

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV FYZIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh a realizace řízení sedlového ventilu pomocí krokového motoru v OMNIPUMP zařízení pro zajištění regulace průtoku v PEF (Pulsed Electric Field) zařízení

Design and implementation of the seat valve control by a stepper motor in an OMNI-PUMP device to provide flow control in a PEF (Pulsed Electric Field) device

STANISLAV TABOROVEC

Rok: 2021

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: RNDr. Zuzana Budinská, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Taborovec** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **467990**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav fyziky**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a realizace řízení sedlového ventilu pomocí krokového motoru v OMNIPUMP zařízení pro zajištění regulace průtoku v PEF (Pulsed Electric Field) zařízení

Název bakalářské práce anglicky:

Design and implementation of the seat valve control by a stepper motor in an OMNIPUMP device to provide flow control in a PEF (Pulsed Electric Field) device

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište systém PEF zařízení a jeho součásti.
- 2) Navrhněte vhodný krokový motor, jeho řízení, uchycení a algoritmus řízení průtoku.
- 3) Krokový motor implementujte do OMNIPUMP zařízení, změřte příslušné charakteristiky a vyhodnoťte vhodnost zvoleného řešení.

Seznam doporučené literatury:

P. Zeuthen ,L. Bøgh-Sørensen : Food Preservation Techniques, Woodhead Publishing 2003
C. Batt , C. A. Batt: Encyclopedia of Food Microbiology, Academic Press 2014
J.Raso, S.Condón, I.Álvarez: Non Thermal Proccesing – Pulsed Electric Field, nyclopedia of Food Microbiology (Second Edition), Academic Press, 2014,Pages 966-973, ISBN 9780123847331,

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

RNDr. Zuzana Budinská, Ph.D., ústav fyziky FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **31.03.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: _____

RNDr. Zuzana Budinská, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Petr Vlčák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci "Návrh a realizace řízení sedlového ventilu pomocí krokového motoru v OMNIPUMP zařízení pro zajištění regulace průtoku v PEF (Pulsed Electric Field) zařízení" napsal samostatně a veškerá použitá literatura je uvedena na konci práce.

V Praze dne

Podpis:

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucí práce RNDr. Zuzaně Budinské, Ph.D. za její ochotu, věnovaný čas, trpělivost a pomoc, kterou mi poskytla při vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1 Úvod	8
2 Teoretická část	9
2.1 PEF technologie	9
2.2 Krokové motory	13
2.2.1 Krokové motory s variabilní reluktancí	14
2.2.2 Krokové motory s permanentním magnetem	15
2.2.3 Hybridní krokové motory	15
2.3 Řízení krokového motoru	17
2.3.1 Ovládaní pomocí driverů krokových motorů	18
2.4 Bezkontaktní měření průtoku	19
2.5 Analogo-digitální převodníky	20
3 Technická realizace	21
3.1 Požadavky a analýza	21
3.2 Volba driveru řízení	22
3.2.1 Pohyb a kontrola motoru	22
3.2.2 UART rozhraní a mapa registrů	23
3.2.3 Ochrana Driveru a EME Circuitry	23
3.3 Volba krokového motoru	24
3.4 Volba průtokoměru	25
3.5 Mechanická část realizace	26
3.5.1 Návrh a výroba kluzné spojky	26
3.5.2 Návrh a výroba pouzdra motoru a ventilu	26
3.6 Elektrická část realizace	27
3.6.1 Volba uložení PCB	27
3.6.2 Elektrické schéma zapojení	29
3.6.3 Realizace zapojení	30
3.7 Návrh algoritmu	31
4 Ostrý provoz	34
4.1 Komunikace s VCU, přehled výpisu na terminal	34
4.1.1 Výpis registru driveru	34
4.1.2 Výpis SG_RESULT	35
4.1.3 Výpis ADC	35
4.2 Nastavení koncových dorazů	37
4.3 Seřízení průtokoměru	38
4.4 Hystereze	40
4.5 Nastavení parametrů δ , t , n	41
4.5.1 Analýza časového zdržení	42

4.5.2	Analýza kroku zpět	43
4.5.3	Analýza parametru δ	43
4.5.4	Volba optimálních parametrů	44
5	Shrnutí a závěr	45
5.1	Diskuze	45
5.2	Závěr	45
6	Přílohy	47
7	Seznam obrázků	63
8	Seznam tabulek	66
9	Seznam použité literatury	66

Anotační list

Jméno autora:	Stanislav Taborovec
Název:	Návrh a realizace řízení sedlového ventilu pomocí krokového motoru v OMNIPUMP zařízení pro zajištění regulace průtoku v PEF (Pulsed Electric Field) zařízení
Anglický název:	Design and implementation of the seat valve control by a stepper motor in an OMNIPUMP device to provide flow control in a PEF (Pulsed Electric Field) device
Rok:	2021
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor:	Bez oboru
Zadávací ústav:	Ústav Fyziky
Vedoucí práce:	RNDr. Zuzana Budinská, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 69 Počet obrázků: 42 Počet tabulek: 8 Počet příloh: 9
Klíčová slova:	PEF, Pulsující elektrické pole, řízení průtoku, automatizace řízení, krokové motory, bezkontaktní měření průtoku, OMNIPEF, OMNIPUMP
Keywords:	PEF, Pulsed electric field, flow control, control automation, step motor, contactless flow measurement, OMNIPEF, OMNIPUMP
Anotace:	Tato bakalářská práce stručně popisuje metodu ošetření látek metodou elektrického pole a seznamuje s laboratorním zařízením OMNIPEF, vyvinutého pro výzkumné účely. Dále se rozebírá technologie krokových motorů a možnosti bezkontaktního měření průtoku. Práce se podrobněji zabývá technickým návrhem a realizací systému schopného řídit průtok v komoře výše zmíněného systému OMNIPEF. V závěru práce je popsána kalibrace systému a provedeny měření pro stanovení optimálních hodnot regulace.
Abstract:	This bachelor thesis briefly describes the treatment method of substance by pulsed electric field and introduces the laboratory machine developed for research purposes - OMNIPEF. Furthermore, the technology of stepper motors and the non-contact flow measurement are discussed. The thesis describes the technical design and implementation of a system capable of controlling the flow in the chamber in the OMNIPEF system. Finally, the calibration of the system is described and measurements are performed to determine the optimal values of regulation.

Seznam použitých značek

Symbol	Rozměr	Popis
α	-	počet ekvivalentních pólů
N_{ph}	-	počet ekvivalentních pólů statoru
P_h	-	počet fází
N	-	celkový počet fází
t_{up}	s	čas mezi snímačem P_{up} a P_{dn}
t_{dn}	s	čas mezi snímačem P_{dn} a P_{up}
Δt	s	časový rozdíl t_{up} a t_{dn}
\tilde{c}	ms^{-1}	rychlost zvuku
\tilde{v}	ms^{-1}	rychlost kapaliny
L	m	vzdálenost, délka potrubí
\dot{V}	m^3s^{-1}	průtok
I_{phase}	A	proud fází
I_{phaseM}	A	maximální proud fází krokového motoru
U_M	V	Napětí na motoru
M_{max}	$\text{N}\cdot\text{m}$	kroučící moment
δ	m^3s^{-1}	hodnota rozdílu požadovaného a skutečného průtoku
\dot{V}_{set}	m^3s^{-1}	Nastavená hodnota průtoku
\dot{V}_{get}	m^3s^{-1}	Skutečná hodnota průtoku
\dot{V}_{ADC}	m^3s^{-1}	Měřená hodnota průtoku na ADC
n	-	krok krokového motoru
SGR	-	Hodnota SG Result, zatížení krokového motoru
U_{ADC}	mV	Napětí měření na ADC

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
PEF	Pulsed Electric Field
MCU	Main Control Unit
VCU	VITAVE Control Unit
DIT	Direction
EN	Enable
ADC	Analogový Digitální převodník
DAC	Digitální Analogový převodník
GND	Ground
PCB	Printed Circuit Board
HMI	Human Mashine Interface
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter

Úvod

Ošetření potravin metodou pulzujícího elektrického pole je novodobým trendem v potravinářství. Výhodou oproti konzervativním způsobům ošetření potravin je především vyloučení termického ohřátí produktu a také zachování velkého počtu vitamínů a minerálů. Pro účely vědeckého zkoumání byl vyvinut systém OMNIPEF, který představuje kompaktní zařízení schopné v komoře vytvořit elektrické pole o intenzitě 33 kV/cm. Díky tomuto zařízení bude umožněn rychlejší vývoj a výzkum ošetření metodou PEF.

Vedle systému OMNIPEF byl vyvinut systém OMNIPUMP, který představuje pomocnou jednotku k celému systému zajišťující dopravu kapalin do průtokové komory v OMNIPEFu. Disponuje nádobou na kapaliny, řídicí elektronikou, kompresorem a řadou přetlakových ventilů. V neposlední řadě má systém automatického řízení průtoku pro zajištění přesné regulace průtoku výbojovou komorou.

Cílem této práce je navržení systému pro řízení průtoku systému OMNIPUMP a jeho implementace do provozu.

V první části uvedu bližší popis OMNIPEF a OMNIPUMP spolu s ukázkami hotového produktu. Dále popíšu princip funkce a řízení krokových motorů a také bezkontaktních ultrazvukových snímačů průtoku.

Ve druhé části na základě sestavených požadavků k funkci systému provedu výběr řídicích prvků, elektronických součástí a mechanických součástí. Uvedu řešení pro jejich upevnění do konstrukce OMNIPUMP. Provedu také návrh algoritmu řízení.

Ve třetí části se zaměřím na zprovoznění celého systému řízení OMNIPUMP, kde nejprve budu seřizovat průtokoměr pro napěťový výstup a dále budu nastavovat parametry registrů řízení krokového motoru. V poslední části se zaměřím na zkoumání vlivu proměnných parametrů algoritmu řízení na stabilitu a přesnost řízení.

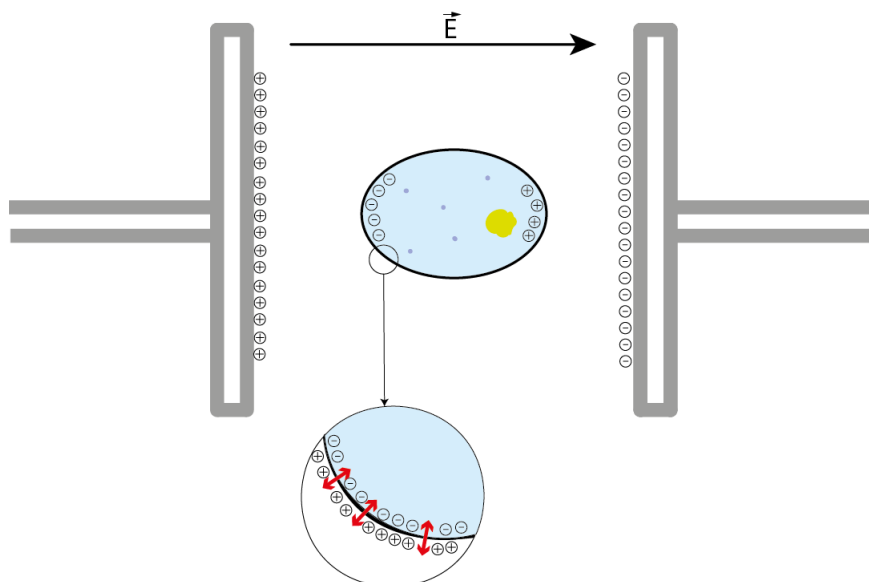
Teoretická část

2.1 PEF technologie

Moderní technologie potravin se zabývá vývojem nových nekonvenčních metod zpracování, jako je například vysokoteplotní krátkodobý ohřev, vakuové vaření, případně vaření za vysokého tlaku. Tento vývoj klade důraz zejména na konzervaci potravin při maximálním zachování živin a celkové kvality potravin. Čím dál je modernější používání pojmů jako jsou: "minimální zpracování", "Raw", aj.

Byla získána široká škála technik bez tepelného zpracování, jako jsou například ošetření zářením (UV, IR), vysokým tlakem (HHP - High Hydrostatic Pressure), ultrazvukem, nebo PEF. Popularita těchto technik v poslední době roste a tyto alternativy představují potenciální nástroj pro náhradu nebo nahrazení tradičních metod tepelného zpracování potravin. Netepelné procesy navíc nabízejí několik výhod oproti tepelnému zpracování, jako jsou nízké teploty zpracování, efektivní využití energie, zachování kvality, zachování barvy, vůně a chutě potravin. [1]

Technologie pulzujícího elektrického pole (PEF - Pulse Electric Field) je inovativní způsob úpravy produktu pomocí silného vysokonapětového elektrického pole, kdy se látka vystavuje po dobu několika mikro až milisekund elektrickému poli s intenzitou v rozmezí 10-80 kV/cm. Díky impulsu dojde k elektroporaci buňky, což je defacto narušení cytoplasmatické membrány. Toto narušení může být reverzibilní - buňka po nějaké době dokáže se zacelit, nebo ireverzibilní, kdy dojde k nenávratnému poškození buňky. Reverzibilní ošetření se uplatňuje v medicínské sféře, kde se provádějí pokusy s farmaceutkami pro lepší přenosy léčivých látek.



Obr. 2.1 Vizualizace elektroporace buňky mezi dvěma elektrodami v silném elektrickém poli.

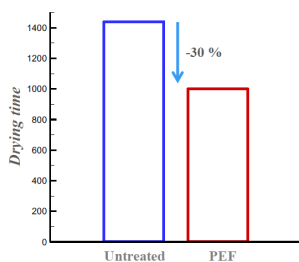
Ireversibilní narušení lze vysoce efektivně využívat při mikrobiologické inaktivaci, ale ukazuje se, že díky PEFování lze podstatně zlepšit přenos hmoty. Také se provádí výzkum v boji s rakovinou.

Kvalita ošetření je závislá na řadě parametrů. Lze je rozdělit do tří skupin a to:

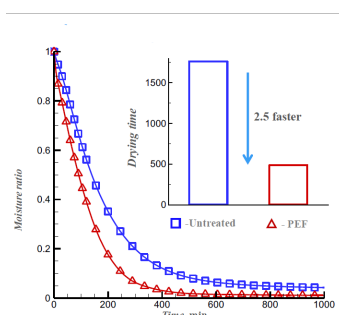
- Procesní parametry - které můžeme popsat jako vlastnosti impulzů a podmínky během ošetření, což je například intenzita elektrického pole, čas ošetření, teplota ošetření, tvar pulzu, frekvence pulzů.
- Charakteristika ošetřovaného produktu - je soubor fyzikálních/chemických parametrů ošetřované látky, jako jsou pH, chemické složení, elektrická vodivost.
- Mikrobiologické parametry - jedná se o takové parametry jako morfologie buňky, růstové schopnosti buněk, a obnovovací schopnosti.

PEF technologie, kromě inaktivace mikroorganismů, přináší i jinou nemalou výhodu oproti konzervativnímu způsobu ošetření. Zničíme-li totiž buněčné stěny, dokážeme při lisování ovoce do džusů z nich získat více šťávy. V závislosti na druhu ovoce se může jednat o 5% až 50% navýšení výtěžku. PEFovaný produkt se také dá lépe (rychleji) sušit, nebo hluboce mrazit. Díky tomu lze zrychlit proces až o 30% (v závislosti na produktu), zachová se pěkný vzhled, chuť i barva. Na Obr. 2.2 jsou zobrazeny výsledky s hlubokým zmrazováním PEFovaných jahod a vysušováním kusu manga [2]

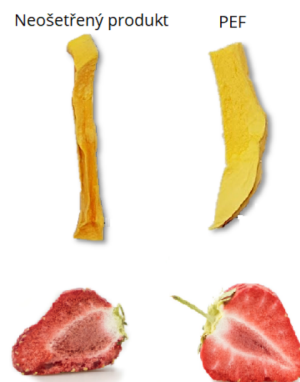
Freeze-drying



Obr. 2.2 Výsledky experimentu hlubokého zmrazování PEFovaného ovoce. [2]



Obr. 2.3 Porovnání doby sušení v závislosti na obsahu vody v ovoci při ošetření PEFem a bez ošetření. [2]



Obr. 2.4 Ukázka rozdílu při sušení neošetřeného a ošetřeného produktu [2]

Výsledkem "PEFovaného" produktu je denaturalizace proteinů, menší ztráta vitamínů, enzymů a chuti oproti konzervativním způsobům ošetření a to při nízké energetické spotřebě a vyšší účinnosti. Právě díky těmto vlastnostem získává PEF ošetření popularitu v potravinářském průmyslu, kde se již dnes setkáváme s PEFovanými džusy, nebo také hranolkami.

Firma VITAVE vyvinula laboratorní verzi PEF systému - "OMNIPEF" pro účely výzkumu a testování. Jedná se o modulární systém, který pokrývá velkou škálu použití. Hlavní část systému obsahuje komoru, do které se umístí uje produkt a nachází se zde veškerá elektronika pro zajištění vysokonapěťových impulsů. Podle druhu komor dělíme PEF systém na "Batch"- stárou, a "Continuous"- průtokovou variantu. Na Obr. 2.5 je zobrazen systém OMNIPEF s Batch komorou.

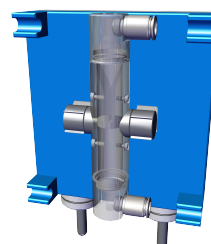


Obr. 2.5 Laboratorní systém OMNIPEF ve verzi s Batch komorou [3]

Na Obr. 2.6 jsou zobrazeny dvě komory pro Batch a pro Continuous variantu. Konstrukce je navržena tak, že tyto dvě komory lze snadno zaměnit v jednom zařízení, viz Obr.2.8. Pohyblivá katoda v Batch komoře umožňuje regulovat vzdálenost elektrod mezi sebou a tím i velikost elektrického pole.

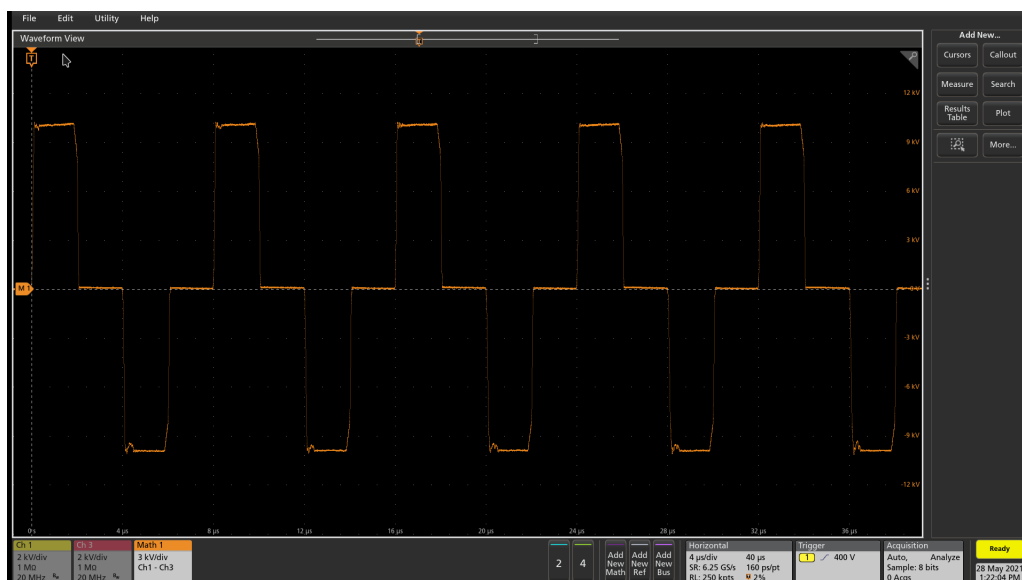


Obr. 2.6 Batch komora, přizpůsobená pro ošetření tuhých produktů. [3]



Obr. 2.7 Průtoková komora pro ošetření kapalných produktů. Elektrody jsou pevné ve vzdálenosti 3 mm. [3]

Při nastavení průtokové komory je nutné k OMNIPEF připojit systém OMNIPUMP, což jak z názvu plyne, je systém zajišťující průtok kapalin skrz komoru.



