = 4,66 \text{ W}. \quad (4.16)$$

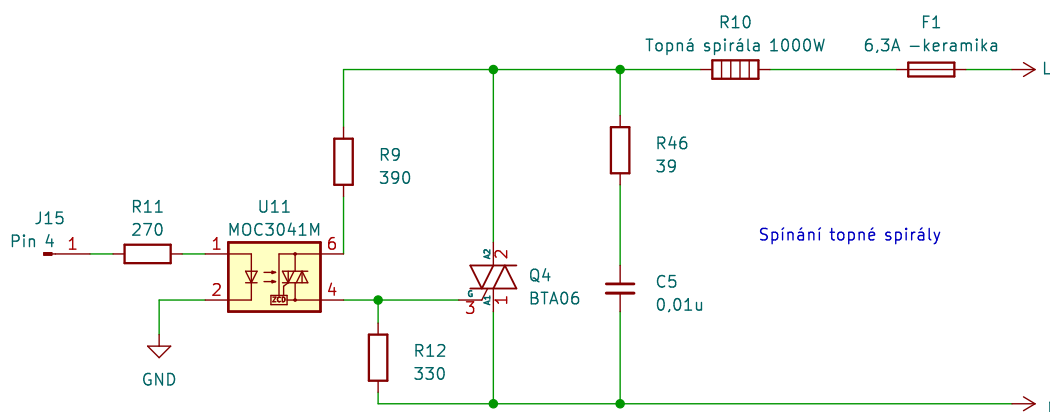
Vzhledem k tomu, že katalogový list uvádí maximální teplotu čipu $T_j=125$ °C a tepelný odpor mezi čipem a okolním prostředím $60 \text{ W}^\circ\text{C}^{-1}$, je v tomto případě nutné na součástku namontovat chladič. Klíčový parametr pro výběr chladiče, tedy jeho tepelný odpor R_{thR-A} vypočítáme jako

$$R_{thR-A} = \frac{T_j - T_a}{P_Z} + R_{thJ-C} + R_{thC-R} \text{ (W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}) \quad (4.17)$$

$$R_{thR-A} = \frac{125 - 25}{4,66} + 2,7 + 0,5 = 24,66 \text{ W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}, \quad (4.18)$$

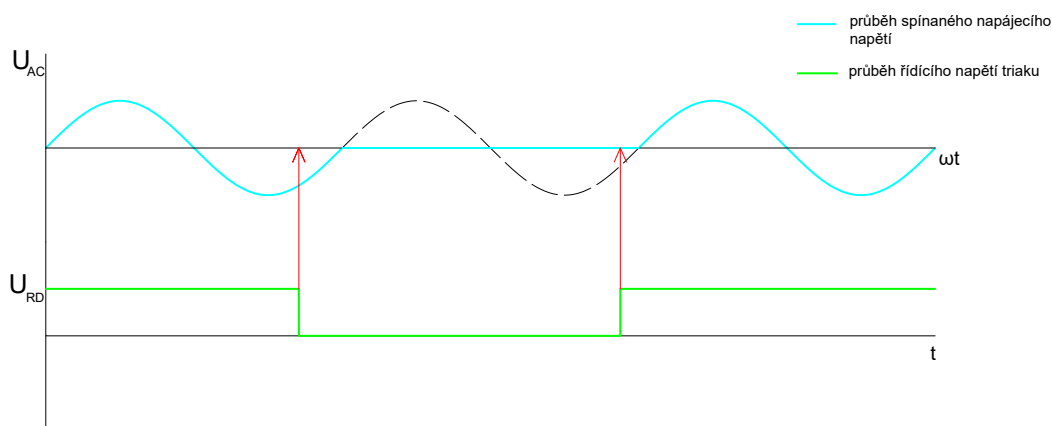
kde T_j je teplota čipu, T_a je okolní teplota, P_Z je ztrátový výkon, R_{thJ-C} je tepelný odpor přechodu čip-pouzdro a R_{thC-R} je tepelný odpor přechodu pouzdro-chladič. Získaná hodnota však počítá s maximální možnou teplotou čipu což není vhodné, byl tedy zvolen chladič V4330N [36] s tepelným odporem $13,5 \text{ W}^\circ\text{C}^{-1}$.

Pro ovládání spínacího triaku pomocí mikrokontroléru bylo zvoleno optorelé MOC3041 zapojené dle [37]. Zajišťuje oddělení logiky od výkonové části obvodu pomocí optotriaku. Navíc obsahuje integrovaný tzv. zero cross detector, což je obvod pro detekci průchodu napájecího signálu 0. Ten zajistí, že k sepnutí výkonového triaku dojde pouze v oblasti 0, aby se předešlo namáhání triaku, nežádoucímu rušení a případným proudovým špičkám. Funkce takového obvodu je schematicky ilustrována na obrázku 4.22. Přestože topný element představuje čistě rezistivní zátěž, byl obvod na doporučení vedoucího práce doplněn o snubber, který vychází z doporučeného zapojení v



Obrázek 4.21: Schéma zapojení spínání topného elementu (ploténky) - vychází z doporučeného zapojení katalogového listu [37]

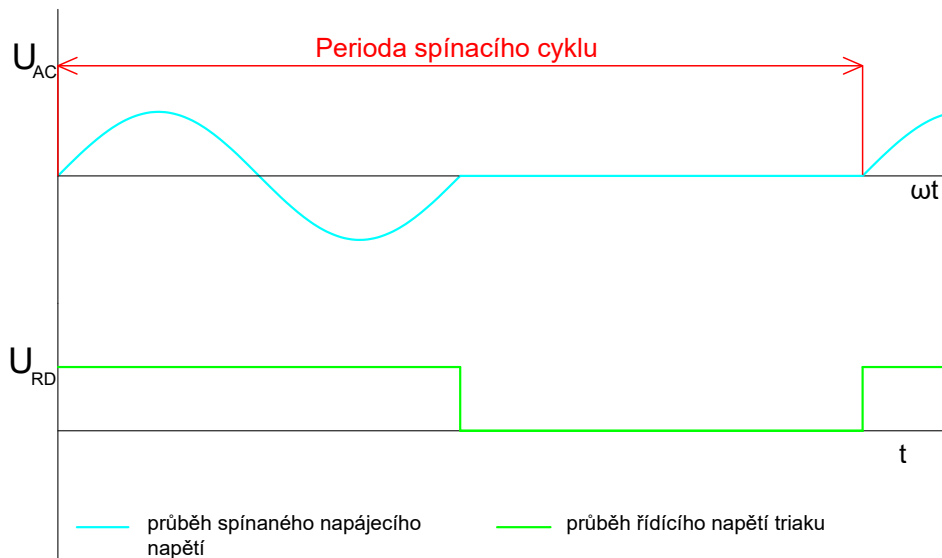
katalogovém listu [37]. Snubber je tvořený rezistorem R46 a kondenzátorem C5. Jeho hlavním úkolem je snížení napěťových a proudových špiček, které mohou vzniknout při spínání (zejména spínání indukční zátěže) a omezení rušení [38]. Pro ochranu obvodu je zařazena 6,3 A pojistka s keramickou výplní.



Obrázek 4.22: Příklad spínání triaku za využití obvodu pro spínání v 0

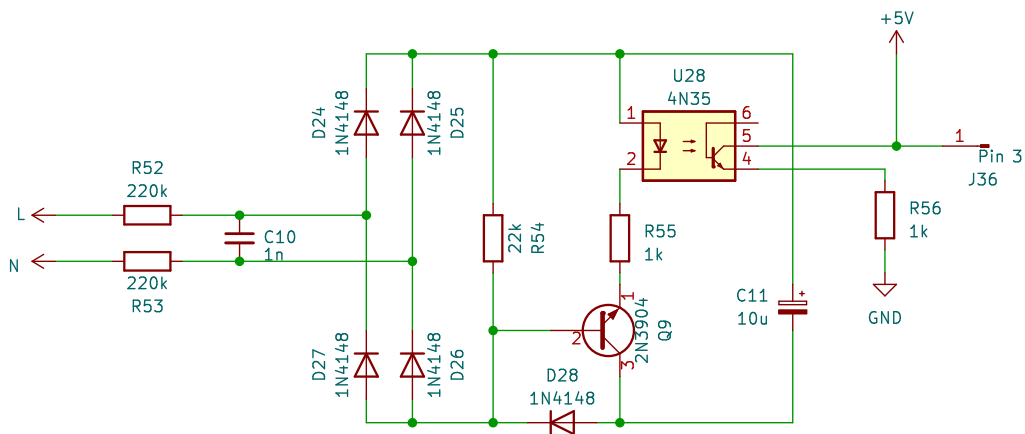
Regulace výkonu topného elementu bude probíhat formou změny tzv. duty cycle (poměru mezi dobou zapnutí a dobou vypnutí) během určeného časového okna. Dobu zapnutí a vypnutí bude tvořit konkrétní počet period napájecího napětí. Takto lze měnit průměrný výkon topného elementu za dobu jednoho spínacího cyklu. [39] Poměr sepnutí a vypnutí pak bude ovlivňován regulátorem na základě nastavené teploty.