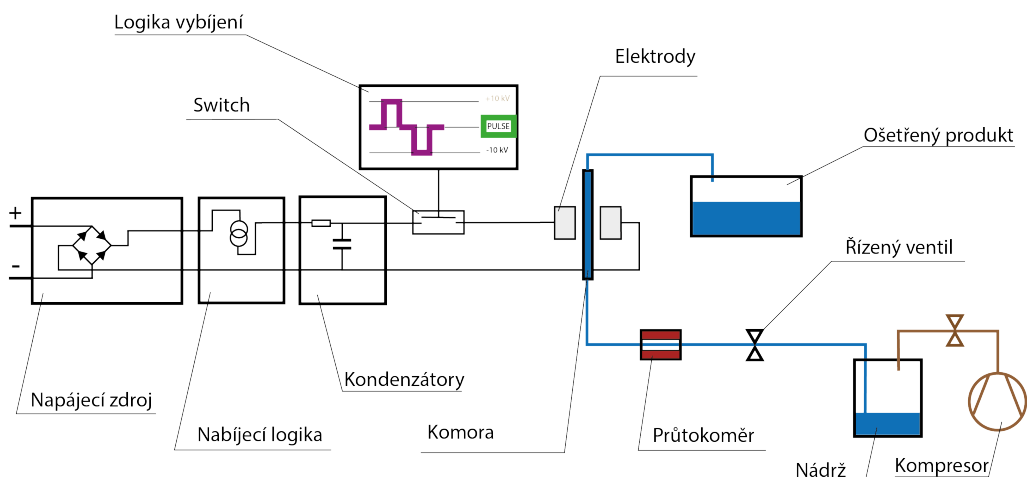
Obr. 2.9 Ukázka bipolárních impulsů ± 10 kV



Obr. 2.8 OMNIPEF s průtokovou komorou s připojeným modulem OMNIPUMP [3]

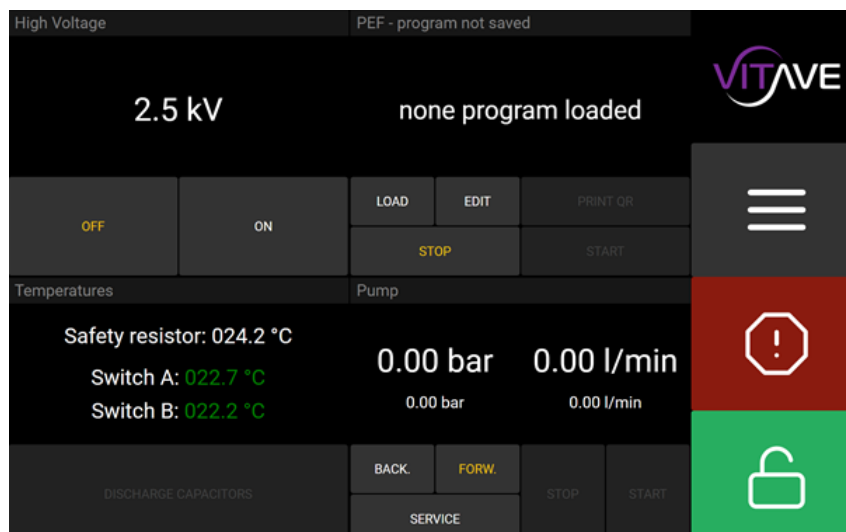
Celý proces PEF je zjednodušeně zobrazen na Obr. 2.10, který popisuje princip průtokové verze PEF systému "OMNIPEF", zobrazeného na Obr. 2.8. Elektrická část je složena z napájecího zdroje a zajišťuje nabíjení kondenzátorů přes nabíjecí logiku. Dále pak dle požadavků je nastavena logika vybíjení, která se realizuje pomocí tzv. Switche, neboli zařízení využívající MOSFETY na spínání obvodu. Vnitřní MCU (Main Control Unit - Hlavní řídicí jednotka) řídí proces spínání Switche, kterým se následně vybíjejí kondenzátory na elektrodách.

V mechanické části se naplní nádrž s produktem a následně se natlakuje. Poté si uživatel nastaví požadovaný průtok ošetřovaného produktu komorou a MCU začne snímat aktuální průtok na průtokoměru a řídit ventil pro nastavení požadovaného průtoku. [1]



Obr. 2.10 Schématické zobrazení OMNIPEF zařízení v průtokové variantě.

Pro opakovatelnost a konzistenci výsledků, je nutné dodržet konstantní počet impulzů objemem produktu. Počet impulzů lze regulovat jak frekvencí výbojů, tak i regulací průtoku.



Obr. 2.11 Ukázka HMI systému OMNIPEF. Horní panel dovoluje nastavit hodnoty napětí a parametry impulsu. Dole vpravo se nastavuje tlak a požadovaný průtok. Dolní levá část slouží pro kontrolu teploty elektroniky.

2.2 Krokové motory

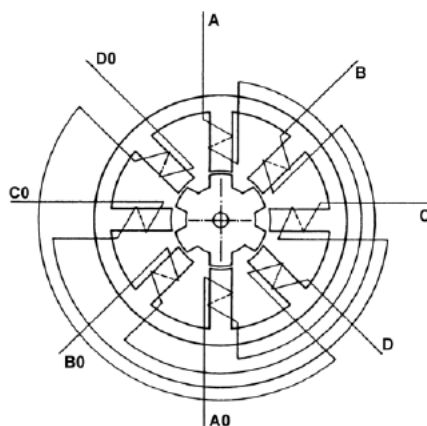
Krokový motor je elektromechanické stejnosměrné zařízení, které převádí řídicí signál na uhlový pohyb rotoru do určité pozice s následnou fixací statického momentu v dané poloze. Rotace je prováděná po tzv. krocích, jejíž velikost je v první řadě dána konstrukčním řešením motoru a poté způsobem řízení [4]. Nejčastěji lze potkat krokové motory s krokem 15°, 7,5°, 1,8° (200kroků na jednu otáčku rotoru) nebo 0,9° (400 kroků na jednu otáčku rotoru) Krokové motory lze rozdělit na tři základní druhy. Nejčastěji jsou řízeny pomocí mikroprocesorů, který

vysílá přesné impulzy, díky čemuž lze dosáhnout většího rozlišení.[5] Díky řízení mikroprocesory lze také efektivně užívat zpětnovazební zapojení pro zvětšení rozlišení kroků. Krokové motory lze rozdělit do tří velkých skupin:

1. Krokové motory s variabilní reluktancí
2. Krokové motory s permanentním magnetem
3. Hybridní krokové motory

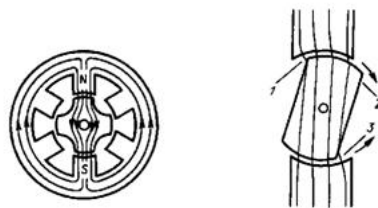
2.2.1 Krokové motory s variabilní reluktancí

Zjednodušený řez krokového motoru s variabilní reluktancí je zobrazen na Obr. 2.12. Jedná se o nejčastěji používaný druh motoru, který je tvořen statorem o určitém počtu pólů na nichž jsou navinuté cívky a pasivním rotorem. Na Obr. 2.12 je představen krokový motor s 8pólovým statorem. Cívky na protilehlých stranách jsou spojené a představují fázi, tj. daný krokový motor je 4fázový (A je spojeno s A0, B s B0 atd.). Každá fáze představuje jednotlivý vstup krokového motoru. Rotor je v daném případě 6 pólový a je bez vinutí.



Obr. 2.12 Řez čtyř fázového krokového motoru s pasivním rotorem. Převzato z [6]

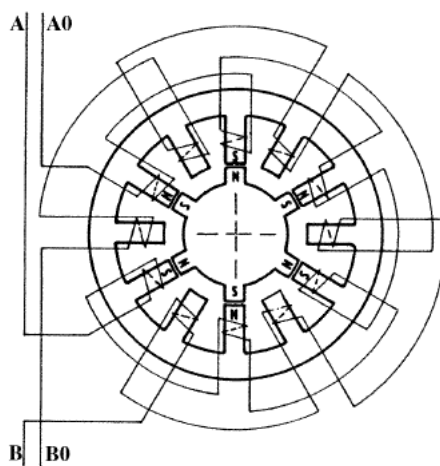
Rotace krokového motoru je realizovaná buzením jedné z fází. Jakmile fáze začne protékat proud, vytvoří se mezi protilehlými cívky magnetické pole. V daném poli se rotor snaží zaujmout magneticky klidovou polohu, tj. polohu, kde statický úhel zátěže je roven nule.[4] Následně se pošle signál na druhou fázi, první fáze se vypne a rotor zaujme další klidovou polohu příslušnou druhé fázi.



Obr. 2.13 Schematické zobrazení magnetického pole uvnitř krokového motoru. Převzato z [4]

2.2.2 Krokové motory s permanentním magnetem

U těchto typů krokových motorů je rotor tvořen permanentním magnetem, kde se po obvodu střídají polariry. Rozlišujeme krokový motor s radiálně polarizovaným permanentním magnetem viz Obr.2.14 a krokový motor s axiálně polarizovaným permanentním magnetem.



Obr. 2.14 Krokový motor s permanentním magnetem. Převzato z [7]

V případě radiálně polarizovaného je statorové vinutí dvoufázové, tj. fáze na rotoru se střídají ob jedno vinutí a při spínání fází je potřeba měnit polaritu proudu. Výhodou těchto krokových motorů je nízká časová konstanta, proto mohou být použity při vyšších kmitočtech řízeného signálu, nicméně díky složitosti magnetického obvodu jsou dražší než motory s pasivním rotorem. [7]

2.2.3 Hybridní krokové motory

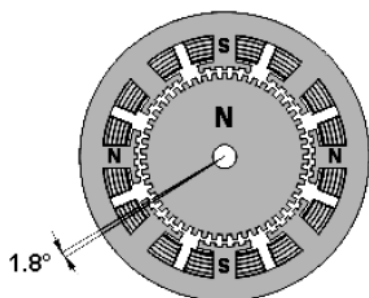
Hybridní krokové motory jsou o něco dražší než motory s permanentním magnetem, ale disponují menším krokem, větším statickým momentem a velkou rychlostí. Typický počet kroků na jednu otáčku pro hybridní krokový motor je od 100 do 400 (úhel kroku 3,6 - 0,9 °). Tím pádem, hybridní motory spojují v sobě výhody motorů s permanentním magnetem a motory variabilní reluktancí. [7] Rotorové nástavce po obvodu mají zuby, jejichž počet určuje velikost

kroku, a je rozdělen na dvě části, mezi kterými se nachází cylindrický permanentní magnet. Horní a dolní půlka je posunuta vůči sobě o polovinu zubové mezery. Počet pólů je roven počtu zubů na jedné z polovin. Na statoru se opět nachází dvoufázové pólové vinutí opatřené zuby, zajišťující větší počet ekvivalentních pólů, které se následně budí a vytváří točivé statorové magnetické pole, ve kterém se zuby rotoru natočí vždy do magnetický klidové polohy. Obecně se používají 4 hlavní póly pro 3,6°, nebo 8 pólů statoru pro 1,8°-0,9° motory.

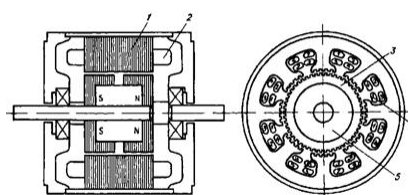
Vztah mezi počtem pólů rotoru, počtem ekvivalentních pólů statoru a úhlem kroku se stanoví jako

$$\alpha = \frac{360}{N_{ph} \cdot P_h} = \frac{360}{N}, \quad (2.1)$$

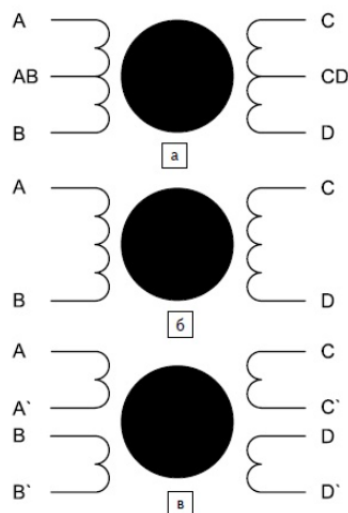
kde N_{ph} je počet ekvivalentních pólů statoru, P_h počet fází, N celkový počet pólů pro všechny fáze.[4] Buzení krokového motoru s axiálně polarizovaným magnetem musí být dvoufázové a výkonové prvky musí být schopny zajistit změnu směru magnetického toku v jednotlivých pólech statoru. To se zajišťuje buď bifliárním vinutím, pak jsou pro buzení použity klasické prvky a takovým motorům říkáme unipolární. Nebo se využije buzení pomocí můstkových zapojení a zachová se dvoufázové vinutí. Takovým motorům se následně říká bipolární.



(a) Hybridní krokový motor[7]



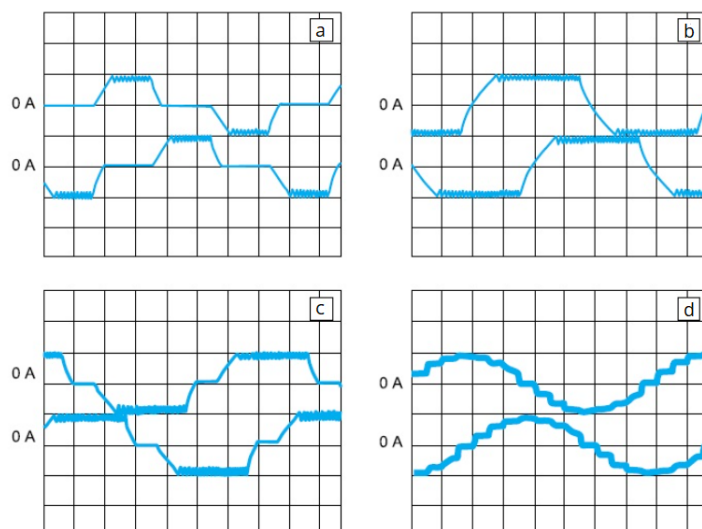
(b) Hybridní krokový motor [7]



Obr. 2.16 Zapojení cívek hybridního krokového motoru a) unipolární, b) bipolární, C) čtyřfázové

2.3 Řízení krokového motoru

Existuje několik možností ovládní krokového motoru. Na Obr.2.17 je představen průběh proudu ve vinutí pro dvoufázového hybridního krokového motoru, který je v dnešní době je velmi rozšířen.



Obr. 2.17 Ukázka řízení dvoufázového motoru [7]

Nejjednodušší možností je střídavé přepínání fází, které se nepřekrývají a zapíná se vždy jen jedna fáze. Jedná se o jednofázový vlnový nebo plně krokový režim řízení Obr. 2.17a. Rovnovážné polohy rotoru pro každý krok se shodují s „přirozenými“ rovnovážnými body rotoru u motoru bez napětí. Nevýhodou této metody řízení je, že pro bipolární motor je současně použito pouze 50 % vinutí a pro unipolární motor pouze 25 %. To znamená, že v tomto režimu

nelze získat plný možný točivý moment motoru.

Nejběžněji používané řízení je zobrazeno na Obr. 2.17 b, kde se obě fáze částečně překrývají, tj. jsou zapnuty současně. Při dané situaci, kdy jsou zapnuté obě fáze, se rotor umístí do mezi polohy jednotlivých fází. Tato metoda poskytuje stejný úhel kroku jako první, ale má větší kroutící moment. Je třeba brát v potaz nutný proud v obou fázích při zastavení, neboť vypne-li se jedna fáze, může se stator posunout o půl kroku.

Třetí hlavní způsob ovládání je kombinací dvou výše popsanych: jedná se o půlkrokový režim (Obr. 2.17c). V tomto režimu motor provede krok rovný polovině hlavního v jednom řídicím impulsu. Tento režim vyžaduje složitější implementaci řídicího obvodu, ale umožňuje přesnější umístění rotoru a snižuje negativní dopad mechanické rezonance rotoru. Jinými slovy, pomocí motoru s úhlovým stoupáním $1,8^\circ$ získáme stoupání $0,9^\circ$.

Ještě menší gradaci, respektive krokové dělení, zajišťují řídicí systémy mikrokrokování (Obr. 2.17 d), založené na postupné změně proudu ve vinutí. Pokud se předešlé tři způsoby nechaly řídit ručním přepínáním proudu v jednotlivých fázích, microstepping je velmi komplikovaný určit bez použití speciálních driverů.

2.3.1 Ovládání pomocí driverů krokových motorů

Ovladač krokového motoru, neboli driver, je elektronické zařízení, které na základě digitálních řídicích signálů řídí vinutí krokového motoru a umožňuje vykonávat kroky. Standardem v oblasti řízení motorů jsou signály STEP, DIR, ENABLE (EN). STEP je krokový signál, DIR je signál směru otáčení a EN je signál zapnutí driveru.

Signál STEP představuje jednotkový krokový signál. Jeden impuls vede k rotaci rotoru krokového motoru o jeden mikrokrok. Driver obvykle provede krok na rostoucí, nebo klesající hraně signálu. Moderní drivery dokáží zaznamenávat kroky s frekvencí 10 MHz.

Signál DIR je logický signál, který určuje směr rotace. Je-li na vstupu logická 1, otáčí se motor po směru hodinových ručiček, při logické 0, jedná se o opačný směr.

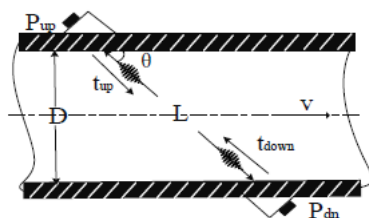
Signál ENABLE je signál zapnutí/vypnutí ovladače. Logika jeho práce je obvykle následující: Když se vstup EN se přivede 5 V (logická 1), budič driveru je vypnutý a vinutí krokového motoru jsou bez napětí. Při přivedení 0 V (logická 0), driver se zapne a zajistí napájení na vinutí krokového motoru.