Přestože je možné díky obvodu MOC3041 spínání při průchodu napětí 0, byl pro potřeby řízení přidán samostatný obvod detekce průchodu 0 z důvodu



Obrázek 4.23: Příklad průběhu jednoho spínacího cyklu, kdy je triak zapnut 50% délky cyklu

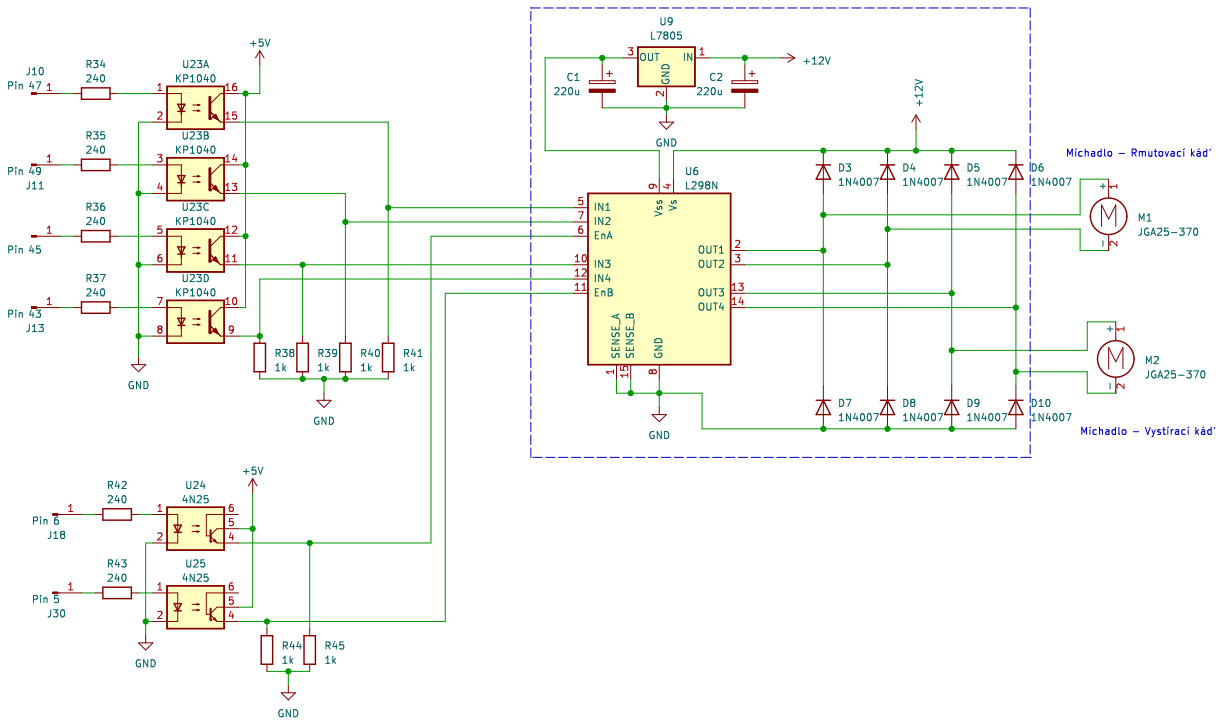
poskytnutí zpětné vazby pro mikrokontrolér. Jedná se o modifikaci běžně používaného zapojení s diodovým můstkem a optočlenem. Samotné zapojení je realizováno podle [40] s drobnou úpravou na výstupu obvodu.



Obrázek 4.24: Schéma obvodu pro detekci průchodu napájecího napětí 0 podle [40]

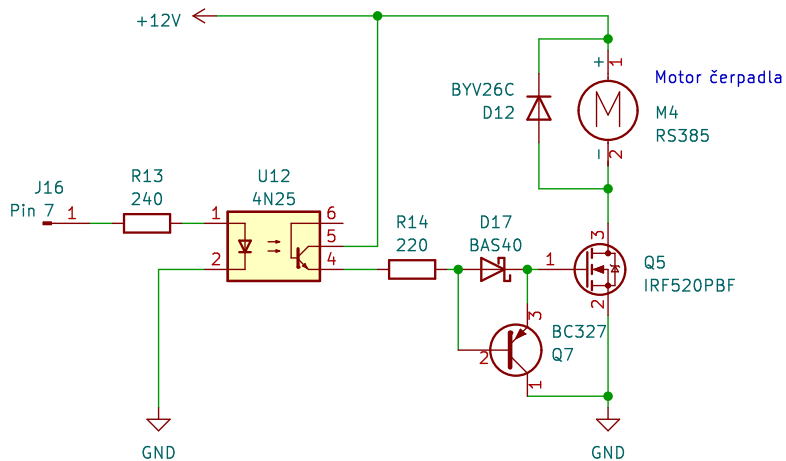
Sinusový signál je omezen vstupními odpory R52 a R53 a následně usměrněn přes můstek (D24-D27). R54 pak tvoří dělič se zmíněnými rezistory. Usměrněný signál nabíjí kondenzátor C11 skrze diodu D28. V okamžiku překročení nuly (resp. v blízkosti nuly) se napětí na R54 sníží oproti napětí na C11, kondenzátor se začne vybíjet přes tranzistor Q9 a dojde k sepnutí optočlenu a vygenerování

4. Návrh modelu zařízení pro rmutování



Obrázek 4.26: Schéma připojení DC motoru k obvodu L293D [41]

uvažována možnost využití PWM modulace pro řízení rychlosti čerpání. Jako flyback dioda je zde proto použita rychlá lavinová dioda BYV26C. další změnou je zde přidání bipolárního tranzistoru BC327, který slouží pro rychlé odsátí náboje z hradla spínacího unipolárního tranzistoru a zajišťuje jeho rychlé vypnutí. Podobně jako u spínání ventilů je zde využito optické oddělení.

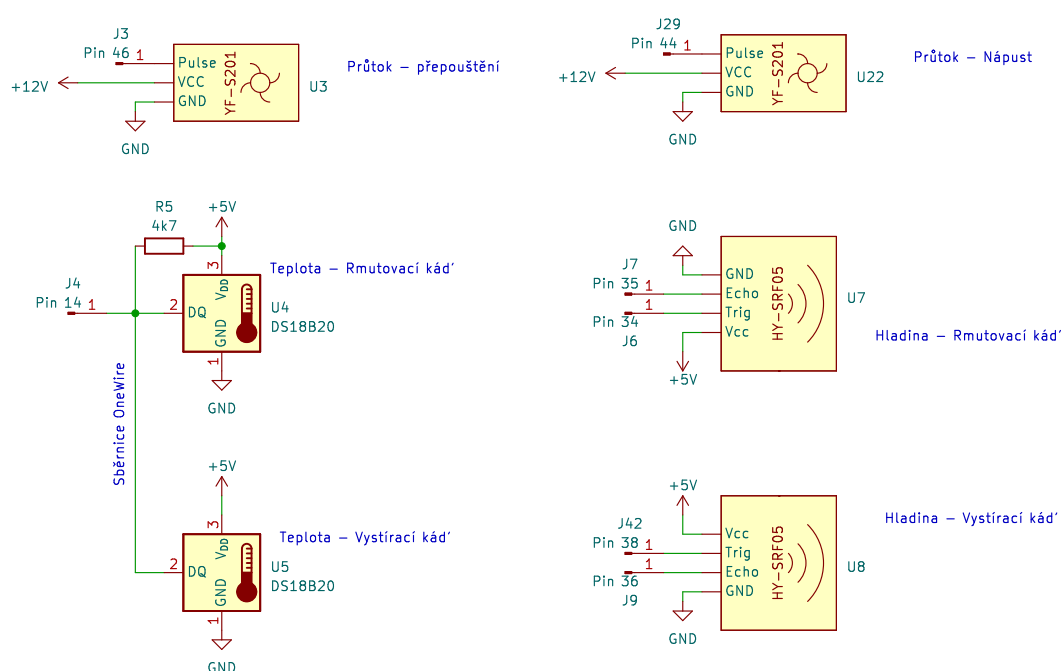


Obrázek 4.27: Schéma zapojení spínání čerpadla

4.2.6 Zapojení senzorů

Propojení senzorů s mikrokontrolérem je přímočaré. Sensory průtoku dodávají informaci v podobě pulsů, která je dále zpracována, ke komunikaci je tedy zapotřebí pouze jeden pin pro každý senzor. Ultrazvukové hladinové senzory komunikují skrze dva piny, a to Trigger (vyslání pulzu) a Echo (příjem odraženého signálu).

Dva teplotní senzory jsou zapojeny ke společné sběrnici 1-Wire, po které komunikují s mikrokontrolérem. K identifikaci konkrétního zařízení slouží 64-bitová adresa, která je definována výrobcem a je pro každé zařízení unikátní. Teplotní senzory jsou zapojeny v konfiguraci napájení z externího zdroje, která je uvedena v katalogovém listu [10].

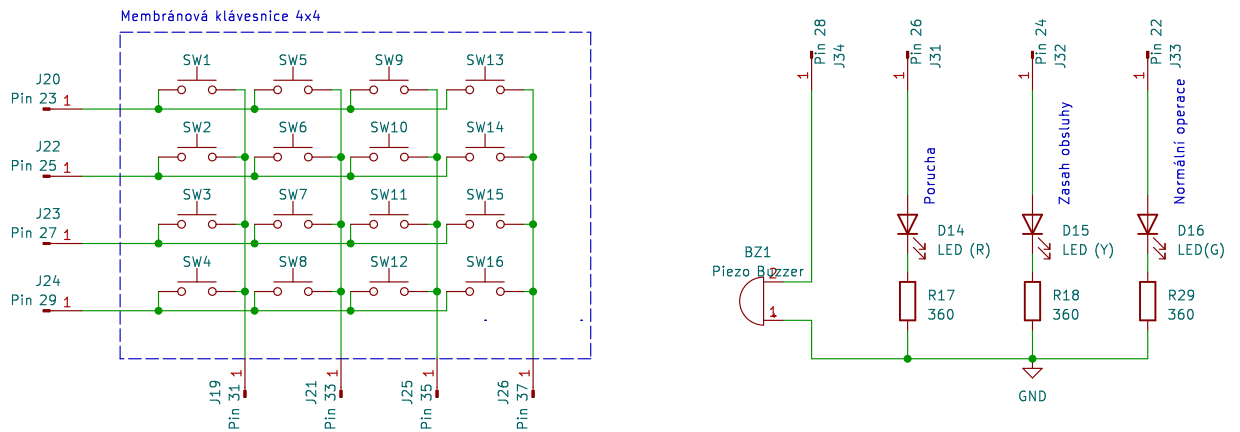


Obrázek 4.28: Schéma připojení senzorů

4.2.7 Zapojení zařízení pro styk s uživatelem

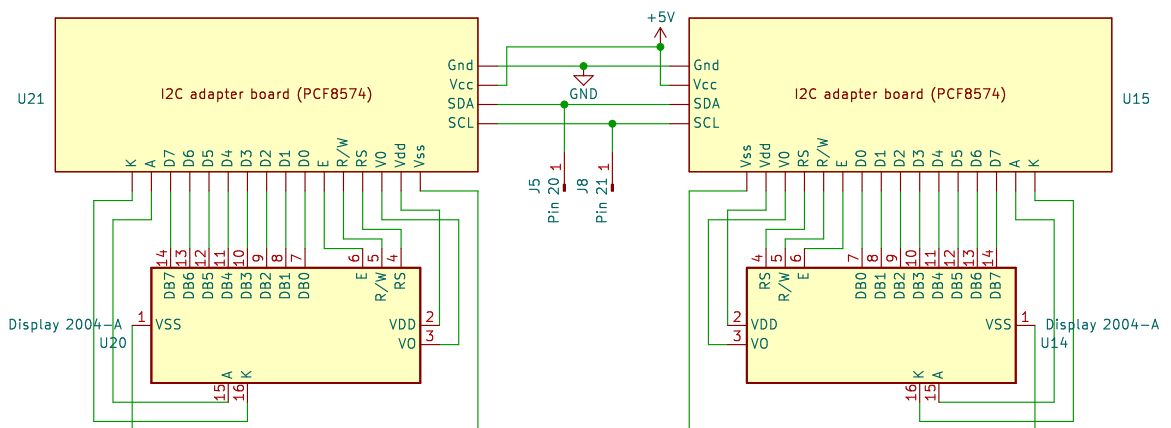
Pro ovládání celého systému je použita maticová klávesnice 4x4. Vyhodnocování stisknuté klávesy bude probíhat standartním způsobem, kdy jsou postupně za sebou buzeny sloupce a čteny jednotlivé řádky, při stisknutí tlačítka je detekována v konkrétním řádku logická 1 (buzený sloupec je znám), takto je tedy možné určit stisknutou klávesu. Vybraná klávesnice je membránového typu, stisknutí tlačítka nezpůsobí zkrat, ale dojde k propojení s odporem 125 Ω (ověřeno měřením), klávesnici je tedy možné připojit přímo k mikrokontroléru bez nutnosti zařazovat další rezistory.

4. Návrh modelu zařízení pro rmutování



Obrázek 4.29: Schéma klávesnice a okamžité signalizace

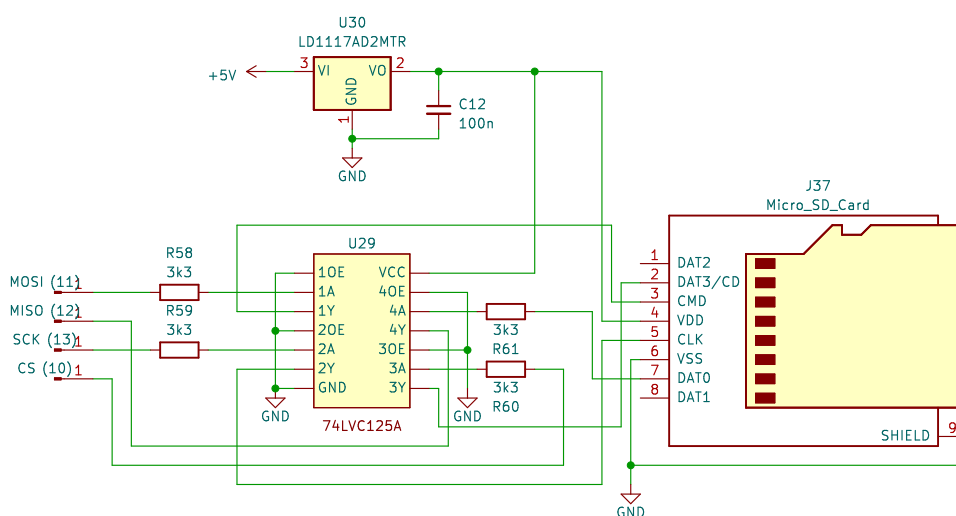
Informace budou uživateli zařízení dodávány přes dva alfanumerické LCD displeje DM2004 o velikosti 20x4 znaků s řadičem SPLC780C. Velikost a počet displejů byl zvolen tak, aby poskytoval dostatek prostoru pro přehledné zobrazení všech požadovaných informací o systému. Oba displeje jsou osazeny modulem [42] pro převod na I2C sběrnici postaveným na integrovaném obvodu PCF8574, což je 8 bitový vstupně-výstupní I2C expandér. Pro komunikaci skrze I2C sběrnici s oběma displeji jsou třeba tedy pouze 4 vodiče, což výrazně redukuje potřebnou kabeláž. Pro okamžitou informaci o aktuálním stavu systému bez nutnosti čtení displeje jsou využity tři LED a piezobzučák vybavený budičem.



Obrázek 4.30: Schéma připojení LCD displejů (sběrnice I2C)

4.2.8 Ukládání dat

Data o časovém průběhu teploty v obou kádích budou ukládána na microSD kartu. Pro připojení karty k systému byl opět z praktických důvodů využit modul [43], který komunikuje s mikrokontrolérem pomocí sběrnice SPI. Modul slouží jako převodník napěťové úrovně mezi 5 V (logika mikrokontroléru) a 3.3 V napěťová úroveň na které pracuje microSD karta. Je postaven na obvodu 74LVC125A což jsou 4 budiče sběrnice s třístavovým výstupem integrované v jednom pouzdře. Piny ovládací výstup jsou připojeny na zem, což znamená že výstupy jsou vždy aktivovány (OE -output enabled). Součástí je pak také regulátor napětí LD1117AD2MTR, s pevným výstupem 3.3 V pro napájení karty a obvodu 74LVC125A.



Obrázek 4.31: Schéma zapojení modulu microSD karty

Ukládaná data budou ve formě textového dokumentu (.txt), který je vhodný pro další zpracování dat. Data budou zapisována na jednotlivé řádky souboru a oddělena mezerou. Formát uspořádání uvádí tabulka

Tabulka 4.12 : Uspořádání dat zálohovaných na microSD kartu

1. sloupec	2. sloupec	3. sloupec
čas od počátku procesu [s]	teplota rmutovací kádě [°C]	teplota vystírací kádě [°C]

Kapitola 5

Mechanická část

Konstrukci jsem kompletně zhotovil svépomocí s využitím běžně dostupného nářadí, návrh tedy musel odpovídat možnostem, které jsou k dispozici. Základem celého systému je konstrukce sestavená z hliníkových L profilů a plechů, které byly nařezány, a smontovány pomocí šroubů. Vznikly tak dvě rámové konstrukce o různých výškách, na které budou usazeny varné nádoby. Vyšší konstrukce slouží pro usazení rmutovací kádě, která bude vyhřívána elektrickou ploténkou. Pro usazení ploténky bylo zhotoveno lůžko z hliníkového plechu, do kterého byla ploténka zasazena a zespodu upevněna šroubem na hliníkový U profil. Obě sestavy byly následně namontovány na společnou desku, kam následně byly připevněny i další komponenty.



Obrázek 5.1: Hrubé konstrukční uspořádání systému

Jako varné nádoby byly použity dva nerezové hrnce o objemech 6,1 l a 3,8 l. Do obou varných nádob bylo nutné navrtat dva otvory pro namontování ventilů a teploměrů. Do navrtných otvorů byly vsazeny přechodky pro namontování ventilů (vnitřní závit 1/2"). Pro uložení teploměru jsem vytvořil jímky z měděné trubičky, do kterých je možné teploměr vsadit. Oba výše popsané komponenty byly připájeny pomocí klempířské pájky.



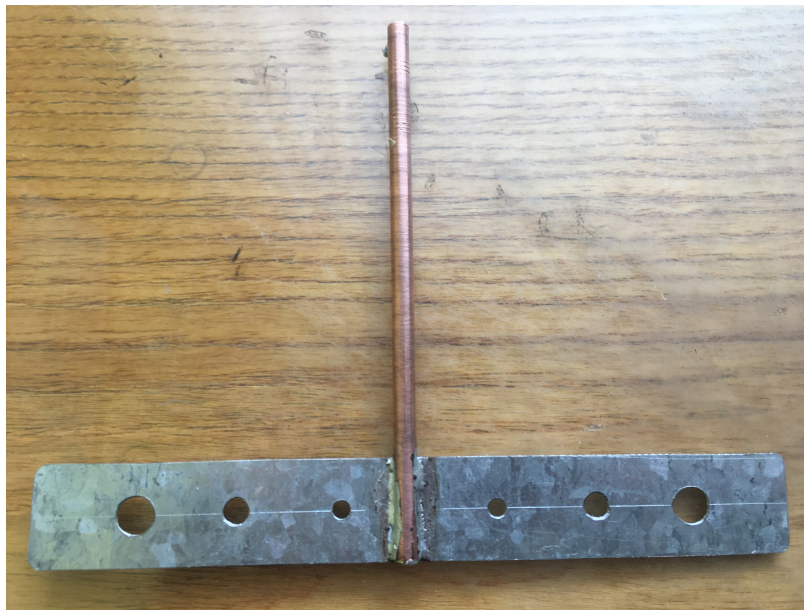
Obrázek 5.2: Pohled na vnitřek kádě

Pro míchání obsahu nádob jsem zhotovil dvě dvoulopatková míchadla, jejichž osy jsou zhotoveny z mědi a lopatky z pozinkovaného plechu. Obě komponenty byly propojeny pomocí pájení. Pohony míchadel (motory) jsem připevnil na příčný nosník zhotovený z hliníkového U profilu, který byl namontován na hrnec pomocí šroubů.