Hlavním použitím je bezpečná detekce zablokování motoru za účelem výměny mechanického vypínače. Měřením výkonu elektrické energie, která vstupuje do motoru a která z něj vystupuje lze určit mechanická zátěž na rotor, kterou motor vykonává. Pokud se stane, že zátěž na motoru je velká, motor se zastaví.

2.4 Bezkontaktní měření průtoku

Technologie měření průtoku ultrazvukem poskytuje řešení pro kontinuální monitorování technologického procesu [8], kde díky neinvazivnímu způsobu měření a možnosti sbírat data bez zásahu do procesu je ideální zejména pro potravinářské procesy. Ultrazvukové snímače průtoku umožňují bezkontaktní měření průtoku pro širokou škálu kapalin v pružných hadicích s přesností až $\pm 2\%$ měřené hodnoty.

Jednou z velkých výhod, které poskytuje ultrazvukové měření, je možná různorodost měřené látky, speciálně pak její elektrický náboj, hustota nebo viskozita. Dále pak velkou předností je neinvazivní aplikace, tj. není třeba zasahovat do průtoku měřené látky, celý proces měření probíhá bez sond, které je nutné umístit do proudu. Měřit tak průtok lze skrz stěnu potrubí, či různých plastových hadiček bez proniknutí do nich. Jediná podmínka je aby materiál potrubí byl propustný ultrazvuku.



Obr. 2.18 Schématické zobrazení měření průtoku pomocí ultrazvuku [8]

Na Obr.2.18 je ukázán princip měření ultrazvukem na základě časového posunu. Snímač P_{up} vysílá signál po směru proudu, a P_{dn} proti směru proudu. Směr proudění kapaliny je tedy vpravo rychlostí \vec{v} . Úhel pod kterým vysílače jsou nastaveny vůči proudu je θ , průměr potrubí je D a vzdálenost mezi snímači je L . Rychlost ultrazvukové vlny v kapalině je \vec{c} . Čas mezi vysláním signálu z P_{up} a přijetím v P_{dn} lze vyjádřit jako

$$t_{up} = \frac{L}{|\vec{c}| + |\vec{v}| \cdot \cos \theta} \quad (2.2)$$

Obdobně pro čas signálu vyslaný z P_{dn} a přijatý v P_{up} platí

$$t_{dn} = \frac{L}{|\vec{c}| - |\vec{v}| \cdot \cos \theta} \quad (2.3)$$

Z těchto rovnic, se snadno stanoví časový rozdíl jako

$$\Delta t = t_{dn} - t_{up} = \frac{2 \cdot L \cdot |\vec{v}| \cdot \cos \theta}{|\vec{c}|^2 - |\vec{v}|^2 \cdot \cos^2 \theta} \quad (2.4)$$

Protože rychlost zvuku \vec{c} je řádově větší než rychlost proudění kapaliny, lze ze vztahu 2.4

vyjádřit rychlost kapaliny \vec{v} jako

$$\vec{v} = \frac{\Delta t \cdot \vec{c}^2}{2 \cdot L \cdot \cos \theta} \quad (2.5)$$

Ze známé rychlosti se nechá již přes průřez A hadice dopočítat objemový průtok \dot{V}

$$\dot{V} = A \cdot |\vec{v}| \cdot K = \frac{K \cdot \pi \cdot D^2}{4} \cdot |\vec{v}|, \quad (2.6)$$

kde K je korekční faktor, který je závislý na Reynoldsově čísle [8]

2.5 Analogo-digitální převodníky

ADC, neboli Analog-Digital-Convertor, jsou elektronické komponenty, které převádějí analogovou veličinu do digitální podoby. Formálně se jedná o libovolnou fyzikální veličinu: napětí, proud kapaliny, proud, aj. Nejčastěji se ale jedná o ADC převodníky napětí. Daný způsob měření je prováděn "vzorkováním", kdy v určitý čas se změří amplituda na vstupu. Následně dojde ke "kvantování" pomocí operačních zesilovačů a následném zpracování výstupu. Hlavní negativní důsledky při této transformaci jsou vznik periodického frekvenčního spektra signálu a vznik kvantizační chyby - rozdílu kvantového a vstupního signálu. Nutno zdůraznit, že se měření provádí vůči referenční hodnotě. [9] [10]

Hlavními parametry ADC převodníky jsou rychlost transformace a rozlišení. Rychlost převodu se většinou značí v SPS (samples per second - vzorků za sekundu, neboli Hz) a představuje čas mezi jednotlivými čtení napětí, tj. čas mezi jednotlivými vzorky. Rozlišení se udává v bitech.

Existuje spousta různorodostí A/D převodníku, nicméně vytyčím základní skupiny, které představují hlavní směry A/D převodníků

- Paralelní A/D převodník (flash ADC)
- Seriové A/D převodníky (SAE ADC)
- $\Delta\sigma$ ADC (Delta sigma ADC)

Flash ADC jsou schopny dosahovat největších vzorkovacích hodnot až 1 GSPS, ale mají malé rozlišení, které se pohybuje v rozmezích 6 až 8 bitů [9].

Seriové A/D převodníky jsou zaujímají střed, kde mají rychlosti vzorkování 100 KSPS až 1 MSPS s typickými hodnotami rozlišení 12-18 bit

Nejpřesnějšími A/D převodníky jsou $\Delta\sigma$, které mají rozlišení až 24 bitů s rychlostí jednotky SPS až jednotek KSPS.

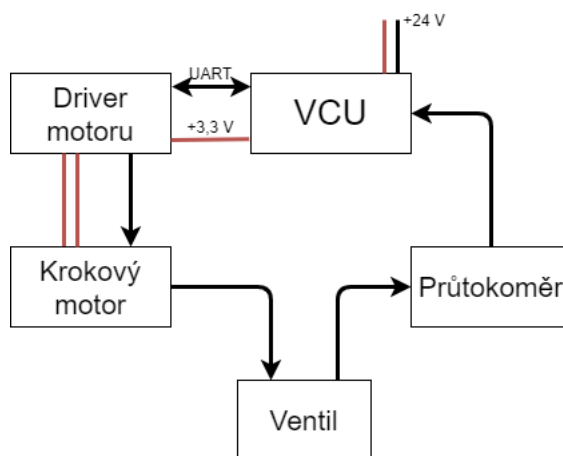
Technická realizace

3.1 Požadavky a analýza

Pro zajištění správného provozu a kompatibility zařízení, byly sestaveny jednotlivé požadavky, na základě kterých budu navrhovat technickou realizaci řízení průtoku. Požadavky jsou následující:

1. Automatická regulace průtoku, kdy uživatel zadá jen požadovanou hodnotu průtoku
2. Rozpoznání zavření ventilu bez koncových senzorů
3. Požadavek na hygienické podmínky
4. Kompatibilita se stávající řídicí jednotkou VCU
5. Připojení na stávající ventil GEMU 507 8D 137 50 0
6. Galvanické oddělení řídicích signálů a napájení
7. Využití interní sítě 24 V

Návrh systému řízení průtoku je schématicky zobrazen na Obr. 3.1



Obr. 3.1 Schéma automatického řízení průtoku OMNIPUMP

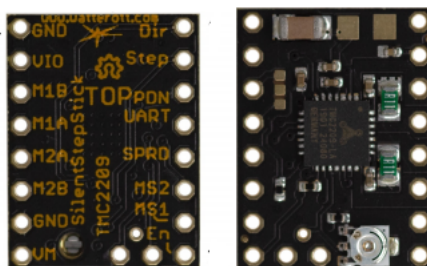
Ventil GEMU 507 8D 137 50 0, představuje sedlový ventil. K jeho řízení (otevírání a zavírání) jsem se rozhodl využít krokový motor, který musí být napájen 24 V, jelikož na tomhle napětí běží vnitřní systém. Pro řízení krokového motoru jsem se rozhodl využít driver krokového motoru, ale je třeba vybrat takový, ve kterém je funkce detekce dorazů, pro zjištění zavření ventilu. Další parametr výběru driveru je možnost UART komunikace, jelikož jenom ta je podporovaná řídicí jednotkou VCU. Tímto odpadne nutnost používat jiné koncové dorazy. Průtok bude snímán bezkontaktním průtokoměrem, který bude posílat naměřená data na řídicí jednotku VCU. VCU

na základě naměřených dat bude v závislosti na navrženém algoritmu řídit pohyb krokového motoru. V následující části popíši můj výběr jednotlivých součástí a celkovou implementaci systému.

3.2 Volba driveru řízení

Pro řízení krokového motoru jsem zvolil driver TMC2209-LA firmy TRINAMIC [11]. Konkrétně byla vybrána deska s již osazeným chipem "TMC2209 SilentStepStick" - viz Obr. 3.2 [11], díky které je usnadněna implementace celého systému na MCU. Parametry daného driveru jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Daný driver je řízen metodou STEP/DIR, tj. na pin STEP jsou vysílány logické impulsy a driver v závislosti na poloze DIR otáčí motor. Disponuje komunikací UART pro nastavování registrů a zaznamenávání událostí (dosažení koncové polohy, či překročení provozní teploty). Maximální proud na fázi motoru dle [12] je $I_{phase} = 1,4A_{RMS}$, což splňuje i vybraný motor.



Obr. 3.2 Ilustrace desky TMC2209 SilentStepStick s integrovaným driverem řízení TMC2209 od firmy Trinamic [12]

Model	TMC2209
Provozní napětí driveru	3,3 - 5 V
Provozní napětí na motory	4,75 V ÷ 28V DC
Počet fází motoru	2
Maximální stálý proud	1,4A _{RMS}
Komunikační protokol	STEP/DIR, 8-bit UART
Počet mikrostepů	8, 16, 32, 64

Tab. 3.1 Tabulka parametrů řídicí desky TMC2209 SilentStepStick [12]

3.2.1 Pohyb a kontrola motoru

Motor je řízen přes STEP (pin 10) a DIR (pin 9) vstupy. Stav vstupu DIR (myšleno logická nula, nebo logická jednička) určuje směr otáčení a nastavení logické hodnoty na STEP vydá impuls na otočení driveru. Každý takový STEP, neboli krok, může být celý (1,8°) nebo mikrokrok,

což jsou 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 části celého kroku. Daný počty mikrokroků lze řídit. Dle [11] str. 13, se počet mikrokroků nastaví zapojením pinů MS1/MS2 na GND, případně na napájecí napětí, nebo se nechá nastavit přes registry pomocí UART.

3.2.2 UART rozhraní a mapa registrů

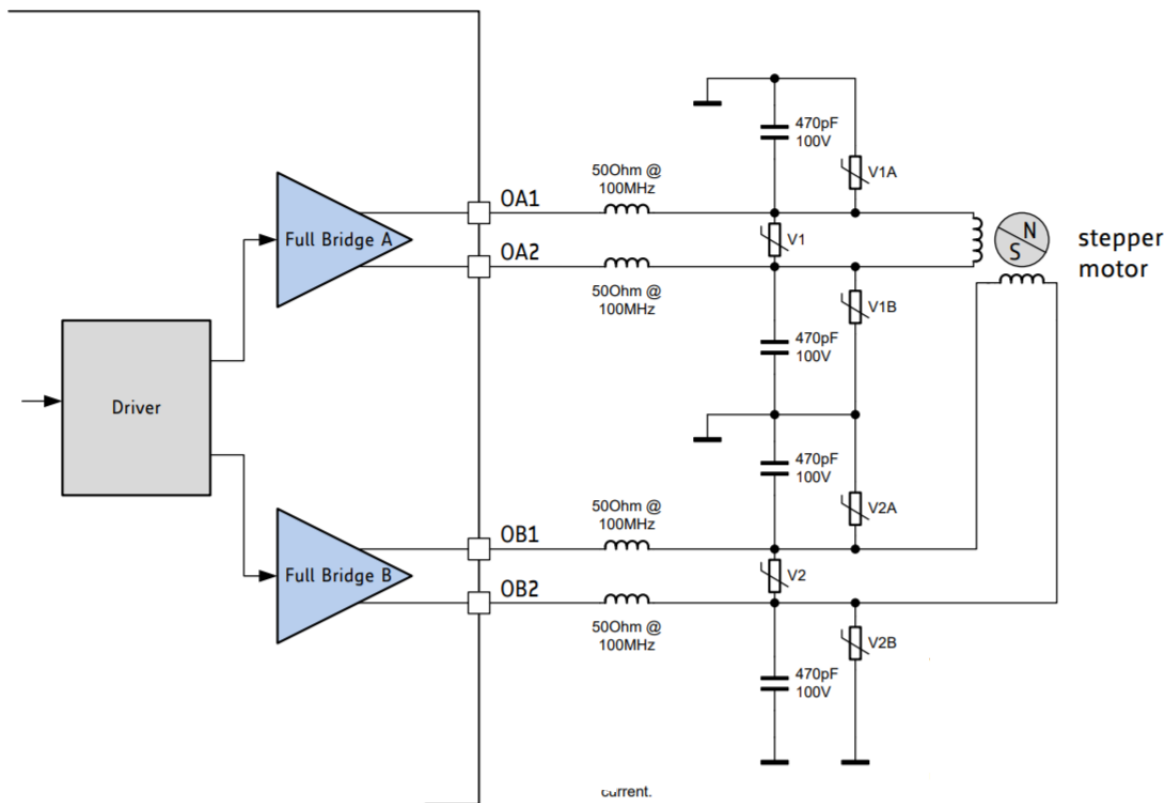
Jedná se o jednovodičové rozhraní pro komunikaci jednosměrně (jen pro nastavení parametrů), nebo obousměrnou komunikaci. Přes toto rozhraní lze nastavit dělení celého kroku na mikrokroky, zaznamenávání dorazu a jiné parametry důležité pro funkci motoru. Níže uvedu tabulku nejzákladnějších parametrů které byly využity pro ladění.

Adresa	bit	Register	Popis registru
0x00	6	GCONF	nastavuje komunikaci přes UART
0x00	7	GCONF	volba nastavení vstupu mikrokrokování
0x01	1	GSTAT	Status flag při přehřátí
0x10	0...16	OTP-IHOLD	Nastavení IHOLDu
0x40	8	SGTHRS	Nastavení mezní hodnoty odporu pro detekci nárazu
0x41	10	SG-RESULT	Výsledná hodnota měření zatížení motoru pro detekci nárazu

Tab. 3.2 Výpis registrů driveru krokového motoru potřebné pro práci. Plný výpis driveru na [11]

3.2.3 Ochrana Driveru a EME Circuitry

Během provozu mohou nastat situace, které jsou pro drivery nebezpečné a může dojít i k jejich zničení. Jedná se převážně o elektrostatické výboje, zpětné napětí indukované v motoru, nebo indukované napětí z komory. Pro minimalizování těchto efektů je třeba sestavit filtrační obvod, jehož příklad je na Obr.3.3 [12]. Jedná se o LC filter, který vyžívá jak kondenzátory pro eliminaci elektrostatických výbojů, tak i pomocí cívek a varistorů se eliminuje špičkové přepětí při zapnutí elektromotoru. Konkrétně varistory V1 a V2 slouží jako ochrana proti indukovanému napětí na cívkách motoru a V1A, V1B, V2A a V2B slouží pro ochranu před velkými elektrostatickými výboji.

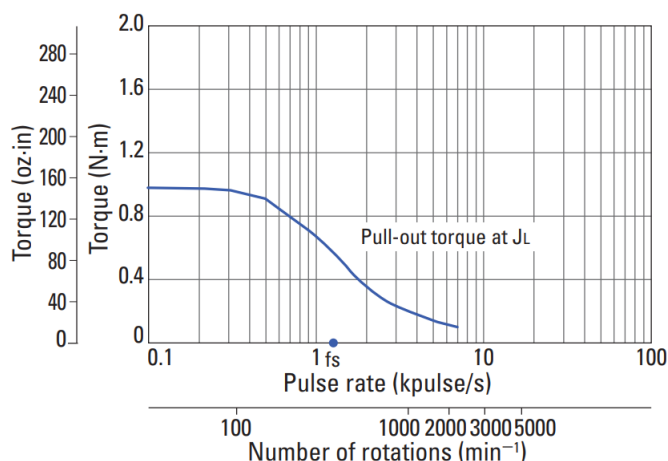


Obr. 3.3 Doporučená EMC ochrana driveru. Převzato z [5]

Kondenzátory volím dle doporučení [12] - 470 pF/100 V, stejně jako cívky 500 /1000 Mhz. Hodnota varistoru V1 a V2 navrhnu podle [13]. Napětí OA1 a OA2 je maximálně 24 V, tím pádem jmenovité napětí varistoru by mělo být od 28,8 VDC.

3.3 Volba krokového motoru

Hlavním parametrem výběru motoru byl maximální proud, který byl dovolen driverem a to $I_{phase} = 1,4A_{RMS}$. Z nabídky krokových motorů byl vybrán motor značky StepSyn, modelové řady 103H7123-5740 [14]. Jedná se o dvoufázový bipolární krokový motor s integrovanou hřídelí na výstupu, s maximálním proudem na fázi $I_{phaseM} = 1 A/phase$ s maximálním kroutícím momentem $M_{max} = 1 N \cdot m$. Napájecí napětí motoru je $U_M = 24 V$.



Obr. 3.4 Závislost momentu na řídicí frekvenci krokového motoru. Převzato z [14]

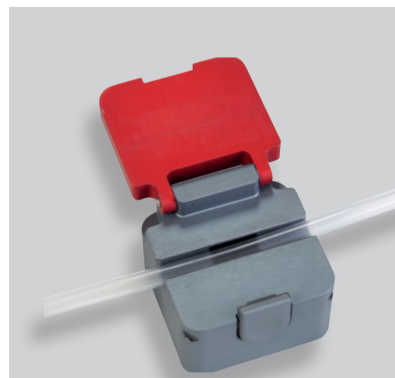
Rozměrově se jedná o NEMA 23 [15]. Na Obr. 6.2 jsou uvedeny rozměry motoru.

3.4 Volba průtokoměru

Pro měření a následnou regulaci průtoku byl zvolen bezkontaktní ultrazvukový průtokoměr. Konkrétně se jedná o násuvný průtokoměr kapalin firmy "SONOTEC". Daný průtokoměr je určen k měření malých průtoků kapalin v aplikacích, kde nelze narušit celistvost hadičky, ve které kapalina proudí nebo kde není povolen kontakt s měřeným médiem. Naměřená data jsou k dispozici současně na analogovém (4...20 mA) nebo na pulzním výstupu. [16].



Obr. 3.5 Ukázka zavřeného ultrazvukového průtokoměru formy SONOTEC. Převzato z [17]



Obr. 3.6 Ukázka vložení trubky v níž bude probíhat měření průtoku do průtokoměru. Převzato z [17]

Byl vybrán průtokoměr CO55-R12K-M120-V2. Jeho parametry uvádím v tabulce. Pro odečítání použiji analogový napěťový výstup na ADC.

Měřicí rozsah průtoku	0 – 12 l/min
Šířka štěrbin	12,0 mm
Vnější průměr hadičky	14 mm
Vnitřní průměr hadičky	10 mm
Rozměry	44x44x36 mm
Perioda měřicího cyklu	typ. 20 ms
Přesnost při rozmezí 0 - 1,2 l/min	±24ml/min
Přesnost při rozmezí 1,2 - 12 l/min	±2%
Výstup	frekvenční, analogový

Tab. 3.3 Výpis technických parametrů zvoleného průtokoměru CO55-R12K-M120-V2 [17]

3.5 Mechanická část realizace

V této části popisují návrh, výrobu a sestavení mechanické části mého návrhu řešení.

3.5.1 Návrh a výroba kluzné spojky

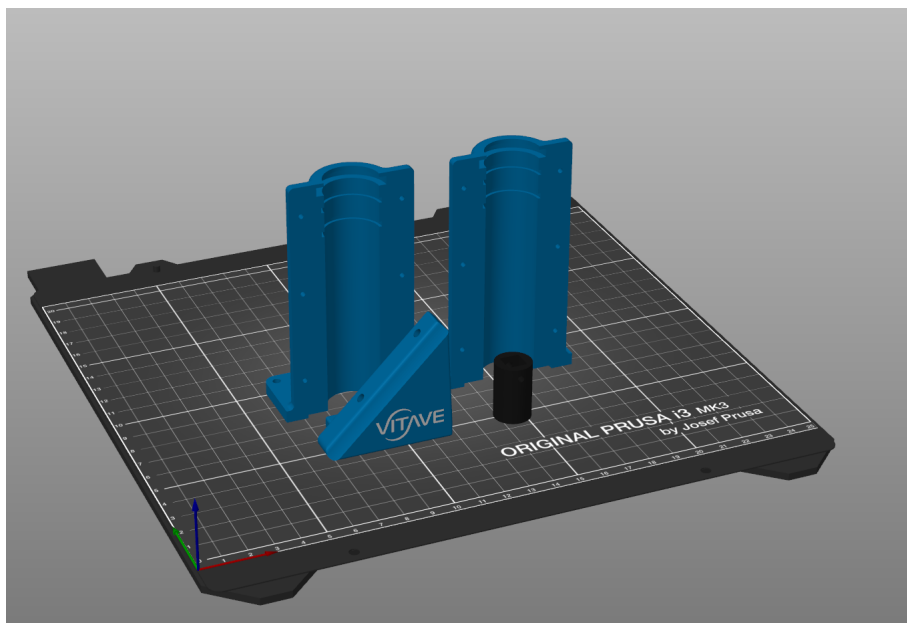
Rotační pohyb z krokového motoru je přenášen na ventil a tím je ventil otevírán a zavírán. Při tom dochází k axiálnímu posuvu sedla ventilu a tím i k posuvu regulačního šroubu. Je třeba navrhnout kluznou spojku, která by jednak přenášela rotační pohyb a zároveň měla možnost axiálního pohybu po hřídelce motoru.

Měřením jsem zjistil, že vzdálenost úvratí ventilu je 10 mm. Proto musím zajistit dostatečnou styčnou plochu pro pohyb spojky na hřídelci krokového motoru. Druhá strana bude připojena na ventil, na jehož konci je čtverečný profil o straně 7,75 mm. Axiálně pojistím spojku na ventilu pomocí stavěcího šroubu M2,5. V příloze na Obr. 6.6 uvádím výkres spojky motoru, kterou následně vyrobím na 3D tiskárně z materiálu PLA.

3.5.2 Návrh a výroba pouzdra motoru a ventilu

Pro uložení motoru a ventilu jsem navrhl pouzdro viz Obr. 6.5. Toto pouzdro se následně pomocí držáku zobrazeném na Obr. 6.7 přichytává na kostru konstrukce OMNIPUMP. Výroba opět pomocí 3D tisku z PLA.

Na Obr. 3.7 je zobrazena příprava pro tisk všech dílů sestavy.



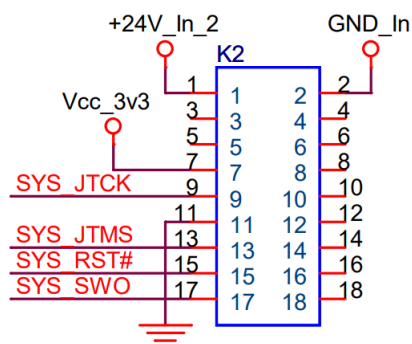
Obr. 3.7 Příprava CAM v programu PrusaSlicer pro 3D tisk držáků a spojky

3.6 Elektrická část realizace

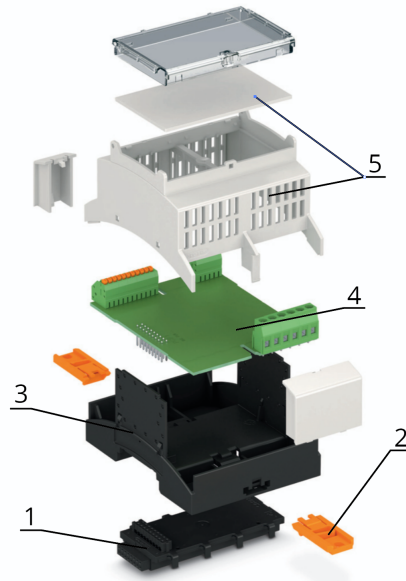
V této části popisují návrh, výrobu a sestavení elektrické části mého návrhu řešení.

3.6.1 Volba uložení PCB

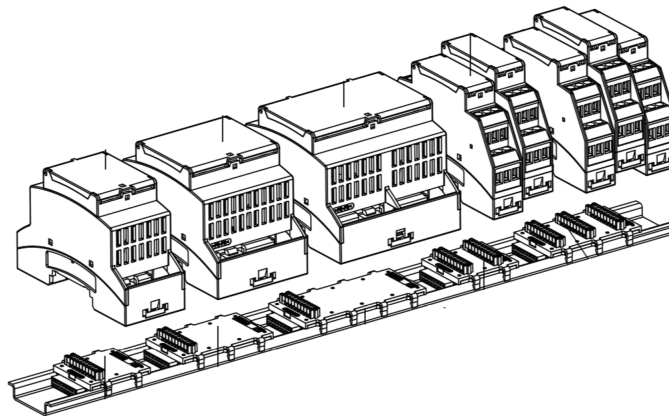
V OMNIPUMP je instalována řídicí jednotka VCU, která zajišťuje řízení. VCU disponuje 13-bitovým ADC MCP3302/04 [18], serií DAC a možností UART komunikací. Jednotka je uložena v ochranném pouzdře [19], které se používá pro snadnější montáž do zařízení na speciální DIN lištu. V dané sérii pouzder je snadno řešené propojení s jinými pouzdry, protože na zadní straně je k dispozici 18 pinů, kterými lze pomocí lišt propojit různý počet pouzder na jedné DIN liště pomocí "HBUS". Výstupy konektoru VCU jsou vidět na Obr. 3.8



Obr. 3.8 Výstupní piny VCU

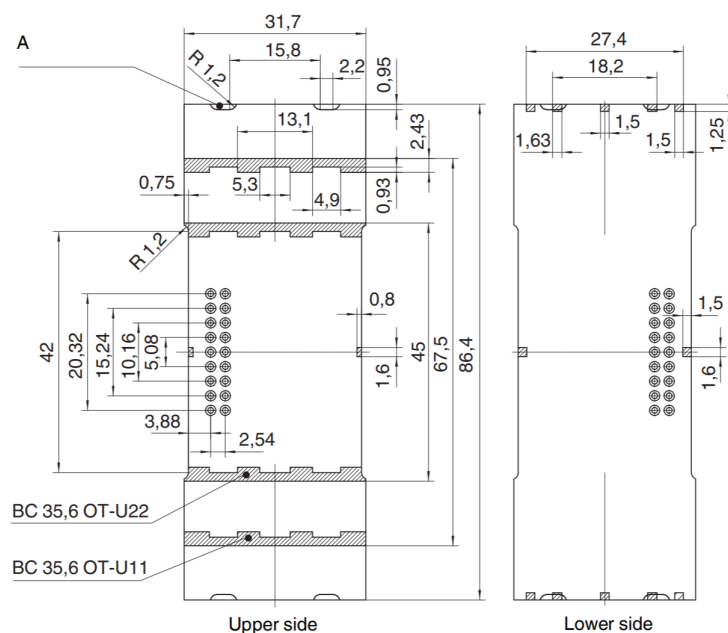


Obr. 3.9 Ukázka modulární konstrukce pouzdra. 1 - propojovací HBUS lišta, 2 - držák na DIN lištu, 3 - PCB pouzdro, 4 - PCB, 5 - horní kryt. Převzato z [19]



Obr. 3.10 Ukázka spojení několika modulů pomocí HBUS lišty. Převzato z [19]

Z tohoto důvodu jsem se rozhodl při realizaci elektrického zapojení driveru a motoru využít stejná ochranná pouzdra pro vzájemnou kompatibilitu, jednodušší montáž a elektrické připojení. Bylo vybráno pouzdro "Mounting base housing - BC 35,6 UT HBUS BK - 2896254". Tímto jsem si předurčil budoucí rozměry PCB desky dle dokumentace pouzdra [20]. 18pinovou sběrnici využiji ke komunikaci s VCU, kde se propojí následující piny s driverem.



Obr. 3.11 Rozměrové pokyny pro rozměry PCB pro použité pouzdro. Převzato z [20]

Pin	Název	Popis
7	Vcc3v3	Napájecí napětí čipu
9	SYS JTCK	DIR pin
17	SYS SWO	STEP pin
11	GND	Napájecí zem
13	SYS JTMS	EN pin
18	-	UART Rx

Tab. 3.4 Tabulka popisu PINu pro komunikaci s VCU. Piny jsou zobrazeny na Obr.3.8

Jako konektory pro zapojení napájení a vývody desky na motory jsem se rozhodl použít konektory "PCB terminal block - SPTA 1/ 2-3,5 - 1752104"(dvojpin pro napájení) a "Printed-circuit board connector - MSTBA 2,5/ 2-G-5,08 - 1757242"- konektor pro motor pro jednoduché odpojování motoru.

3.6.2 Elektrické schéma zapojení

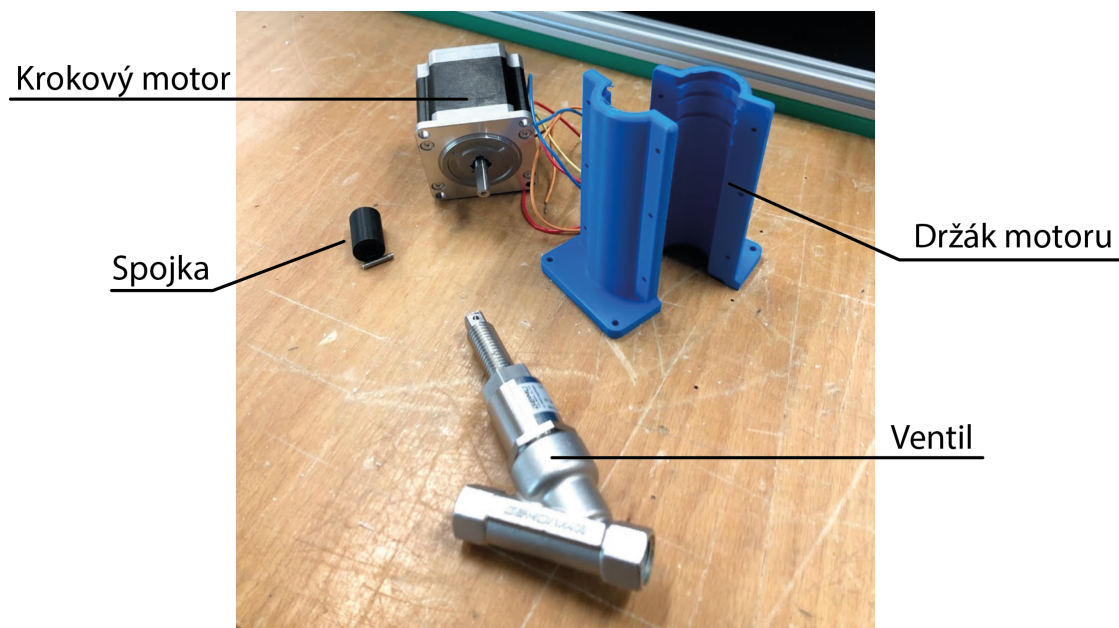
Při návrhu elektrického schématu zapojení jsem vycházel z výše uvedených parametru, kde jsem potřeboval propojit driver TMC2209 s jednotlivými piny, které se následně spojí s VCU přes galvanické oddělovače a zapojení EMC filtrů.

Pro galvanické oddělení pinu z VCU jsem zvolil digitální oddělovač ADuM1200WT [21] pro oddělení STEP a DIR signálu. Pro oddělení UART komunikace a EN signálu jsem zvolil digitální oddělovač ADUM1251ARZ. [22]

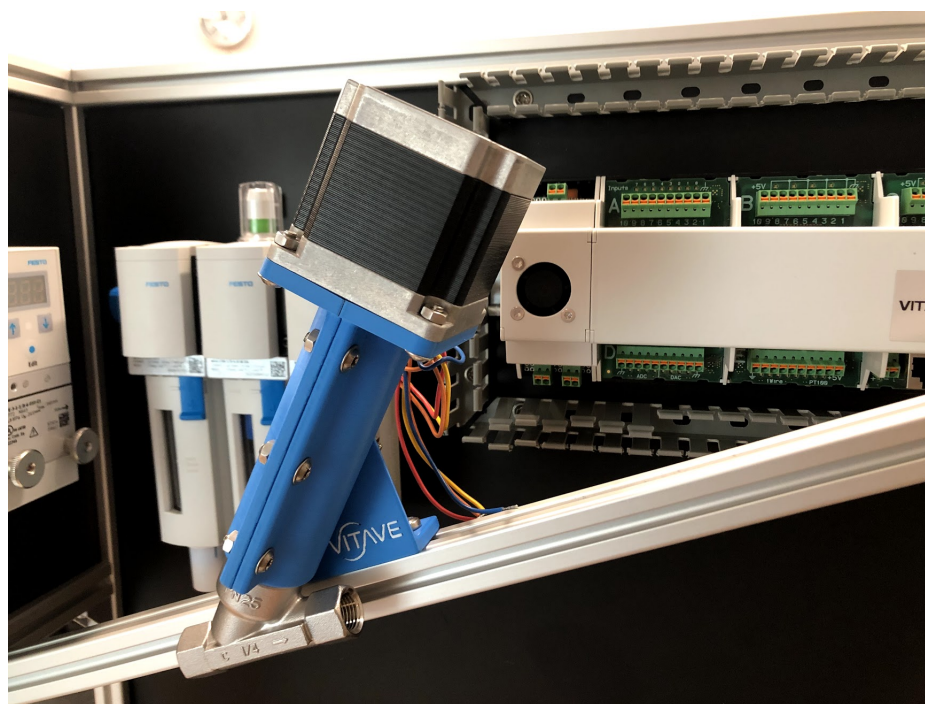
Kompletní elektrické schéma je zobrazeno na Obr. 6.3

3.6.3 Realizace zapojení

Níže představuji finální podobu sestavy. Na Obr. 3.12 je vidět sedlový ventil, krokový motor, dvě poloviny držáků a spojka. Na Obr. 3.13 je již sestava namontovaná do lišty OMNIPUMP. V pozadí lze vidět pouzdro s řízením motoru, které je napojené na VCU, umístěné vpravo od něj.



Obr. 3.12 Kompletace zařízení

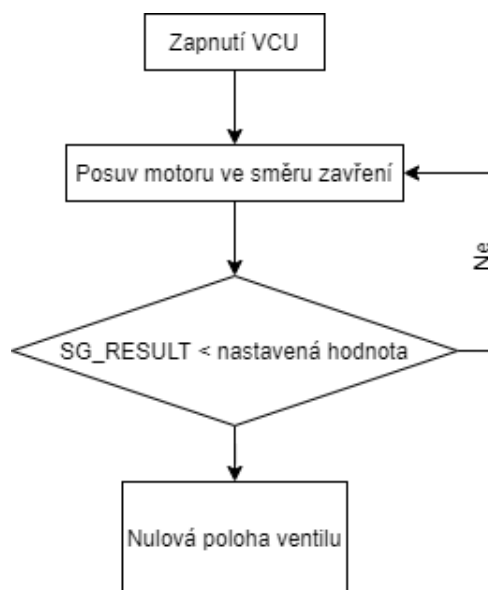


Obr. 3.13 Kompletace zařízení

3.7 Návrh algoritmu

Návrh řízení systému rozdělují do několika kroků.

První částí je zapnutí celého systému. Schéma akcí je zobrazena na Obr.3.14. Při zapnutí VCU, které je napojeno na +24 VDC, stejně jako motor, dojde k zavírání motoru a při tom ke sledování hodnoty SGRESULT, které měří zátěž krokového motoru. Při překročení nastavené hodnoty zátěže, která se stanoví později experimentálně, dojde k zastavení motoru. Tím byl úplně zavřen ventil a stanovena nulová poloha pro odpočet kroků, od které bude motor počítat pozdější otevírání.

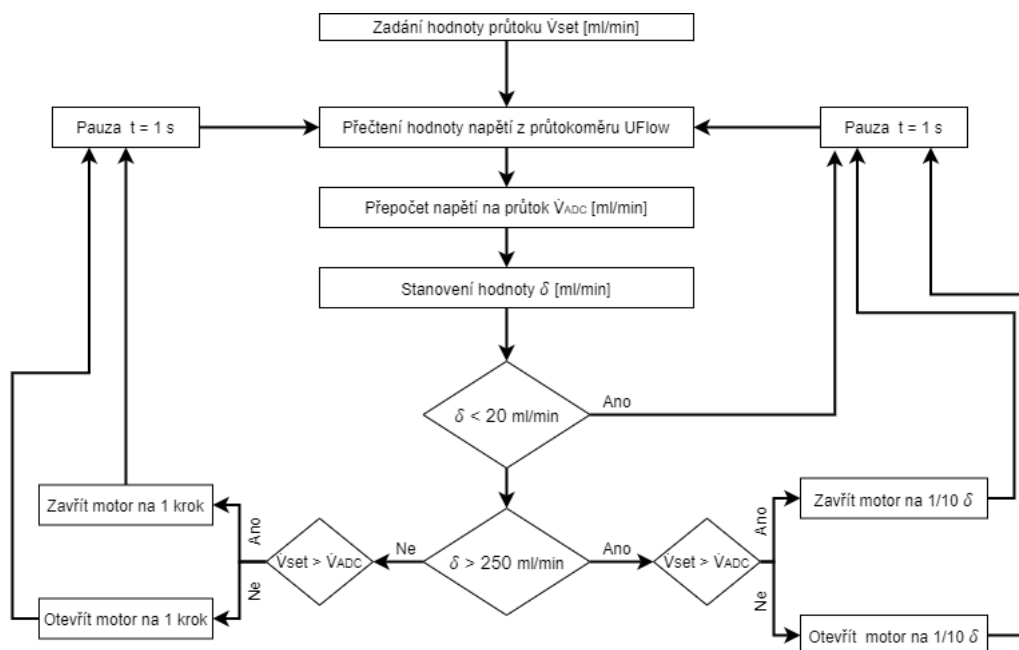


Obr. 3.14 Algoritmus vykonaný při zapnutí VCU.