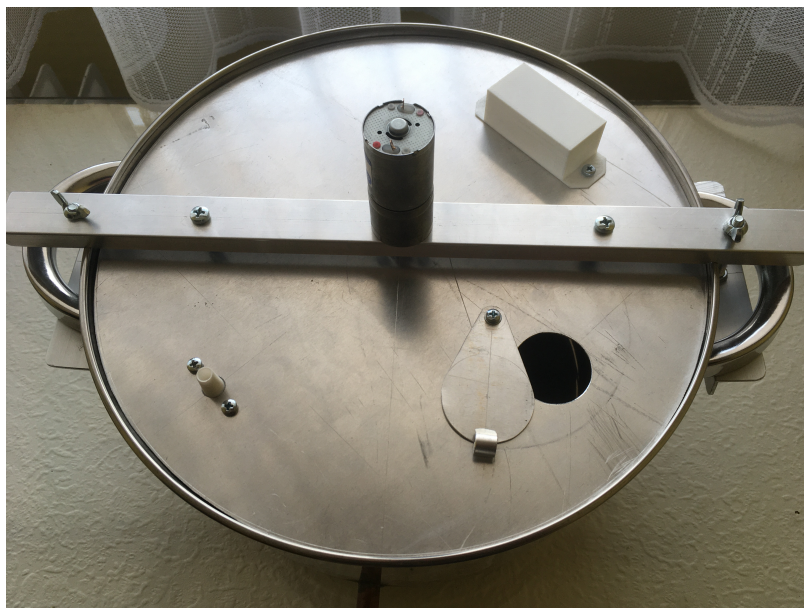
Obě nádoby mají víka vyrobená z hliníkového plechu příslušného průměru. Každé víko je vybaveno otočným servisním průzorem. Dále se na něm nachází uložení ultrazvukového hladinového senzoru, což je plastový box umístěný na víku vně nádoby (zhotoveno 3D tiskem) a hrdlo pro napojení nápuštní hadice (též vytištěné). U vystírací kádě je navíc otvor pro ventil na napouštění vody.

Voda bude napouštěna a přečerpávána skrze PVC hadice. Propojení s čerpadlem a s ventily je realizováno násuvným hrdlem, které je buď připevněno šrouby (na víku nádob), nebo 3D vytištěnou redukcí na 1/2"závit (ventily).

Veškerá elektronika kromě napájecího zdroje byla umístěna do plastového elektroinstalačního boxu. Box byl dále vybaven nutnými otvory pro kabelové přívody od senzorů a aktuátorů. Dále je pak box vybaven perforacemi a otvorem pro ventilátor s mřížkou. Přestože jsou komponenty, u kterých je to nutné, osazeny příslušnými chladiči je na víku boxu namontován ventilátor, aby při provozu nedocházelo k velikému zvyšování teploty uvnitř boxu.



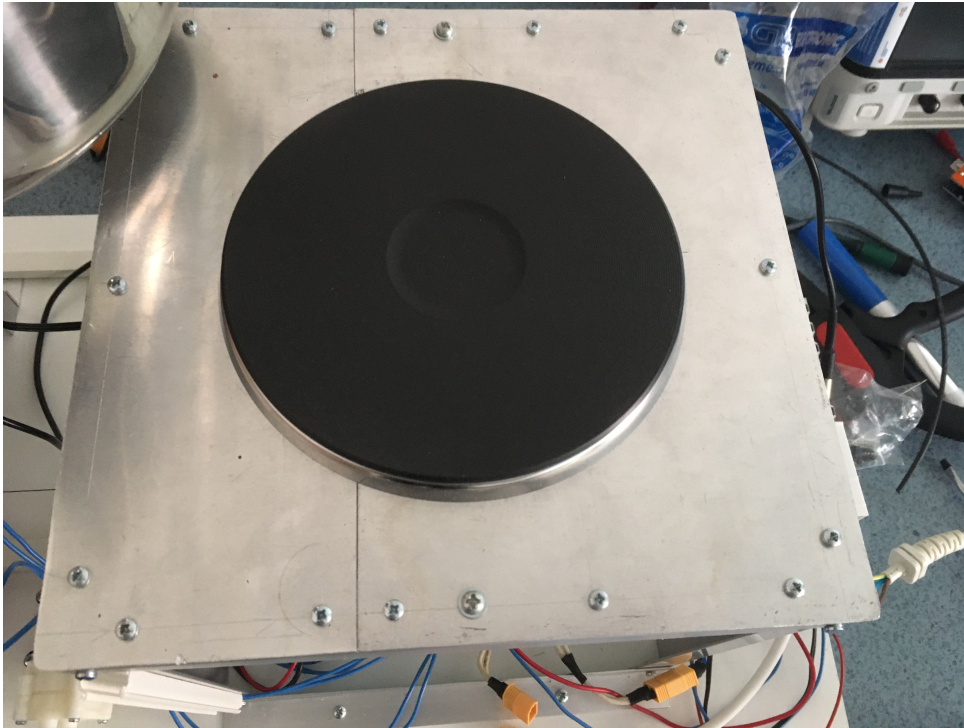
Obrázek 5.3: Detailní pohled na míchadlo



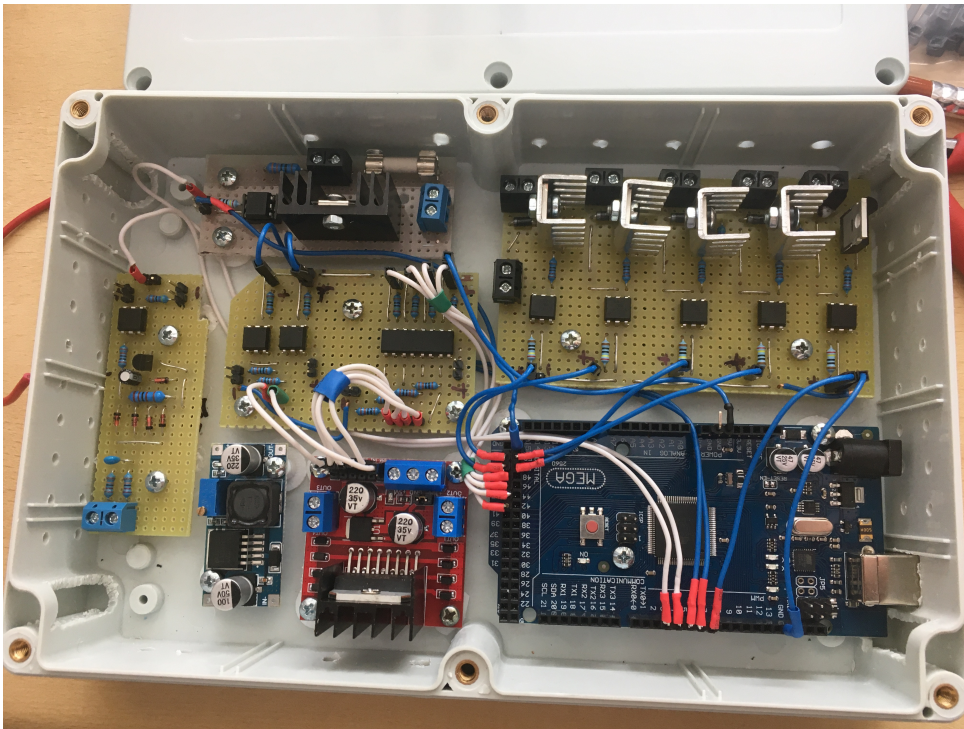
Obrázek 5.4: Vrchní pohled na víko kádě s osazeným pohonem, servisním otvorem a uložením senzoru

Pro styk s uživatelem jsem navrhl a zhotovil ovládací panel pomocí 3D tisku. Na panelu jsou osazeny oba displeje, maticová klávesnice a signalizační LED s piezobzučákem.

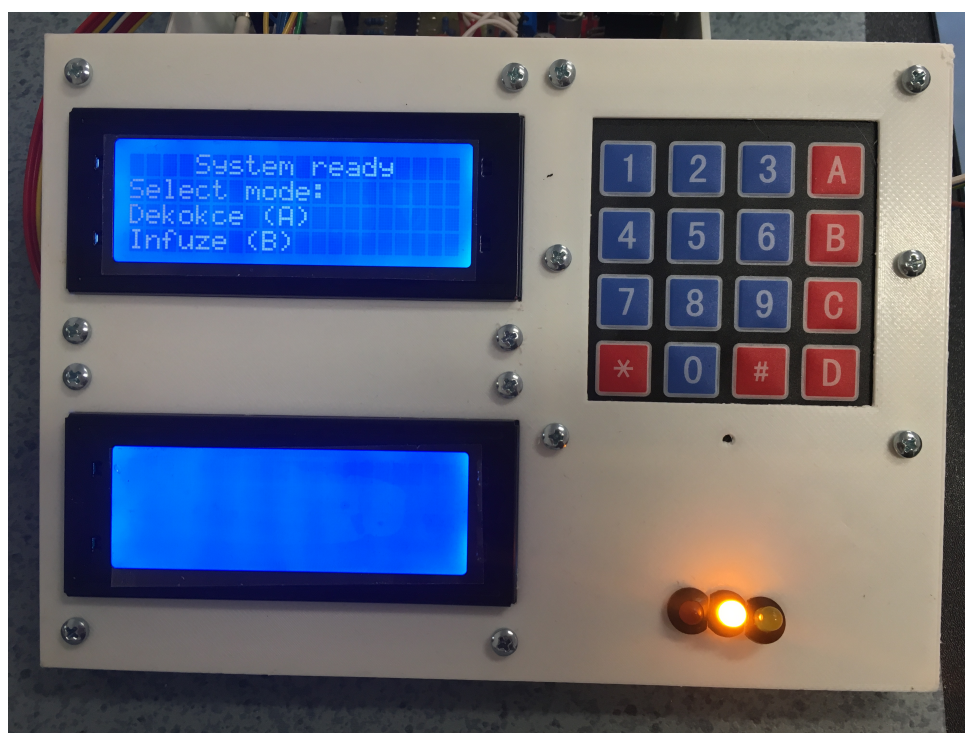
Fotografie kompletního zařízení jsou na obrázcích 5.8 a 5.9.