Druhá část realizace je samotné řízení, při kterém na HMI zadá uživatel požadovanou hodnotu průtoku. Schéma řízení je představeno na Obr.3.15. Jedná se o návrh zpětnovazebného řízení, kdy nejprve se přečte hodnota napětí z průtokoměru, která se převede na hodnotu průtoku \dot{V}_{ADC} . Ta se porovná se zadanou hodnotou průtoku \dot{V}_{set} a stanoví se hodnota rozdílu δ

$$\delta = |\dot{V}_{set} - \dot{V}_{ADC}| \quad (3.1)$$

V dalším kroku se vyhodnotí, zda je δ v námi zadaném intervalu (na Obr.3.15 je zvolena hodnota 20 ml/min). Pokud je tato podmínka splněna, systém vyčká 1 sekundu a opakuje čtení hodnoty průtoku. Pauzu 1 sekundu jsem v pozdějším stádiu schopen regulovat pro nalezení optimálních hodnot.



Obr. 3.15 Algoritmus řízení krokového motoru. V tomto algoritmu jsem schopen měnit čas pauzy a hodnotu δ pro nalezení optimálních hodnot

Pokud ovšem je δ větší, než nastavená hodnota, je třeba ventil otevřít, nebo zavřít. Pro jemnou regulaci, kdy δ je menší, než 250 ml/min, se motor posouvá vždy o jeden krok. Při větším rozdílu je posunutí motoru zvoleno na 1/10 kroků. Po každém zásahu se provede pauza, která kompenzuje dopravní zpoždění.

Poslední, třetí podmínka řízení, je zvláštní režim během provozu - SERVIS. Při něm se ventil otevře na 6000 kroků, při čemž dojde k vypuštění kapaliny z celého systému. Při navrácení do provozu, se motor zavře na 6000 kroků, čím se dostane do nulové pozice. Nutno dodat, že daná nulová pozice není vyhodnocovaná podle zátěže. Za nulu se bere hodnota, která byla změřena při inicializaci.

Ostrý provoz

4.1 Komunikace s VCU, přehled výpisu na terminal

Celou sestavu motoru a ventilu jsem smontoval a zapojil do systému. Následně jsem zapojil sestavený řídicí obvod pro krokový motor k VCU a propojil motor s driverem. Zavedl jsem konvenci zapojení kabelů, kde pro otáčení po směru hodinových ručiček a pro zajištění napájení stejných fází dle [14] je pořadí drátu zleva doprava při zapojování následující: žlutá, červená, oranžová, modrá. Při prohození kabelů motor může se otáčet jiným směrem, což by následně způsobilo problém s řízením.

Po předložení veškerých dat pro komunikaci driveru, byla zajištěna implementace komunikace s driverem do VCU. Níže uvádím tabulku příkazu, kterými se motor nechá ovládat ručně přes Serial Terminal, pomocí zasílání příkazů.

motor init	provede inicializaci motoru ve VCU
motor flow <x>	nastavení požadovaného průtoku pro automatickou regulaci
motor log <x>	zaznamenávání hodnot SGresult
motor auto [<x> <y> <z>]	nastavení parametrů viz kapitola 4.5
motor get	vypsání registrů a aktuálního stavu motoru
motor get full	podrobnější vypsání registrů
motor step	ruční zadání kroků
motor move <X>	nastavení neustálého otáčení pro zvolenou rychlost x

Tab. 4.1 Tabulka všech příkazů, pomocí kterých mohu snímat parametry motoru a ručně ho ovládat.

4.1.1 Výpis registru driveru

Na Obr. 4.1 je zobrazen pomocí příkazu "motor get" výpis registrů a parametrů driveru. Je tam uvedeno jméno registru, následně operace, která se s daným registrem může provést, stávající hodnota registru v HEX a default hodnota, tj. hodnota, která se stanoví při zapnutí VCU.

Dále je uveden parametr "motor enable", což je hodnota, kdy se na motor přestane dodávat proud když se netočí. Hodnoty registru "thZero" a "thMove" značí stav kdy driver vyhodnotí zátěž motoru a tím i koncový doraz, nebo nějakou překážku. Rozlišuji dvě hodnoty pro nalezení nuly a pro pohyb. Registr "AVG_COUNT" stanovuje z kolika hodnot se má stanovovat průměrná hodnota.

Dále je tam výpis "motor zero set", který značí, že motor našel nulovou polohu při inicializaci. Hodnota "absolutepos" je aktuální počet mikrokroků od nulové polohy.

Výpis "driver init" značí, že VCU detekovalo driver a komunikace probíhá v pořádku.

Poslední čtyři řádky slouží pro automatické řízení, kde u "FlowReg" je zobrazena hodnota požadovaná pro regulaci, "Flow" je aktuální hodnota průtoku, "Adc" je hodnota napětí ze senzoru. Poté mám možnost regulovat čas, kdy VCU přečte novou hodnotu ze senzoru a vyhodnotí pohyb motoru. Po zkouškách a nalezení hystereze při řízení, mohu přidat počet kroků navíc, které se uskuteční při změně směru motoru. Pokud se motor otevíral a systém zaregistroval tak že hodnota průtoku je větší, než požadovaná, udělá se při zavírání skok na zadané množství kroků. Dále je nastavitelná hodnota intervalu průtoku δ , po jejíž dosažení skončí regulace motoru do doby, než se hodnota opět ocitne mimo interval.

```
[motor get]
Execute Command [motor get]
GCONF      reg RW 0x00: 0x000001c1 default: 0x000001c1
GSTAT      reg RW 0x01: 0x00000000
IFCNT      reg R  0x02: 0x00000013
SAVECONF   reg W  0x03: 0x00000000
OTP_PROG   reg W  0x04: 0x00000000
OTP_READ   reg R  0x05: 0x0000000d
IOIN       reg R  0x06: 0x210002c1
FACTORY_CONF reg RW 0x07: 0x0000000d
IHOLD_IRUN reg W  0x10: 0x00011501 default: 0x00011501
TPOWER_DOWN reg W  0x11: 0x00000014
TSTEP      reg R  0x12: 0x000fffff
TPWMTHRS   reg W  0x13: 0x00000000
VACTUAL     reg W  0x22: 0x00000000
TCOOLTHRS  reg W  0x14: 0x00000000
SGTHRS     reg W  0x40: 0x00000010 default: 0x00000010
SG_RESULT  reg R  0x41: 0x0000001e
COOLCONF   reg W  0x42: 0x00000000
MSCNT      reg R  0x6a: 0x000001f0
MSCURACT   reg R  0x6b: 0x01090017
CHOPCONF   reg RW 0x6c: 0x15010055 default: 0x15010050
DRV_STATUS reg R  0x6f: 0xc0010000
PWMCONF    reg RW 0x70: 0xc80d0e24 default: 0xc80d0e24
PWM_SCALE  reg R  0x71: 0x00020007
PWM_AUTO   reg R  0x72: 0x0010005a
motor enable 1000 mks default 1000 mks
motor thZero 256 (default 256) thMove 2 (default 2)
motor AVG_COUNT 5 (default 5)
motor zero set, absolutepos 0
driver init
FlowReg 0 Flow 0 Adc -1
Wait after motor stop 500 ms
Add 0 steps if change direction
Stop if flow delta < 15
```

Obr. 4.1 Výpis všech registrů po příkazu "motor get"

4.1.2 Výpis SG_RESULT

Driver krokového motoru zaznamenává zatížení krokového motoru do speciálního registru SG_RESULT. Daný registr lze za chodu motoru vypsát příkazem "motor log 1" a následně při každém stepu vypíše hodnota zatížení. Čím je hodnota menší, tím je motor více zatížen. Nastavení koncových dorazů provedu v následující části.

4.1.3 Výpis ADC

Pro měření budu potřebovat měřit napětí na ADC. Pro výpis ADC se využívá příkaz "adc get". Ukázka výpisu je uvedena na Obr.4.2. Jedná se o výpis čtyřkanálového ADC (Ch 0 - Ch 3).

Je zobrazena hodnota posledního měření (v mV) a hodnota průměrná, jako průměr posledních 40 měření. Pro účely měření průtoku byl vyčleněn kanál 1 - Ch 1.

```
[adc get]
Execute Command [adc get]
POS 3219
Ch 0: 10624 mV (AVG 10620 mV) delta 4 mV raw c55 (AVG c52), flow 8000 ml/min (AVG 8000 ml/min)
Ch 1: 4019 mV (AVG 4013 mV) delta 6 mV raw 1ab8 (AVG 1ab4), flow 74 ml/min (AVG 70 ml/min)
Ch 2: 3572 mV (AVG 3561 mV) delta 11 mV raw 1987 (AVG 197f), flow 0 ml/min (AVG 0 ml/min)
Ch 3: 0 mV (AVG 0 mV) delta 0 mV raw 1000 (AVG 1000), flow 0 ml/min (AVG 0 ml/min)
RAW Ch 0: c50 c50 c50 c50 c54 c54 c55 c55
mV Ch 0: 10617 10617 10617 10617 10623 10623 10624 10624
Flow Ch 0: 8000 8000 8000 8000 8000 8000 8000 8000
RAW Ch 1: 1aa1 1aa3 1aaa 1ab0 1ab5 1ab5 1ab8 1ab8
mV Ch 1: 3985 3988 3999 4007 4015 4015 4019 4019
Flow Ch 1: 0 0 0 65 71 71 74 74
RAW Ch 2: 196f 1975 1975 1975 197c 197f 1983 1987
mV Ch 2: 3537 3546 3546 3546 3556 3561 3566 3572
Flow Ch 2: 0 0 0 0 0 0 0 0
RAW Ch 3: 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000
mV Ch 3: 0 0 0 0 0 0 0 0
Flow Ch 3: 0 0 0 0 0 0 0 0
avg count = 8
count=22556951 rr 0 0 tim14 22557210
```

Obr. 4.2 Detailní výpis napětí ADC

Výpis automatické regulace

Byl domluven výpis stavu při automatické regulaci, pro vyhodnocování měření. Daný výpis je posílán vždy, když motor dokončí svůj pohyb. Ukázka výpisu je uvedena na Obr.4.3. Jeho formát je ve tvaru: čas výpisu (v ms), požadovaný průtok (v ml/min), aktuální průtok (v ml/min), čas zastavení motoru (v ms), absolutní pozice vůči nule (v krocích), otočení motoru v minulém kroku (v krocích), požadovaný průtok (v ml/min), aktuální průtok (v ml/min), delta průtoku (v ml/min), a poslední krok motoru (v krocích).

```
155381;ms; 150;needflow; 175;flow; -25;delta; 154875;ms; 364;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 175 delta -25 move -1
155901;ms; 150;needflow; 175;flow; -25;delta; 155395;ms; 363;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 175 delta -25 move -1
156421;ms; 150;needflow; 177;flow; -27;delta; 155915;ms; 362;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 177 delta -27 move -1
156941;ms; 150;needflow; 175;flow; -25;delta; 156435;ms; 361;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 175 delta -25 move -1
157461;ms; 150;needflow; 167;flow; -17;delta; 156955;ms; 360;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 167 delta -17 move -1
157981;ms; 150;needflow; 170;flow; -20;delta; 157475;ms; 359;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 170 delta -20 move -1
158501;ms; 150;needflow; 159;flow; -9;delta; 157995;ms; 358;abs_pos;134559136;step; ; Flow need 150 actual 159 NOT NEED MOVE
159249;ms; 150;needflow; 166;flow; -16;delta; 157995;ms; 358;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 166 delta -16 move -1
159769;ms; 150;needflow; 158;flow; -8;delta; 159263;ms; 357;abs_pos;134559136;step; ; Flow need 150 actual 158 NOT NEED MOVE
160044;ms; 150;needflow; 166;flow; -16;delta; 159263;ms; 357;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 166 delta -16 move -1
160564;ms; 150;needflow; 157;flow; -7;delta; 160058;ms; 356;abs_pos;134559136;step; ; Flow need 150 actual 157 NOT NEED MOVE
160696;ms; 150;needflow; 166;flow; -16;delta; 160058;ms; 356;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 166 delta -16 move -1
161216;ms; 150;needflow; 141;flow; 9;delta; 160710;ms; 355;abs_pos;134559136;step; ; Flow need 150 actual 141 NOT NEED MOVE
161590;ms; 150;needflow; 166;flow; -16;delta; 160710;ms; 355;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 166 delta -16 move -1
162110;ms; 150;needflow; 149;flow; 1;delta; 161604;ms; 354;abs_pos;134559136;step; ; Flow need 150 actual 149 NOT NEED MOVE
164311;ms; 150;needflow; 166;flow; -16;delta; 161604;ms; 354;abs_pos; -1;step; ; Flow need 150 actual 166 delta -16 move -1
```

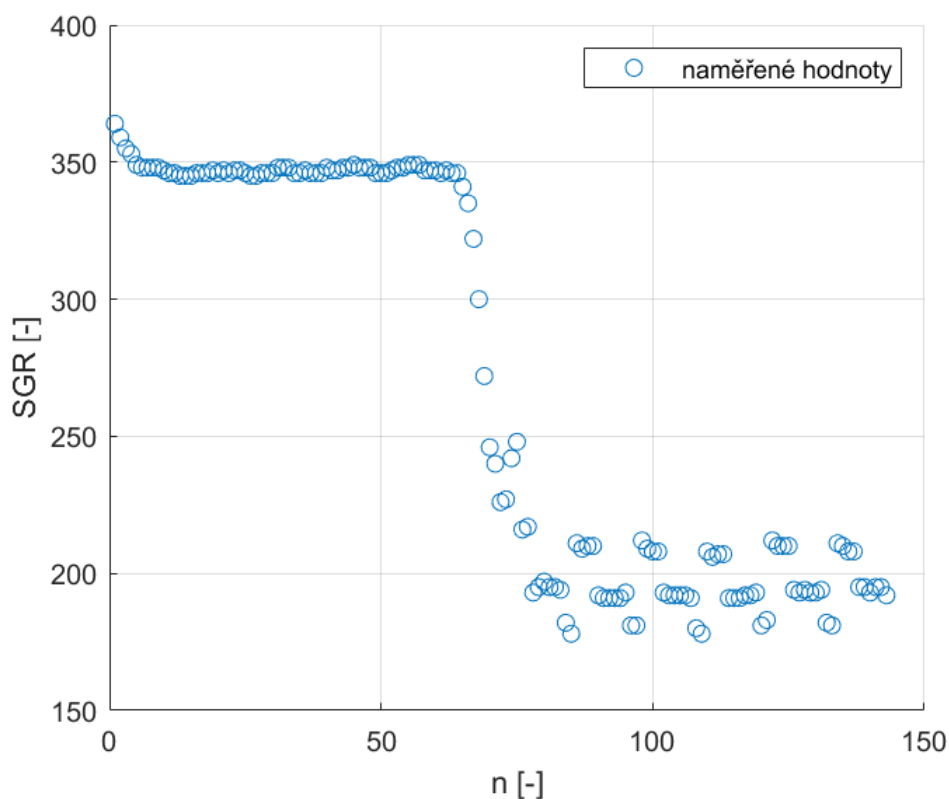
Obr. 4.3 Ukázka výpisu při automatické regulaci. Čísla zleva doprava značí: čas výpisu, požadovaný průtok, aktuální průtok, čas zastavení motoru, absolutní pozice vůči nule, otočení motoru v minulém kroku, požadovaný průtok, aktuální průtok, delta průtoku, a poslední krok motoru.

Při následném vyhodnocování výsledků jsem zpracovával dané výpisy pomocí skriptu, který jsem napsal v programu MATLAB pro zjednodušení zpracování velkého počtu měření. Vstupem programu byl textový soubor s výpisem měření, jako na Obr.4.3. Následně skript rozdělil

hodnoty do jednotlivých matic, kde mě konkrétně zajímaly hodnoty: čas měření, aktuální průtok, čas zastavení motoru a absolutní pozice. Skript uvádím v příloze. Dané čtyři matice hodnot se uložily pro následné zpracování (vykreslení grafů, stanovování průměrné hodnoty průtoku, či oscilace).

4.2 Nastavení koncových dorazů

Prvním nastavením, kterým jsem začal uvádět motor do provozuschopného stavu bylo změření zatížení motoru za provozu a při zavření. V závislosti na tom nastavím hodnoty registru SGTHRS, podle kterého motor detekuje koncový doraz. Měření probíhalo následujícím způsobem: Nastavil jsem hodnotu registru IHOLD_IRUN na hodnotu 0x00011501, což nastaví proud při pohybu motoru na hodnotu 16 (viz přehled registrů). Poté jsem nechal motor otevřít na 100 kroků a následně jsem ho začal zavírat příkazem na otočení motoru v opačném směru na 150 kroků. V průběhu jsem vypisoval hodnoty SGRESULT. Když motor dosáhl koncové polohy, začalo docházet k "procvakávání motoru" a motor již neměl dostatečný kroučící moment pro utažení ventilu. Hodnoty z měření jsou představeny na Obr.4.4.

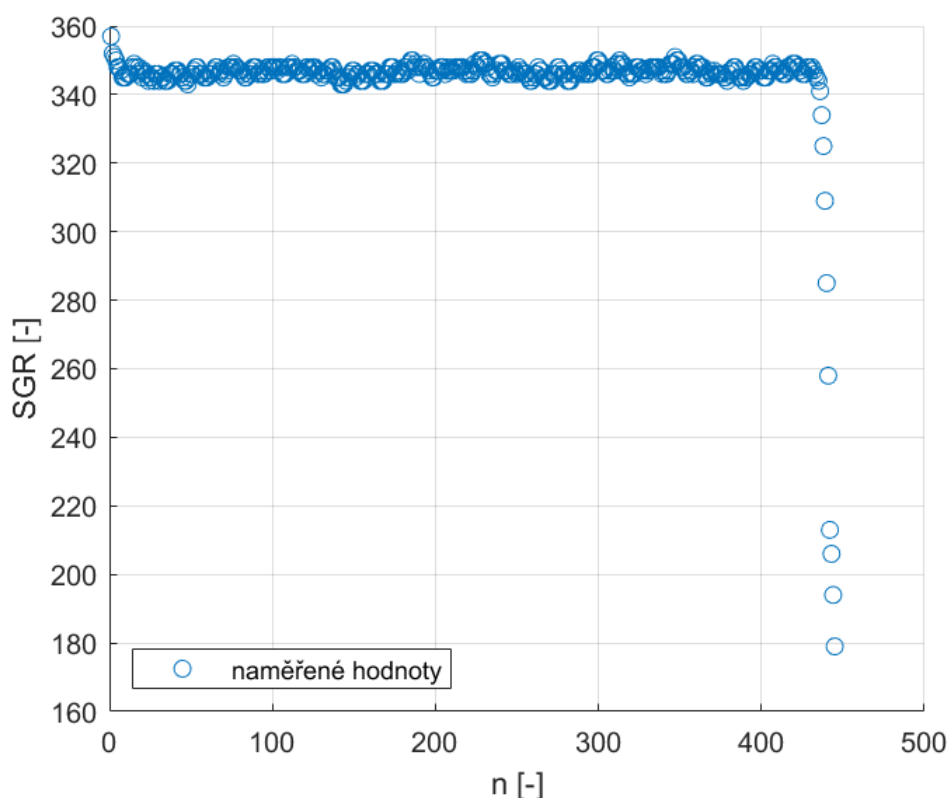


Obr. 4.4 Graf zobrazující zatížení krokového motoru v závislosti na otáčení. Hodnota SGR je parametr, který je čten z registru driveru a čím větší hodnota SGR je, tím méně je motor zatížen. V tomto případě by nulové hodnoty SGR znamenala plné využití kroučícího momentu motoru, tj. v našem případě 1 N·m

Z grafu jsou patrné dvě základní věci. SGR za pohybu odpovídá přibližně hodnota 350. Lze vidět proces utahování ventilu a koncový doraz lze odhadnout na hodnotu 200. Z důvodu potřeby následného otevření volím hodnotu SGRESULT, tj. hodnotu dorazu na 250. Hodnota registru SGTHRS tím pádem bude 0x00000010 HEX.

Lze si povšimnout poklesu SGR na samém začátku otáčení - v oblastech pro $n = 0$ až $n = 10$. Daný pokles vysvětlují hysterezi při zavírání ventilu a poddajností spojky. Podrobněji daný jev rozeberu v následující kapitole

Na Obr.4.5 jsou uvedeny hodnoty při provozu, kdy se při inicializaci motor zavírá a detekuje nulovou polohu.



Obr. 4.5 Graf zobrazující hodnotu zatížení motoru v průběhu zavírání při reálném provozu.

4.3 Seřízení průtokoměru

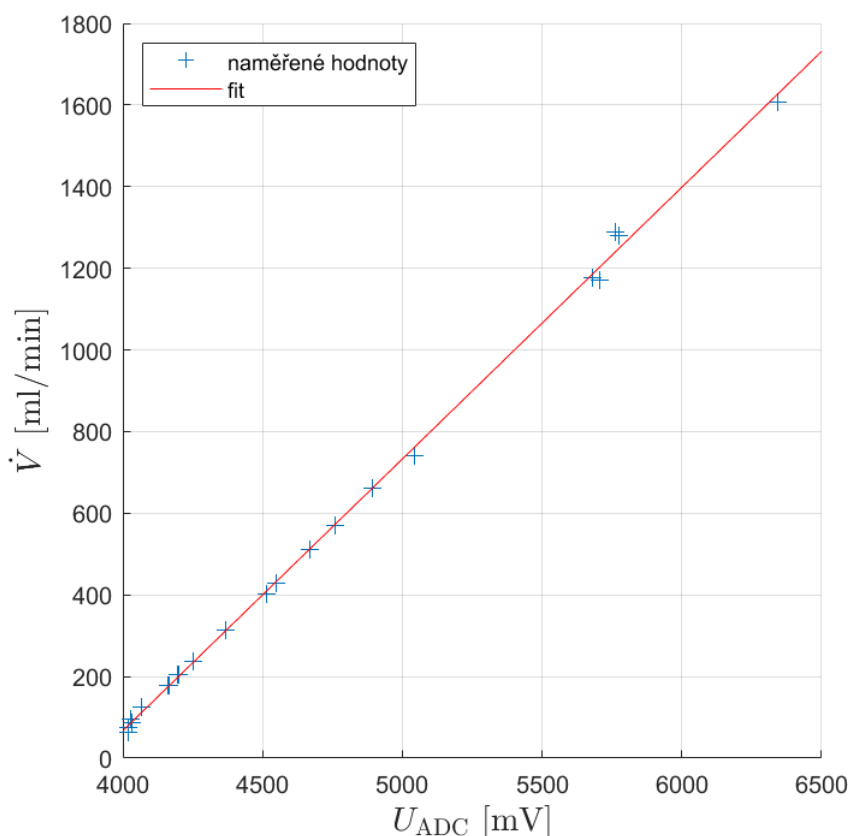
Při měření průtokoměrem, jak bylo zmíněno výše, má průtokoměr analogový napěťový výstup $4 \div 20$ V. Řízení ovšem počítá s hodnotou průtoku, a proto dalším potřebným úkonem bylo sestavení závislosti napěťového výstupu průtokoměru na skutečném průtoku. Měření probíhalo následně: Po 10 krocích jsem postupně otevíral ventil, dokud se neobjevil ustálený průtok. Nechal jsem průtok se stabilizovat po dobu 30 sekund a poté jsem odměřil objem proteklý za minutu. Během toho jsem pomocí příkazu "adc get" zaznamenával průměrnou hodnotu napětí

jednou za 5 sekund. Naměřené hodnoty ADC byly zprůměrované a byla určena směrodatná odchylka měření.

Jednotlivé hodnoty napětí na ADC v závislosti na odměřeném průtoku jsou zobrazeny na Obr.4.6. Výsledky jsou proloženy lineární závislostí v programu MATLAB, který vyhodnotil koeficienty fitu a směrodatnou odchylku.

$$\dot{V} = A \cdot U_{ADC} + B, \quad (4.1)$$

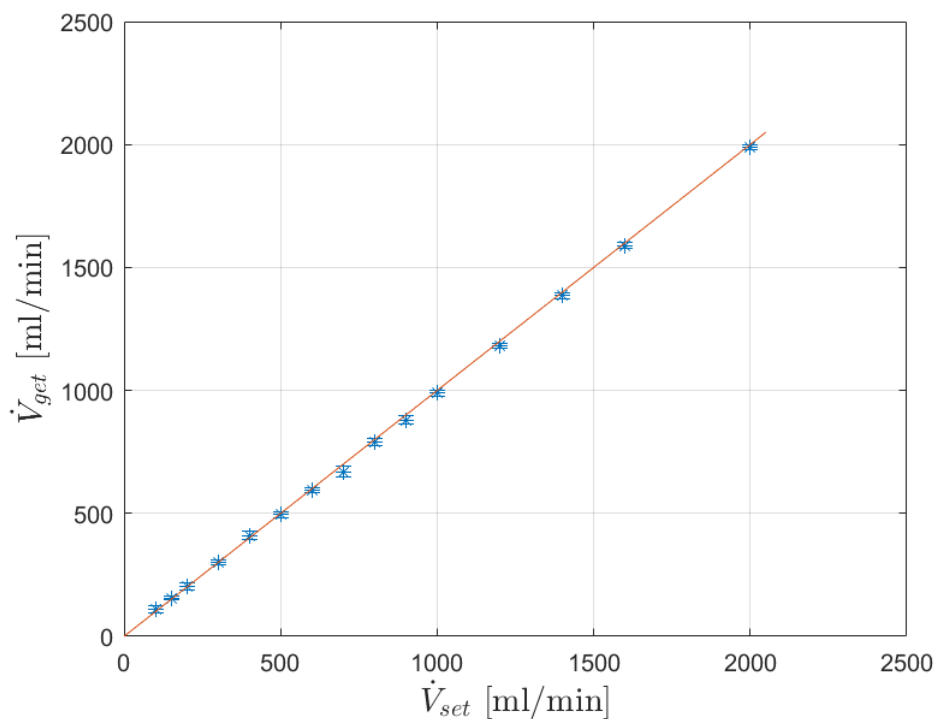
kde \dot{V} [ml/min] je průtok, $A = (0,666 \pm 0,010)$ a $B = -(2595 \pm 52)$. Směrodatná odchylka hodnoty průtoku, kterou získám z měření na ADC je $\sigma = 17,53$ ml/min a výběrová směrodatná odchylka je $s = 3,74$ ml/min. Vztah 4.1 byl nahrazen do VCU pro vyhodnocování průtoku.



Obr. 4.6 Graf závislosti průtoku \dot{V} hodnotě napětí U_{ADC} měřeného na ADC z průtokoměru. Naměřené hodnoty proloženy lineární závislostí $f(x) = A \cdot x + B$, kde koeficienty A , B , jsou uvedeny v 4.1

Následně jsem provedl měření reálného průtoku pro stanovené skutečného průtoku. To jsem provedl následujícím způsobem, kdy jsem nastavil požadovaný průtok, nechal se 2 minuty stabilizovat a poté po dobu 1 minuty odměřoval v odměrném válci objem vyteklé kapaliny.

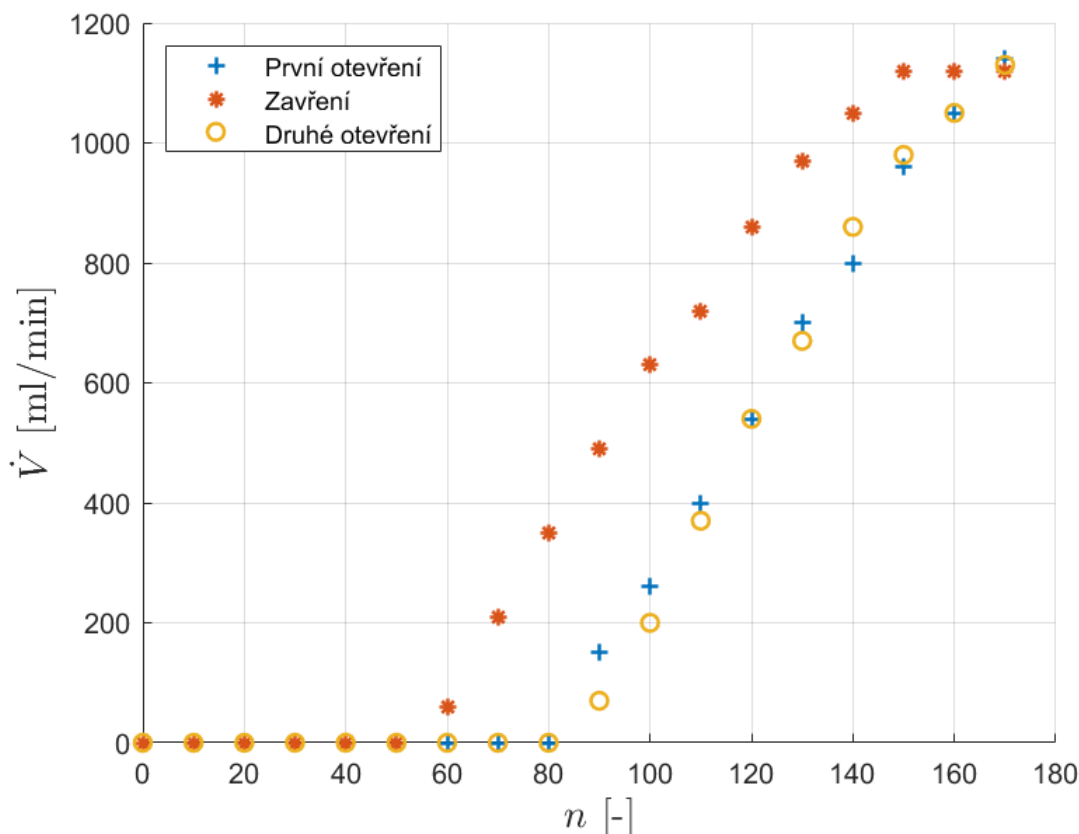
Měření jsem prováděl pro nastavení, kdy automatická regulace snímala stav proudu 200 ms po zastavení motoru a snažila se uregulovat průtok přesně na zadanou hodnotu. Měření průtoku jsem takhle opakoval 5 krát, naměřené hodnoty zprůměroval a vyhodnotil výběrovou směrodatnou odchylku měření. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 4.7. Průběh měření je zobrazen na Obr.6.8



Obr. 4.7 Závislost naměřené hodnoty průtoku v závislosti na nastavené hodnotě automatické regulace při časovém zdržení regulace 200 ms a nastavené $\delta = 1$ ml/min

4.4 Hystereze

Při ručním otevírání a zavírání jsem si všiml, že ventil vykazuje jistou hysterezi. Postupně jsem po 10 krocích otevíral ventil a snímал hodnotu průtoku. Při zpětném zavírání přibližně 20 kroků se průtok neměnil, jak je vidět z Obr. 4.8, kde na vodorovné ose je počet kroků motoru a na svislé průtok. Daný jev vysvětlují jednak konstrukcí ventilu - existenci určité vůle při změně směru. Druhým faktorem ovlivňující hysterezi je vůle mezi spojkou a hřídelí motorem. Daný jev se pokusím eliminovat při automatickém regulování, kdy se motor při změně směru rotace naráz pootočí o zadaný počet kroků zpět.



Obr. 4.8 Graf závislosti průtoku \dot{V} v závislosti na počtu mikro kroků motoru. Lze si povšimnout hystereze při zavírání a otevírání motoru.

4.5 Nastavení parametrů δ , t , n

Pro nastavování přesnosti regulace dle algoritmu jsem vybral následující parametry. Jednak je to čas, který uběhne mezi posledním krokem motoru a čtením hodnoty průtoku. Poté je to "skok" motoru při opačném chodu, která má za úkol eliminovat hysterezi. Třetí parametr je interval δ , který vymezí oblast od požadované hodnoty průtoku, která je postačující při regulaci.

Daný parametr lze za chodu měnit příkazem "motor auto <x> <y> <z>]", kde <x> značí čas, <y> počet kroků při inverzi a <z> interval přesnosti. Provedl jsem sérii měření se změnou jednotlivých parametrů. Veškeré grafy proto jsou pojmenovány ve formátu 3, nebo 4 číslic, kde ve formátu 3 čísel je to: časové zdržení - skok při inverzi - δ . V 4 číselné podobě: požadovaný průtok - časové zdržení - skok při inverzi - δ

Hodnoty automatického průtoku jsem zpracoval do grafů, kde modré body představují aktuální průtok v ml/min a červená křivka aktuální natočení krokového motoru. Na vodorovné ose je zobrazen čas (v sekundách)

4.5.1 Analýza časového zdržení

Měření probíhalo tak, že jsem nastavil požadovaný průtok a požadovaný časový parametr. Dále jsem nechal experiment běžet a uložil si výpisy z řízení. Provedl jsem měření pro 4 zvolené časy (200, 500, 1000, 2000 ms) pro 3 zvolené průtoky (150, 500, 1000 ml/min). Výsledky měření jsou zobrazeny na Obr. 6.10, Obr. 6.9 a Obr. 6.11. Červená přímka v grafu je průměrný průtok za posledních 30 sekund.

Výsledky jsou zpracovány do tabulky

\dot{V}_{set} [ml/min]	t [ms]	\dot{V}_{avg} [ml/min]	σ [ml/min]	Max [ml/min]	Min [ml/min]	τ [s]
1000	200	1002	12	1223	969	1.2
1000	500	997	18	1050	961	1.8
1000	1000	1035	28	1098	962	3.3
1000	2000	998	9.1	1057	971	6.3
500	200	501	13	533	475	1.8
500	500	498.4	10.0	548	459	3.8
500	1000	506	13	525	479	7.3
500	2000	494.4	9.5	525	472	10.2
150	200	151	13	206	117	3.8
150	500	149.0	8.6	175	117	6.2
150	1000	148.9	6.1	168	142	11.2
150	2000	146.8	4.5	161	134	22.2

Tab. 4.2 Naměřené a zpracované hodnoty automatické regulace průtoku, pro 3 různé zadané průtoky (1000, 500, 150 ml/min) pro 4 různé hodnoty časového zdržení mezi provedením rotace motoru a snímáním další hodnoty průtoku. Jednotlivé měření jsou graficky zobrazeny na Obr. 6.10, Obr. 6.9 a Obr. 6.11. Jsou vyhodnoceny průměrné hodnoty a je jejich odchylka, maximální a minimální hodnota průtoku během regulace a časová konstanta τ .

4.5.2 Analýza kroku zpět

V rámci tohoto měření byla snaha zredukovat hysterezi při změně směru otáčení. Rozhodl jsem se měřit pro 0, 5, 10, a 15 kroků, pro průtok 1000, 150 ml/min, pro δ parametr 1 a 20. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny na Obr.6.12 a Obr.6.13 pro 1000ml/s, Obr.6.14 a Obr.6.15 zobrazuje průběh řízení pro nastavený průtok 150 ml/min. Červená příčka v grafu je průměrný průtok za posledních 20 sekund v případě 1000 ml/s a 200 sekund v případě 150 ml/s.

V tabulce níže jsou zobrazeny aritmetické průměry měření společně s kvadratickou odchylkou od průměru.

\dot{V}_{avg} [ml/min]	σ [ml/min]	δ [ml/min]	n_{back} [-]	Max [ml/min]	Min [ml/min]	τ [s]
1015	38	1	0	1074	928	1.2
1008	19	1	5	1151	928	1.8
999	20	1	10	1141	962	1.8
994	44.9	1	15	1151	929	1.8
980	16	20	0	1021	960	1.8
1021	37	20	5	1081	960	1.8
990	17	20	10	1089	974	1.8
988	15	20	15	1091	959	1.8
150.6	7.7	1	0	180	135	8.8
150.1	7.2	1	5	187	127	7.8
150.0	8.9	1	10	210	130	7.3
149.5	10	1	15	188	121	7.3
149	12	20	0	180	130	8.8
149	13	20	5	182	130	9.6
148	9	20	10	182	128	9.4

Tab. 4.3 Naměřené hodnoty průtoku pro proměnnou hodnotu n_{back} . Celý průběh měření lze nalézt na Obr.6.12 a Obr.6.13, Obr.6.13 pro 1000ml/s a Obr.6.14, ze který byl stanoven průměrný průtok, jeho odchylka a následně časová konstanta τ .

4.5.3 Analýza parametru δ

Provedl jsem také měření pro analýzu parametru δ , při kterém jsem pro průtok 1000 ml/min volil různé hodnoty δ a sledoval chování průtoku.

\dot{V}_{avg} [ml/min]	σ [ml/min]	δ [ml/min]	Max [ml/min]	Min [ml/min]	τ [s]
1015	38	0	1192	928	1.2
1013	18	10	1067	928	1.8
980	16	20	1115	961	1.8
986	37	30	1125	928	1.8

Tab. 4.4 Naměřené hodnoty průtoku pro proměnnou hodnotu δ . Celý průběh měření lze nalézt na Obr.6.16, ze který byl stanoven průměrný průtok, jeho odchylka a následně časová konstanta τ .

4.5.4 Volba optimálních parametrů

Na základě naměřených hodnot jsem zvolil variantu "200-0-1". Volil jsem tuto variantu z důvodu nejmenšího časové konstanty, protože se změnou parametrů není přesnost řízení průtoku tak výrazně změněna. Dané zvolené parametry se zapsaly do algoritmu finálního zařízení.



Obr. 4.9 Ostré testování automatizace řízení pro nastavené 150ml/min při výbojích 7.5 kV v komoře

Shrnutí a závěr

5.1 Diskuze

Daná práce představuje vývoj a implementaci systému řízení průtoku pro laboratorní zařízení OMNIPEF.