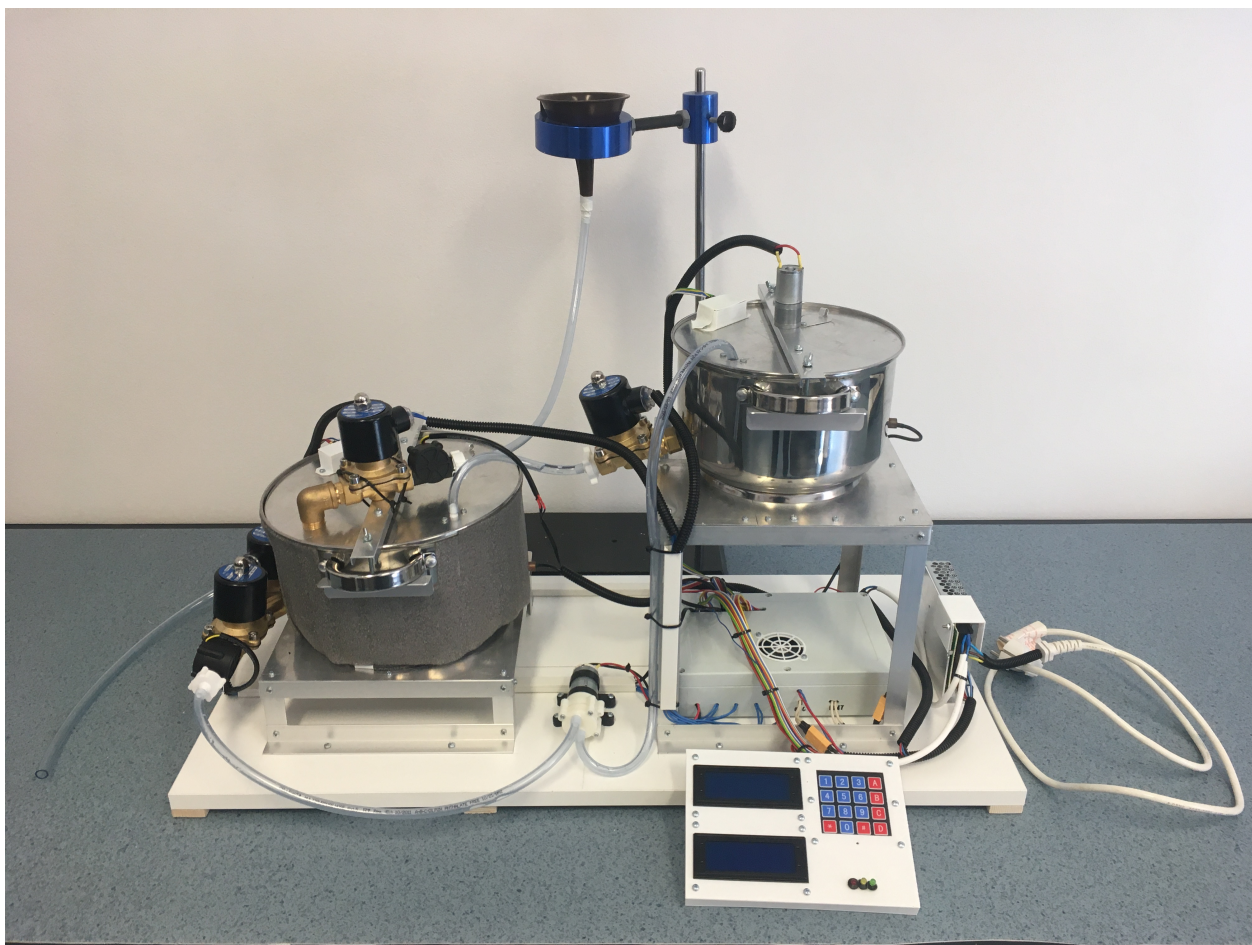
Obrázek 5.5: Vrchní pohled na uložení topného elementu (ploténky)



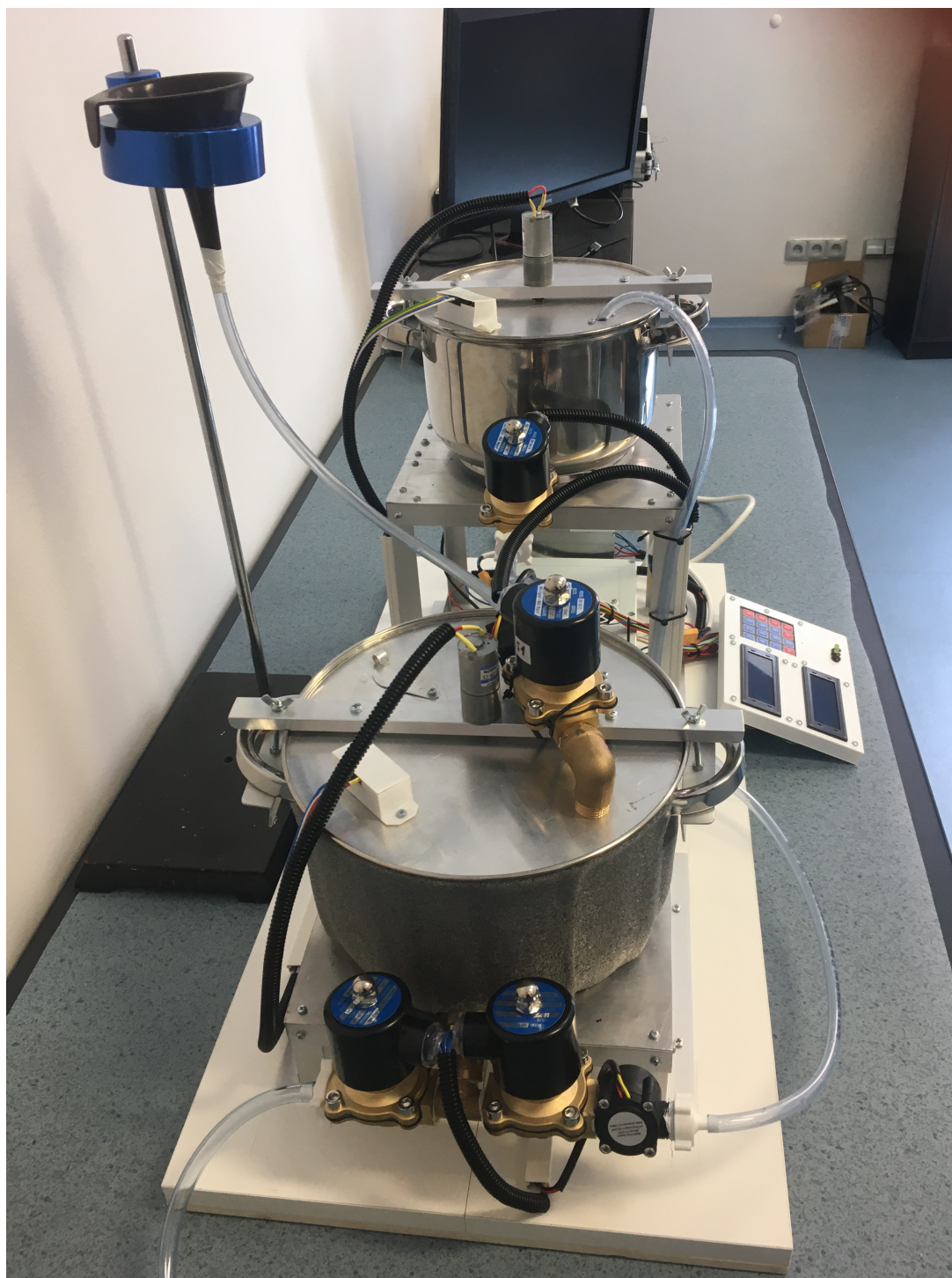
Obrázek 5.6: Pohled na vnitřek boxu s elektronikou (fotografie z průběhu stavby)



Obrázek 5.7: Ovládací panel systému



Obrázek 5.8: Pohled na kompletní systém



Obrázek 5.9: Boční pohled na kompletní systém

Kapitola 6

Programová část

Program pro řízení systému funguje na bázi stavového automatu, kdy dochází k procházení hlavní smyčky s definovanými stavy (vychází z digramu v kapitole 3.5). V jednotlivých stavech obsluhovány příslušné periferie či čteny senzory a to až do doby splnění podmínky pro přechod do dalšího stavu.

Základem je hlavní programová smyčka, ve které jsou postupně procházeny jednotlivé stavy procesu. Na začátku je vždy výběr a zadání důležitých dat jako jsou jednotlivé teploty a technologické prodlevy. Poté již následuje samotný proces rmutování. Mimo to jsou také součástí programu podprogramy pro získání dat ze senzorů, či pro ovládání akčních členů jako jsou čerpadla nebo ventily. Pro získání dat z teplotních senzorů, obsluhu LCD displejů a pro zápis na micro SD kartu byly využity volně dostupné knihovny. Jako ochrana proti zaseknutí programu v cyklu v důsledku chyby byl programově aktivován interní watchdog obvod, který mikrokontrolér restartuje, pokud nedojde alespoň jednou za 4 s k průchodu hlavní smyčkou.