V teoretické části postupně popisuji systém OMNIPEF a rozebírám jeho přínosy při zpracování potravin. Dále jsem provedl krátkou rešerši na funkci krokových motorů a způsobu jejich realizaci, pro pochopení toho, jak krokový motor funguje a jaké jsou možnosti jeho řízení v dnešní době. Také popisuji bezkontaktní měření průtoku, které následně budu používat a měření na Analog-Digital-Convertoru, pomocí kterého následně budu provádět snímání napětí z průtokoměru. V poslední části je stručný popis principu měření chyb a nejistot.

Ve druhé části práce je popsán návrh systému počínaje analýzou problému, možnostmi a požadavky systému jako celku, tak i návrhem jednotlivých dílů. Na základě požadavků na řízení byl navržen obecný princip sestavy, na základě čeho jsem dále volil jednotlivé komponenty. V první řadě byl volen driver řízení krokového motoru, kde hlavní podmínkou byla detekce zatížení motoru pro nastavení koncových dorazů a UART komunikace. Na základě maximálního proudu, který umožňoval driver, byl vybrán krokový motor. Poté byl vybrán bezkontaktní průtokoměr, který byl vybírán s ohledem na hygienický provoz systému. Na základě již stávající řídicí jednotky byl vybrán konstrukční návrh pro uložení elektrické části do speciálních pouzder a zároveň na základě elektrického schématu byla navržena PCB deska. Pro zajištění převodu rotačního pohybu motoru na posuvný pohyb sedla ventilu byla navržena a vyrobena kluzná spojka, spolu s mechanickým uchycením krokového motoru v celé sestavě OMNIPEF. V závěru druhé části byl navržen algoritmus inicializace a následného řízení průtoku. Daný algoritmus měl zahrnuté parametry, jejichž změny jsou následně prozkoumávané ve třetí části práce.

Třetí část je zaměřená již na provoz zařízení, kde se nejprve zaměřuji na nastavení driveru pro správnou funkci motoru a seznamuji se s registrami driveru. V práci uvádím ukázky příkazů a výpisu registrů, které později budu používat. Před samotným spuštěním byly odlazeny koncové dorazy motoru, aby byla jistota, že se motor vždy zavře. Poté byl seřízen průtokoměr a sestavena závislost reálného průtoku na napětí. Tato závislost byla ověřena následně na reálném provozu. Poté byla provedena řada měření pro typické průtoky, při kterých docházelo ke změnám parametrů v algoritmu - časového zpoždění, oblasti regulace průtoku a prozkoumán efekt hystereze.

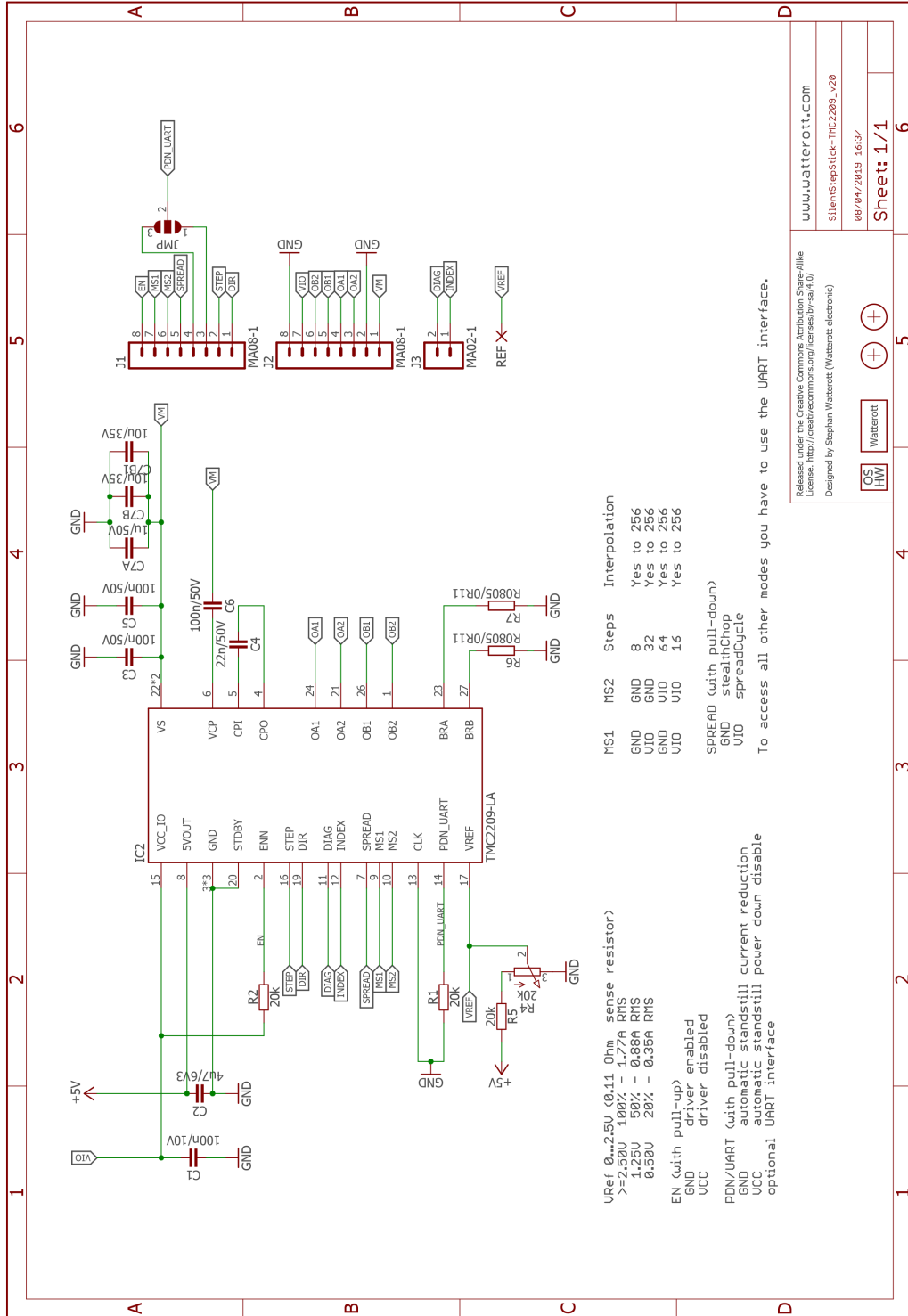
5.2 Závěr

Cílem této práce bylo popsat systém PEF a jeho součásti, což bylo vysvětleno a popsáno v první kapitole. Následně ve druhé kapitole byl navržen vhodný krokový motor spolu s řízením

a mechanickým uchycením do OMNIPUMP. Nakonec byly změřeny charakteristiky průtokoměru pro vytvoření závislosti proudu na výstupním napětí průtokoměru, nastaveny příslušné hodnoty koncových dorazů a vyneseny časové průběhy proudu a otevírání motoru. Finální parametry driveru a motoru se nastavili do řídicí jednotky a motor byl odzkoušen v reálném provozu s vysokonapěťovými impulsy při laboratorních měření. Všechny cíle práce byly naplněny.

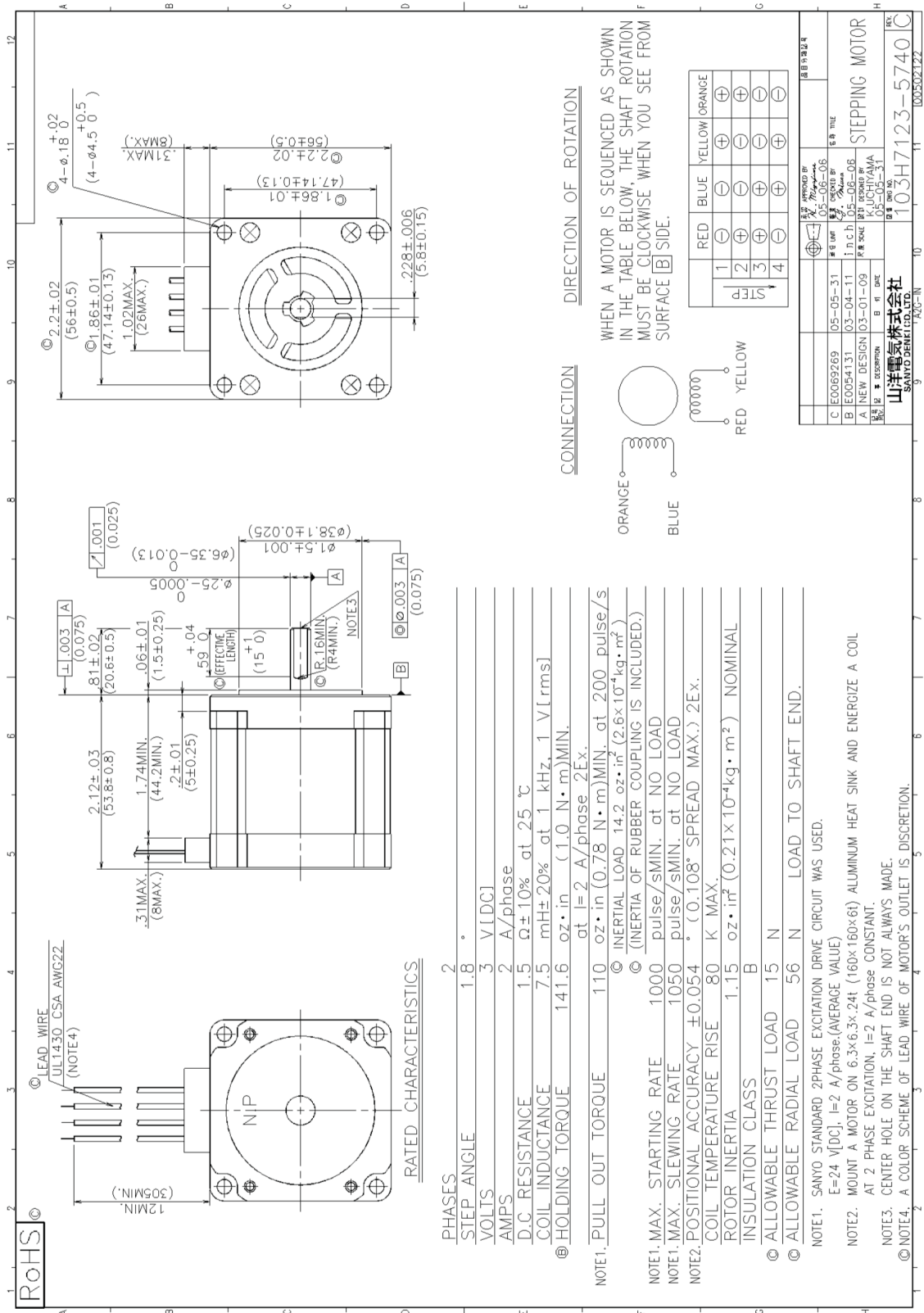
Přílohy

Příloha 1 - Elektrické schéma použité PCB desky TMC2209 SilentStepStick



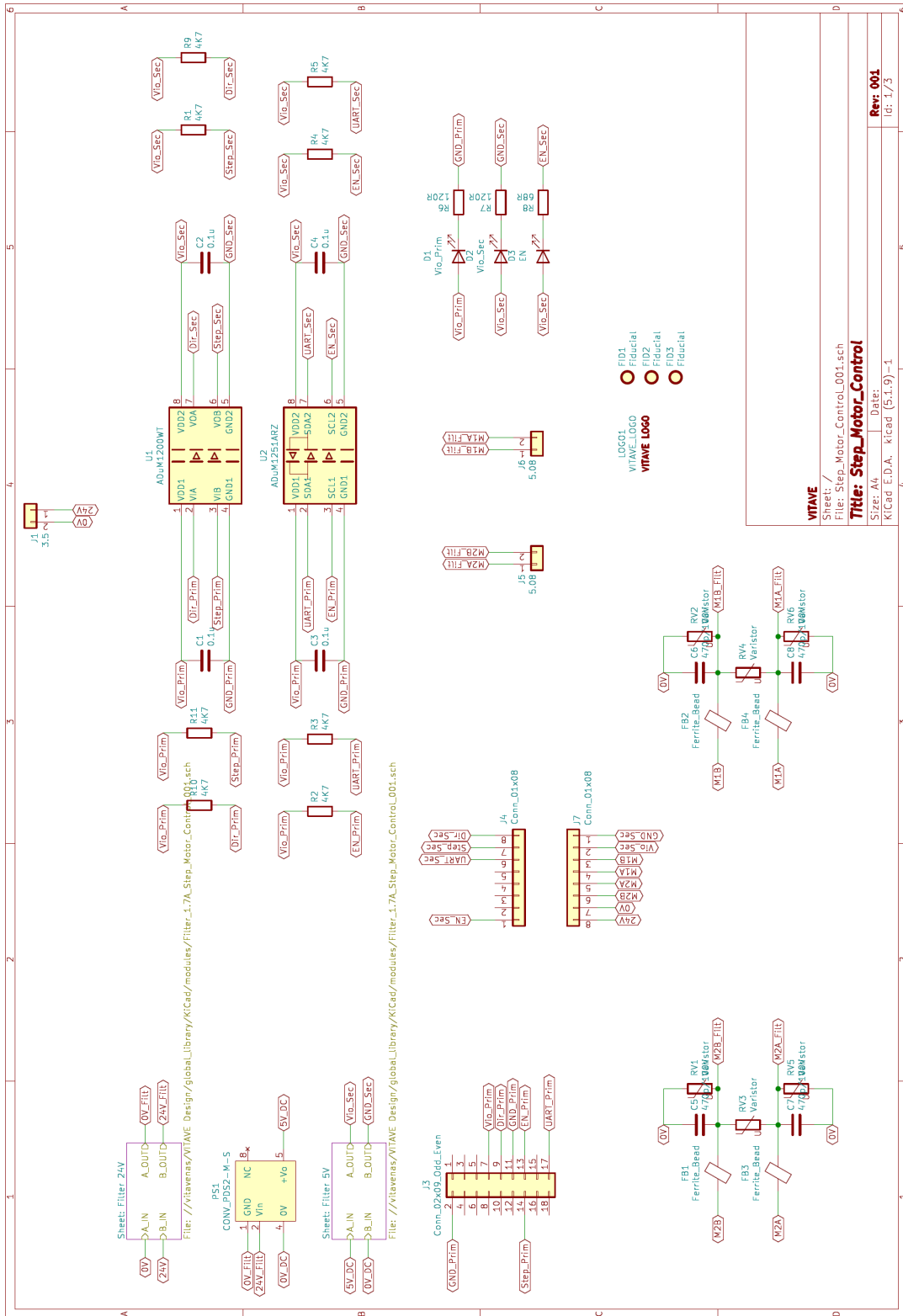
Obř. 6.1 Elektrické schéma vývojové desky TMC2209 SilentStepStick. Převzato z [12]

Příloha 2 - Připojovací rozměry krokového motoru



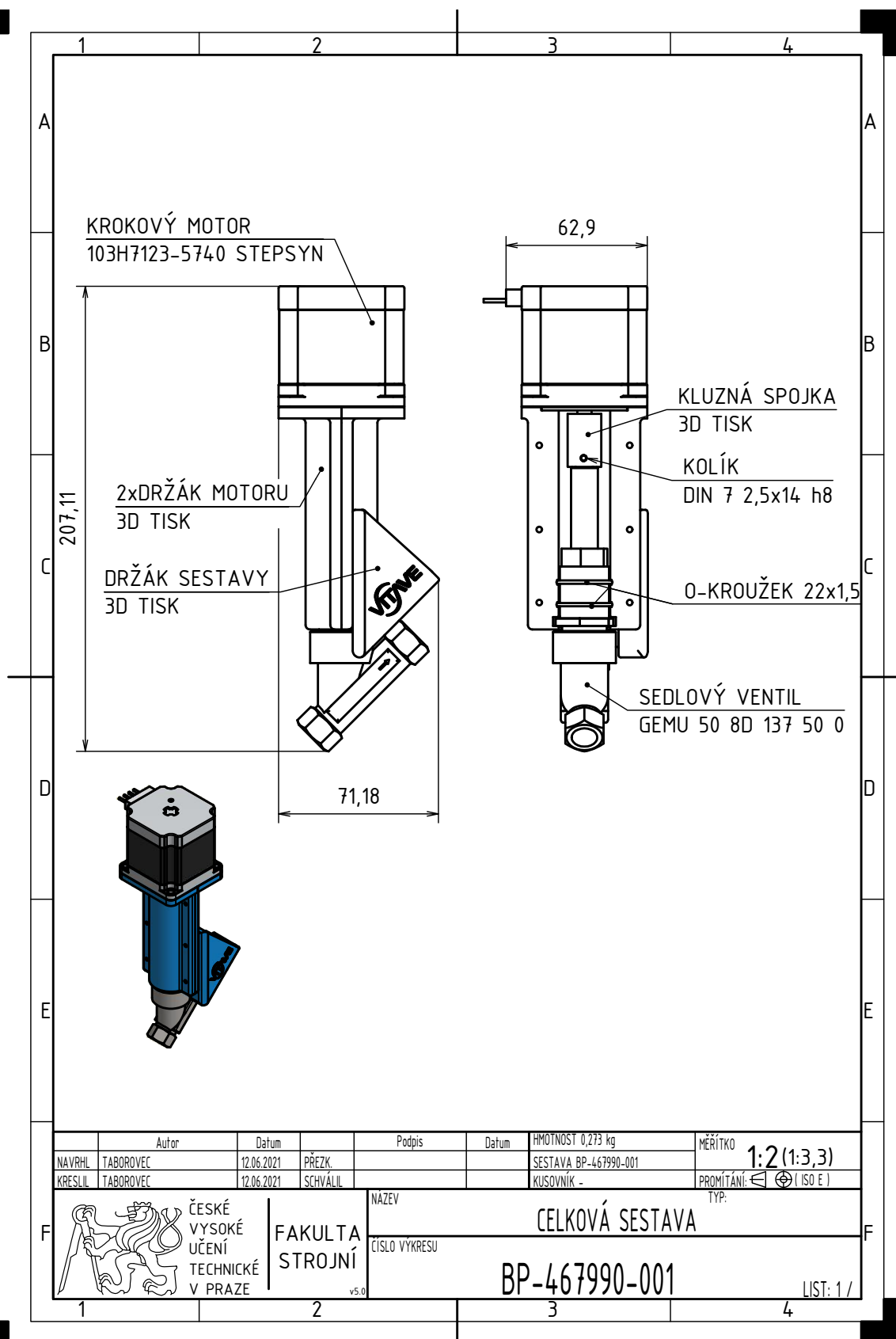
Obř. 6.2 Vykresová dokumentace k motoru [14]