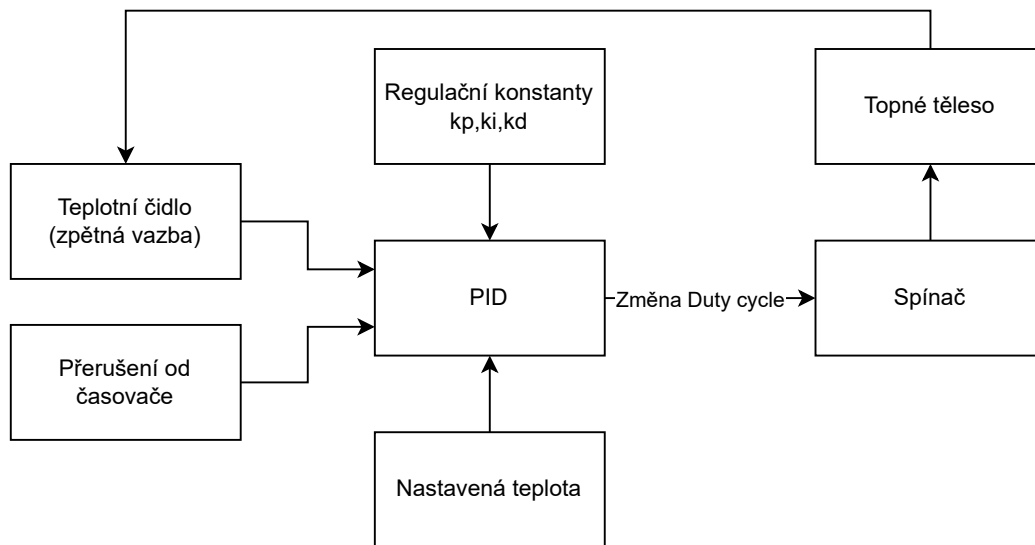
Zadávání a monitorování parametrů je možné pomocí ovládacího panelu (displej s klávesnicí). Hlavní informace jako teploty v nádobách a objem tekutiny jsou během chodu uvedeny na displeji společně s aktuálním stavem zařízení. Pro rychlou informaci o stavu zařízení jsou přítomné také 4 LED a piezobzučák. Červená+bzučák (porucha), oranžová (nutný zásah obsluhy) a zelená (normální operace).

Výsledný program byl však kvůli časovým možnostem spíše experimentálního charakteru a měl za cíl ověřit funkci všech systémů a jejich návaznosti. Všechny podstatné bloky (zejména regulace teploty) byly implementovány a vyzkoušeny. V programu zbývá prostor pro řadu vylepšení a doplnění, jedná se především o ošetření možných chybových stavů zařízení, případně dalšího rozšíření možností rmutování.

6.1 Programové řešení řízení teploty

Jedná se o hlavní část programu, která má na starosti řízení výkonu topného elementu (ploténky) na základě vstupů z teplotního čidla. Řízení teploty probíhá spojitě za využití PID regulačního algoritmu. Implementovaný PID algoritmus vychází z obecné rovnice pro PID regulátor. Dále pak vychází z [44], kde jsou řešeny hlavně prvky pro zvýšení robustnosti regulace. Jedná se zejména o odstranění tzv. integrálního windupu. Dochází k němu, když výstup regulátoru přesáhne možnosti aktuátoru působícího na soustavu (zde topné těleso, kdy nelze již zvyšovat topný výkon). Výstup regulátoru se dostane do saturace a nemusí pak reagovat na změnu vstupu regulátoru [4]. Tomu je zamezeno limitováním výstupu regulátoru v daném rozsahu (délka sepnutí může být pouze 0 s až 4 s).

Průměrný výkon topného elementu je regulován pomocí změny duty cycle, jak již bylo zmíněno v části 4.2.4, přičemž je dobré připomenout že regulátor ovládá právě dobu zapnutí topného tělesa. Délka spínacího cyklu byla zvolena na pevnou dobu 4 s. Přepočítání výstupu regulátoru je prováděno v pravidelných intervalech, které zajišťuje přerušení od časovače mikrokontroléru timer1, kdy je změřena teplota, přepočítán výstup regulátoru na základě zadané teploty. Činnost regulátoru je ilustrována na obrázku 6.1.



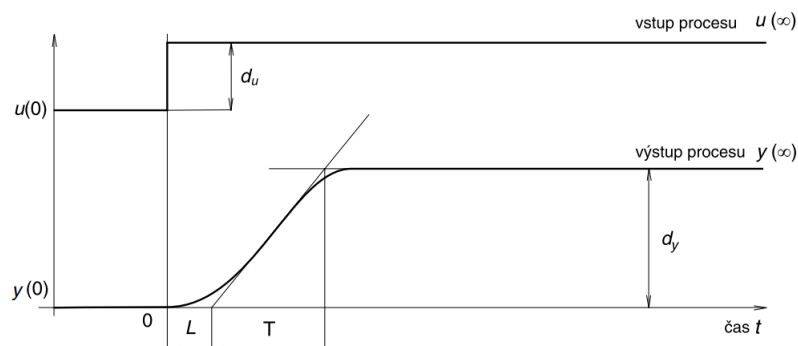
Obrázek 6.1: Ilustrace činnosti regulátoru

Kapitola 7

Měření

Tato kapitola se zaměřuje především na ověření funkce regulace teploty v rmutovací kádi a dále na postup nastavení PID regulátoru, který má regulaci na starost. Pro nastavení regulátoru byla zvolena nižší cukrotvorná teplota (60 °C). Měření na této teplotě bylo zvoleno z důvodu vysoké časové náročnosti kompletního procesu rmutování a to hlavně vzhledem k dostupným časovým možnostem. Po optimálním nastavení konstant regulátoru je pak pro úplnost měření nutné ověřit regulaci i na vyšší cukrotvorné teplotě (70 °C) a na odrmutovací teplotě (80 °C).

Cílem tohoto měření tedy byla teplota 60 °C a její udržení v blízkosti této hodnoty po dobu přibližně 20 minut (typická technologická prodleva, která se však může lišit v závislosti na konkrétním receptu se pohybuje mezi 10 a 20 minutami). Posledním požadavkem pak bylo udržet rychlost ohřívání v mezích od 0,7 °C.min⁻¹ do 1,5 °C.min⁻¹. Je také dobré poznamenat, že rozlišení teplotního čidla bylo nastaveno na 0,5 °C, po celou dobu bylo zapnuté míchadlo nádoby a objem ohřívané tekutiny byl 2 l. Aby bylo možné dosáhnout výše zmíněného, bylo nutné správně nastavit regulační konstanty. Existuje celá řada metod pro zjištění těchto konstant ať už se jedná o identifikaci soustavy a následné ladění modelu či o empirické metody jako je například známá Ziegler-Nicholsova metoda.



Obrázek 7.1: Tříparametrový model soustavy s konstantami

7.1 Nastavení regulátoru pomocí empirických metod

Pro nastavení regulátoru jsem se rozhodl nejprve vydat cestou empirických metod. Konkrétně jsem vycházel z metod popsaných v článku [5]. Všechny tyto metody vycházejí z tzv. tříparametrového modelu, kdy jsou graficky zjištěny časové konstanty z odezvy soustavy na jednotkový skok. Jedná se o zesílení ($K_p = \frac{d_y}{d_u}$, kde d_u je signál aplikovaný na soustavu a d_y je odezva soustavy), dopravní zpoždění L a časovou konstantu P . Konkrétní naměřená odezva je pak uvedena v příloze A. Zjištěné konstanty byly zadány do vzorců uvedených v [5]. Výsledek se pro různé způsoby výpočtů mírně lišil, v zásadě ale vždy vycházela konstanta K_p v řádu 0,01 až 1,0; konstanta K_i vycházela téměř vždy 0; konstanta K_d naopak vycházela v řádech několika 100 až 1000.

Získané konstanty jsem zadal do regulačního algoritmu. I přes opakovaná měření však bylo velmi brzy jasné, že takovéto nastavení regulátoru nebude v praxi použitelné jelikož rychlost zahřívání byla velmi nízká, proto byla tato měření záhy přerušena. Při dalším nastavování regulátoru jsem se proto rozhodl vydat cestou experimentálního ručního ladění na základě změřených průběhů regulátoru.

7.2 Nastavení regulátoru pomocí experimentálního ručního ladění

Při experimentálním nastavování konstant jsem jednak vycházel z teoretických předpokladů chování odezvy systému na změnu jednotlivých konstant regulátoru (tabulka 7.1) a dále pak z poznatků učiněných při předchozích experimentech s konkrétním systémem a to zejména:

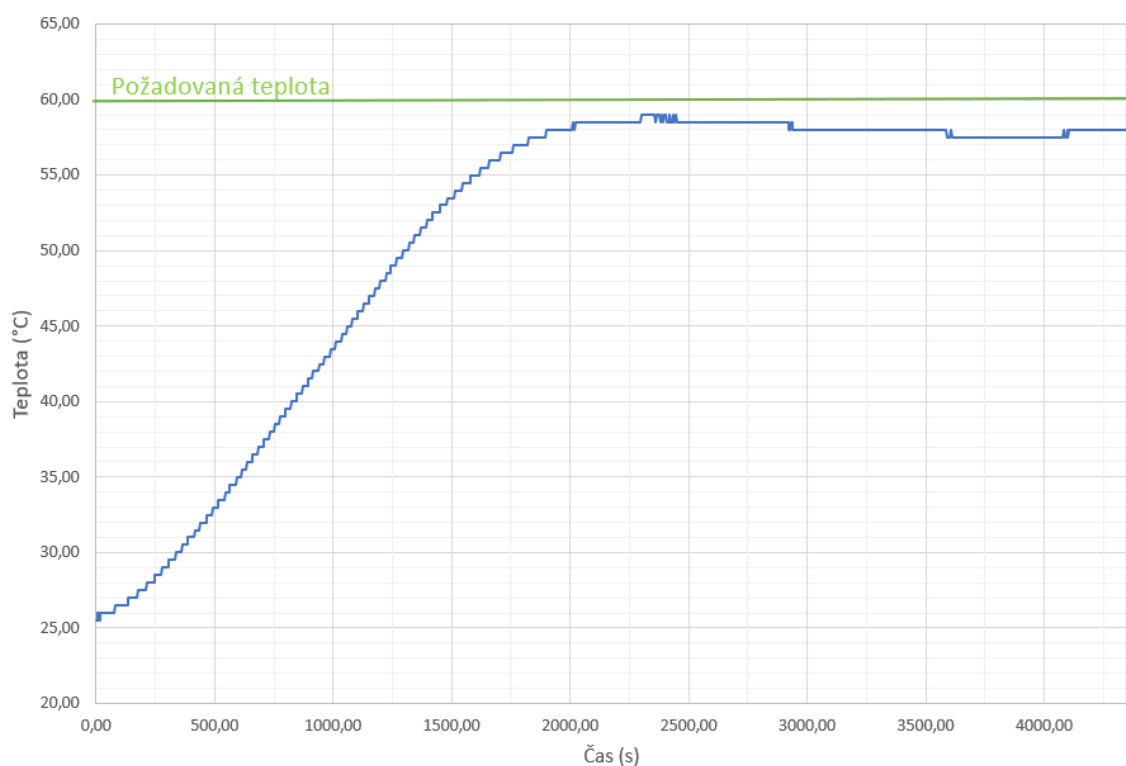
- **Setrvačnost soustavy** - litinová ploténka společně s nádobou a tekutinou uvnitř má poměrně vysokou setrvačnost a to zejména po vypnutí topné spirály uvnitř ploténky (přibližně 15 minut), toto je způsobeno mimo jiné konstrukcí ploténky, kdy je litinové těleso, které je v kontaktu s nádobou nahříváno zespodu topnou spirálou
- **Vliv integrační konstanty** - i malá změna této konstanty má velmi silný vliv na chování soustavy, při jejím nastavování bylo tedy nutné postupovat obezřetně
- **Vliv derivační konstanty** - vysoké hodnoty této konstanty vedly na přílišné zpomalení ohřevu

Nejprve jsem všechny členy kromě K_p nastavil na 0, byly tedy vyřazeny a nepřispívaly k výstupu regulátoru, K_p byla pak prvotně nastavena na 100.

Tabulka 7.1 : Teoretické předpoklady chování odezvy systému (převzato z [45])

Parametr	Doba náběhu	Překmit	Doba ustálení	Chyba v ustáleném stavu
K_p	Klesá	Roste	Mírná změna	Klesá
K_i	Klesá	Roste	Roste	Významně klesá
K_d	Mírná změna	Klesá	Klesá	Mírná změna

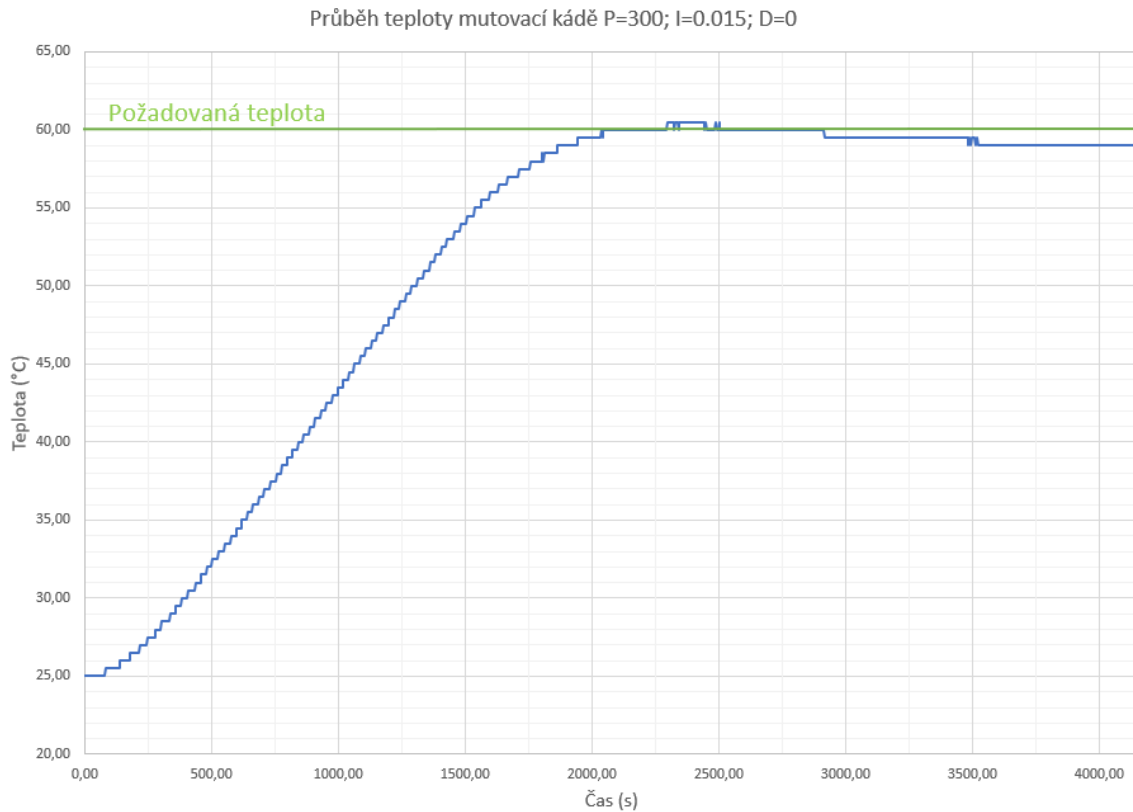
To se při následném měření ukázalo jako příliš nízká hodnota, jelikož teplota stoupala k dané nastavené úrovni příliš pomalu. Při další iteraci byla tato konstanta nastavena na 300, což již oproti předchozím pokusům přineslo solidní výsledky, výstup tohoto měření je na obrázku 7.2.

Průběh teploty mutovací kádě $P=300$; $I=0$; $D=0$ **Obrázek 7.2:** Výstup měření ($K_p = 300$; $K_i=0$; $K_d=0$)

Ve 20 minutovém intervalu ve kterém by tekutina byla při rmutovacím procesu na této teplotě udržována (uvažujeme začátek přibližně na 2000 s a konec v 3200 s) se chyba v rozmezí 1,5 °C až 2,5 °C. Rychlost průběhu pak byla 1,32 °C.min⁻¹, což splňuje požadavky na rychlost ohřevu. Z průběhu je také dobře patrná chyba v ustáleném stavu, kterou se P regulátor vyznačuje.

Pro zmenšení chyby jsem se poté přistoupil na nastavení integrační složky, jak již bylo dříve zmíněno, tato složka významně ovlivňuje chování celého systému. Přes několik iterací tak byla nakonec nastavena na hodnotu 0,015. Při tomto nastavení regulátor udržuje požadovanou hodnotu velmi dobře

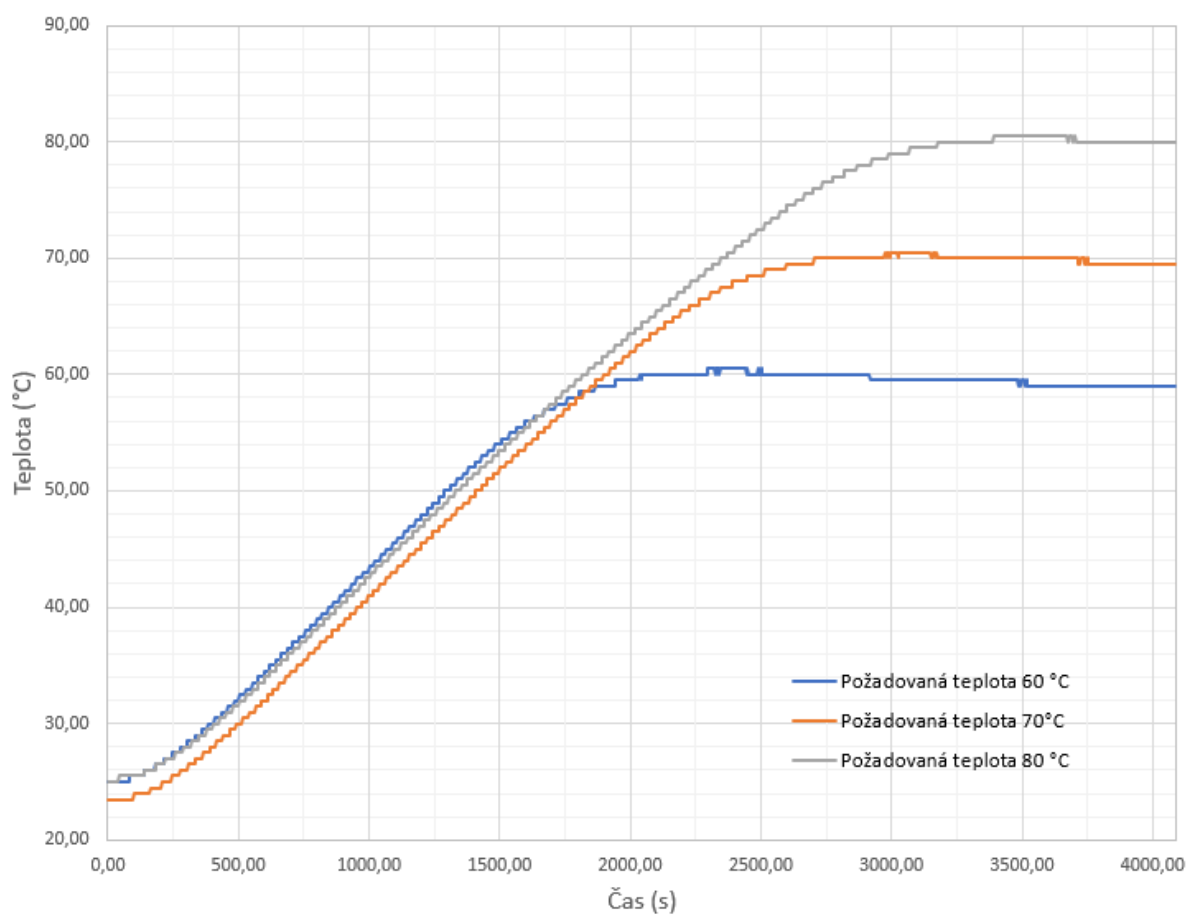
(obrázek 7.3). Ve 20 minutovém intervalu (opět od cca 2000 s do 3200 s) nebyla odchylka větší než $0,5\text{ °C}$. Rychlost ohřívání v nejstrmější lineární části byla $1,32\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$. Průběh taktéž splňuje dané předpoklady pro rychlost ohřevu.



Obrázek 7.3: Výstup měření ($K_p = 300$; $K_i=0,015$; $K_d=0$)

Finálním výstupem měření je tedy PI regulátor (derivační konstanta je 0) s hodnotami $K_p = 300$ a $K_i=0,015$. Aby bylo měření kompletní, byla se získaným nastavením ověřena regulaci i na vyšší cukrotvorné teplotě a na odmutovací teplotě. Všechny průběhy dosáhly jak rychlosti ohřevu v mezích od $0,7\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$ do $1,5\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$, tak i odchylky maximálně $0,5\text{ °C}$ v 20 minutovém intervalu od dosažení požadované teploty. Průběhy všech teplot jsou vyneseny v obrázku 7.4.

Průběhy jednotlivých měření na důležitých teplotách



Obrázek 7.4: Výstup měření ($K_p = 300$; $K_i=0,015$; $K_d=0$)

Kapitola 8

Závěr

V práci byl nejprve popsán kompletní postup výroby piva se všemi výrobními kroky. Dále pak byl detailněji popsán rmutovací proces, na který se tato práce zaměřuje. Byla také zmapována typická topologie výrobního zařízení v praxi spolu typicky používanými senzory a akčními členy. Dále byly určeny vstupní a výstupní parametry procesu.

Na základě získaných poznatků byl sestaven blokový návrh modelového systému napodobující průmyslové zařízení pro rmutovací proces společně s vhodným sensorovým vybavením a způsobem regulace. Následuje kompletní popis procesu konstrukce modelového zařízení včetně fotografií.

Důležitou součástí práce je i naměření dosažených vlastností modelu, konkrétně se jedná o ohřev tekutiny v rmutovací kádi. Nejprve byl podrobně zmapován průběh nastavení konstant PID regulátoru. Po získání optimálních hodnot byla pak prověřena regulace na třech důležitých technologických teplotách (60 °C, 70 °C a 80 °C). Konečné nastavení regulátoru (jehož výsledkem nebyl plný PID regulátor, ale pouze PI regulátor) přineslo velmi dobré výsledky, kdy odchylka teploty od požadované hodnoty nepřesáhla 0,5 °C ve stanoveném intervalu 20 minut po dosažení požadované teploty, což je typická délka technologické prodlevy po kterou se teplota udržuje. Provedené nastavení regulátoru tedy nastavenou teplotu udržuje velmi dobře.

Na základě měření a dalších postřehů shromážděných během návrhu a stavby modelu byla navržena některá vylepšení. Předně se jedná o optimalizaci a zvýšení robustnosti řídicího algoritmu. Pro zvýšení uživatelského komfortu a intuitivnosti ovládání by bylo výhodné místo alfanumerického LCD displeje a klávesnice využít grafický dotykový displej. Využití takového displeje, se kterým by bylo možné komunikovat např. pomocí sériové linky by také omezilo nutný počet připojovacích vodičů a obsazených portů mikrokontroléru. Dále by také bylo výhodné zavést kontrolu otevření ventilů či chodu motorů čerpadla a míchadel, toho by šlo v případě ventilů docílit například s využitím proudového senzoru, který by tuto informaci předával mikrokontroléru. V případě motorů by bylo možné monitorovat otáčky např. pomocí Hallova senzoru. Posledním navrhovaným vylepšením by pak bylo umístění všech

elektronických komponent na dedikovanou společnou desku plošných spojů.

Navržený systém však celkově obstojně dostal požadavkům kladeným v zadání.



Literatura

- [1] NOVOTNÝ, Petr. Pivařka: průvodce domácího sládky. Brno: Jota, 2019. ISBN 978-80-7565-555-4.
- [2] CHLÁDEK, Ladislav. Pivovarnictví. Grada, 2007. ISBN 978-80-247-6623-2.
- [3] BASAŘOVÁ, Gabriela, Jan ŠAVEL, Petr BASAŘ a Tomáš LEJSEK. Pivovarství: teorie a praxe výroby piva. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010. ISBN 978-80-7080-734-7.
- [4] ÅSTRÖM, Karl a Richard MURRAY. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Second edition. New Jersey: Princeton University Press, 2021. ISBN 9780691193984.
- [5] KLÁN, Petr. Moderní metody nastavení PID regulátorů. Automa [online]. 2000(9), 54-57 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: https://valter.byl.cz/sites/default/files/soubory/moderni_nastav_pid.pdf
- [6] NOVOTNÝ, Petr. Termodynamika pro pivovarníky 101: Teorie a praxe ohřevu díla [online]. 8.ledna 2019 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <http://www.diversity.beer/2019/01/termodynamika-pro-pivovarniky-101.html>
- [7] BLAŽKOVÁ, Sára. Rozdělení domácích elektrických spotřebičů. Slideplayer [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2311365/>
- [8] GUMS, Jason. Types of Temperature Sensors. Digikey Electronics [online]. [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/blog/types-of-temperature-sensors>
- [9] LACANETTE, K. Thermal Management Handbook. Maxim Integrated [online]. [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/thermal-management-handbook.pdf>

- [10] Katalogový list - teplotní senzor DS18B20 [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>
- [11] KALYANARAMAN, Deepa. Industrial flow meters/flow transmitters. Texas Instruments [online]. 2012 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/slyt471/slyt471.pdf?ts=1680869159210&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [12] What are Turbine Flow Meters?. OMEGA [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/resources/turbine-flow-meter>
- [13] Průtokoměr YF-S201. GM Electronic [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1482921/prutokomer-1-30-l-min>
- [14] 7 Main Types of Level Sensing Methods - How do they differ?. SST sensing [online]. 27 July 2017 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://sstsensing.com/7-main-types-of-level-sensors/>
- [15] How HC-SR04 Ultrasonic Sensor Works & Interface It With Arduino. Last Minute Engineers [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/arduino-sr04-ultrasonic-sensor-tutorial/>
- [16] Food grade pumps for brewing & beverages. Packo pumps [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.packopumps.com/en/industries/food-grade-pumps-for-brewing-and-beverages>
- [17] Food pumps: Stainless steel centrifugal and volumetric pumps for the food industry [online]. Packo Pumps [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.packopumps.com/packopumps/pdf-bestanden/sectoren—brochures/food-brochure/packo-food-brochure-ipad-en.pdf>
- [18] Objemová čerpadla. ELUC - Elektronická učebnice [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1925>
- [19] Useful information on positive displacement pumps. Michael Smith Engineers [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/positive-displacement-pumps>
- [20] R385 čerpadlo 6-12VDC. GM Electronic [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1498013/r385-cerpadlo-6-12vdc-1-3l-min>
- [21] Valves For Food And Beverage. SIO Valve [online]. 22.08.2022 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://en.siovalve.com/valves-for-food-and-beverage/>
- [22] What are solenoid valves?. BOLA Systems [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.bolasystems.com/help-advice/what-are-solenoid-valves>

- [23] Elektromagnetický ventil 1/2"12V. GM Electronic [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1483016/elektromagneticky-ventil-1-2-12v-nc-mosaz>
- [24] AC Motor Speed Control: An overview. GlobalSpec [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.globalspec.com/pfdetail/motors/ac-motor-speed-control>
- [25] Motor JGA25-370 12V s převodovkou. LaskaKit [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/motor-jga25-370-12v-s-prevodovkou-/>
- [26] Pulse Width Modulation. Science Direct [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pulse-width-modulation>
- [27] Katalogový list - mikroprocesor ATmega2560 [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>
- [28] Katalogový list - napájecí zdroj MEAN WELL LRS-100 [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.meanwell.com/Upload/PDF/LRS-100/LRS-100-SPEC.PDF>
- [29] Katalogový list - regulátor napětí LM2596 [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf?ts=1682074439040&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [30] Katalogový list - tranzistor IRF520PBF [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/91017/irf520.pdf>
- [31] Chladič DO1. GM Electronic [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1497983/do1-chladic>
- [32] Katalogový list - optočlen 4N25 [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>
- [33] Inductive Flyback and Flyback Diodes. DIGILENT [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://learn.digilentinc.com/Documents/390>
- [34] Katalogový list - triak BTA06 [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta06.pdf>
- [35] Parameter list for SCRs, Triacs, AC Switches, and Diacs. STMicroelectronics [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an2703-parameter-list-for-scrs-triacs-ac-switches-and-diacs-stmicroelectronics.pdf
- [36] Chladič V4330N. GM Electronic [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1500924/assmann-v4330n-chladic>

- [37] Katalogový list - MOC3041 [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/datasheet/2/149/MOC3041M-195885.pdf>
- [38] JAMES, Luke. What are snubber circuits and why are they used in power electronics?. Power & Beyond [online]. 12.03.2020 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.power-and-beyond.com/what-are-snubber-circuits-and-why-are-they-used-in-power-electronics-ae09be577424b3bd0ac859234bcb4cc3/>
- [39] Zero Voltage Switching (ZVS) Principle. Electrical Academia [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://electricalacademia.com/electronics/zero-voltage-switching-zvs-principle/>
- [40] DIY-Isolated High Quality Mains Voltage Zero Crossing Detector [online]. [cit. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://cdn.hackaday.io/files/1597066832861504/SimpleIsolatedZeroCrossDetector.pdf>
- [41] Katalogový list - L293D [online]. [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf>
- [42] Převodník I2C - displej. GM Electronic [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1508988/prevodnik-i2c-displej>
- [43] Modul čtečky micro SD karet. GM Electronic [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1508311/modul-ctecky-micro-sd-karet>
- [44] BEAUREGARD, Brett. Improving the Beginner's PID – Introduction. Project Blog [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>
- [45] ISDARYANI, Feni, Feriyonika FERİYONIKA a Raju FERDIANSYAH. Comparison of Ziegler-Nichols and Cohen Coon tuning method for magnetic levitation control system. Journal of Physics Conference Series [online]. 2020 [cit. 2023-05-23]. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1450/1/012033



Příloha A

**Konkrétní naměřená odezva na jednotkový
skok (tříparametrový model)**