Příloha 3 - Elektrické schéma řízení krokového motoru



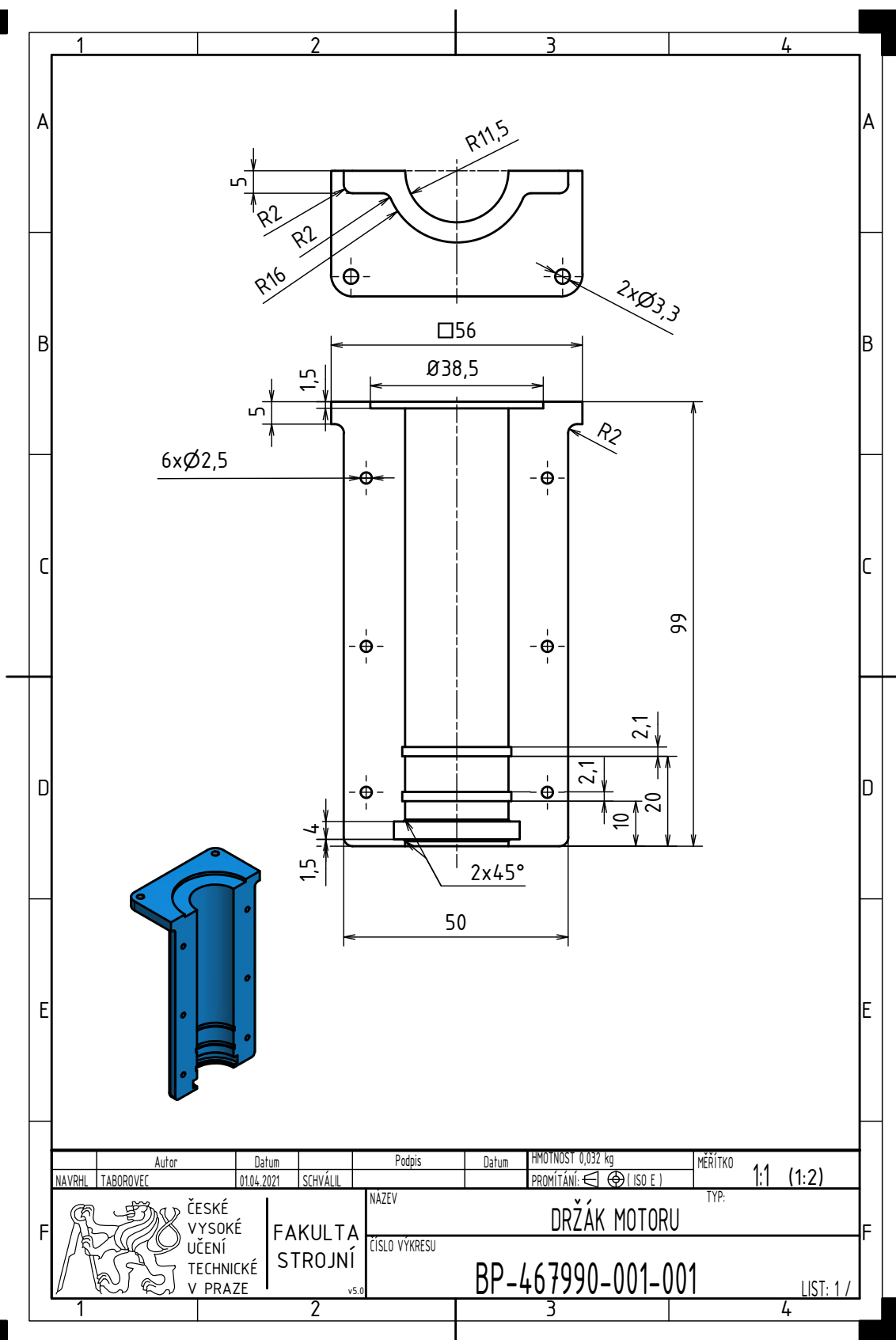
Obr. 6.3 Elektrické schéma sestavy řízení krokového motoru

Příloha 4 - Výkres sestavy



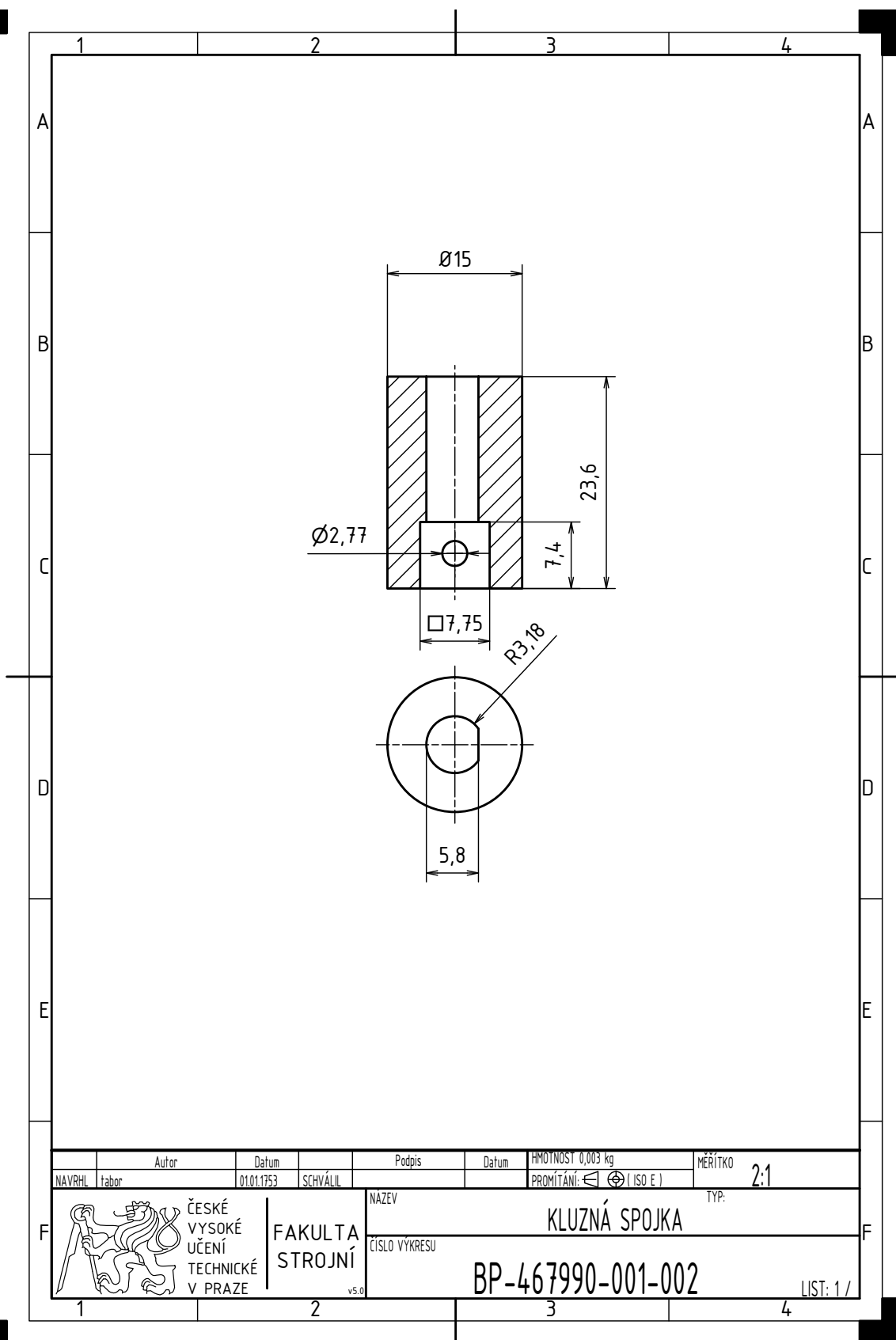
Obr. 6.4 Výkres sestavy

Příloha 5 - Výkres držáku motoru



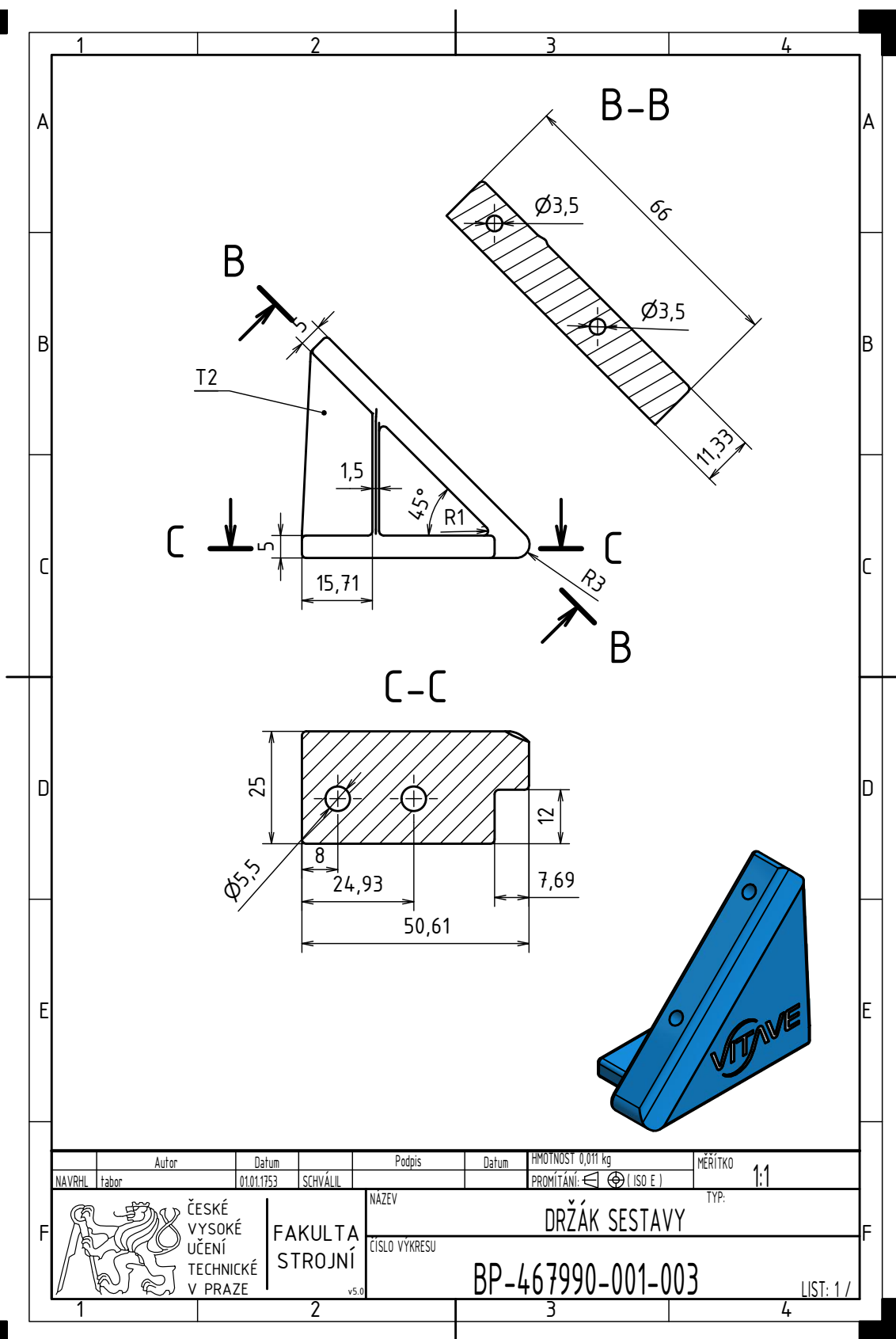
Obr. 6.5 Výkres držáku motoru

Příloha 6 - Výkres spojky



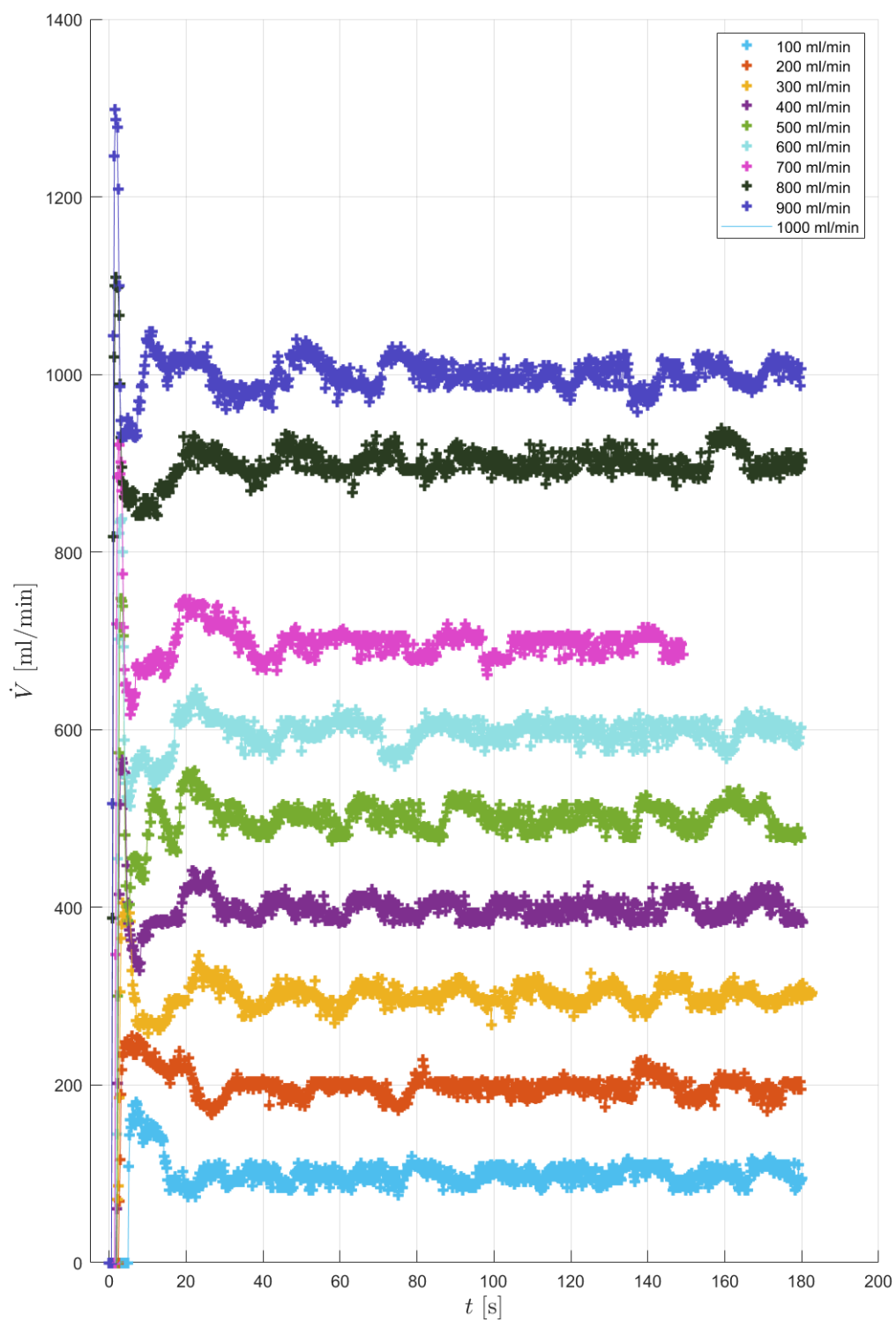
Obr. 6.6 Výkres spojky

Příloha 7 - Výkres držáku sestavy



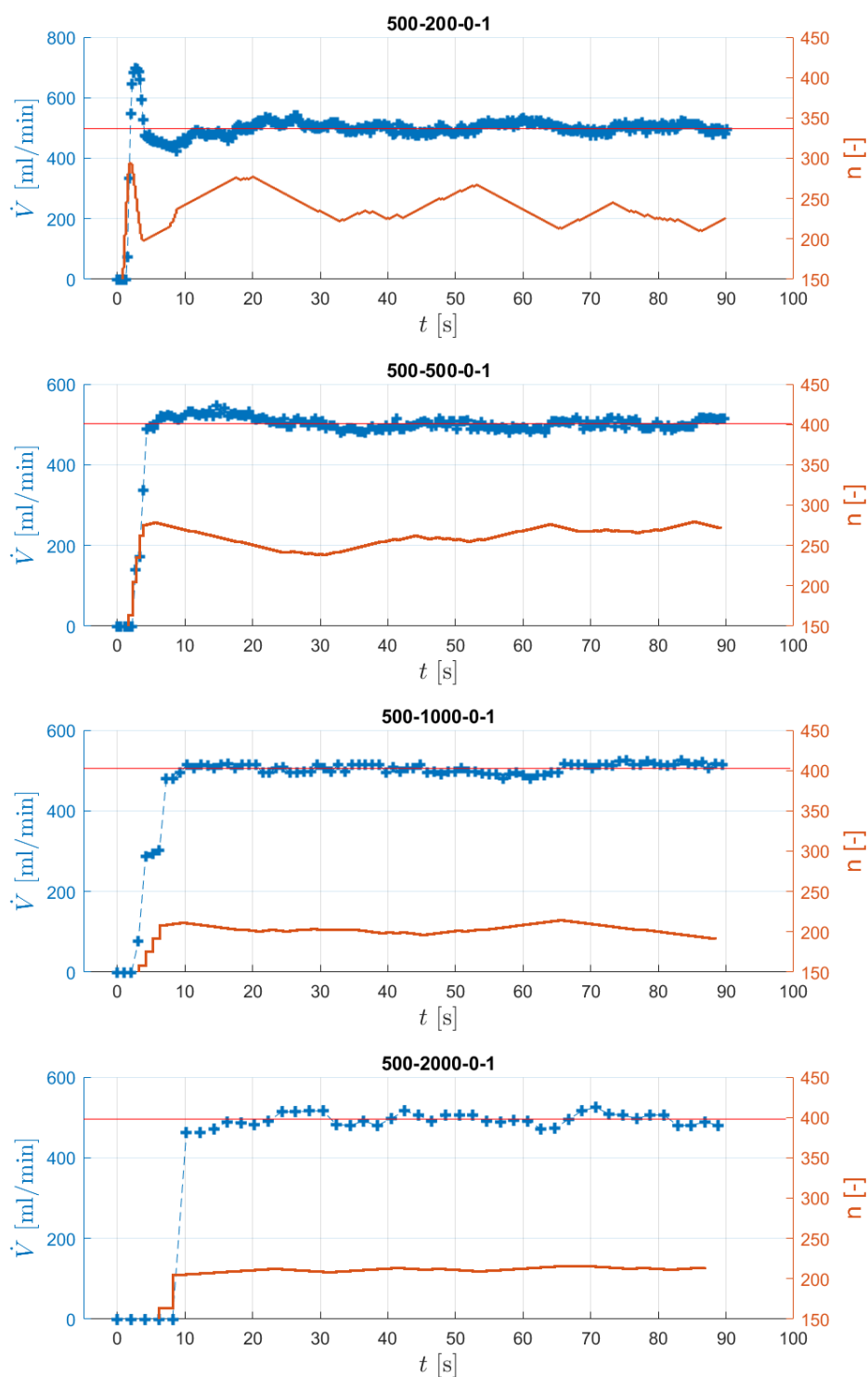
Obr. 6.7 Výkres držáku sestavy pro uchycení motoru na lištu

Příloha 8 - Nastavování průtoků

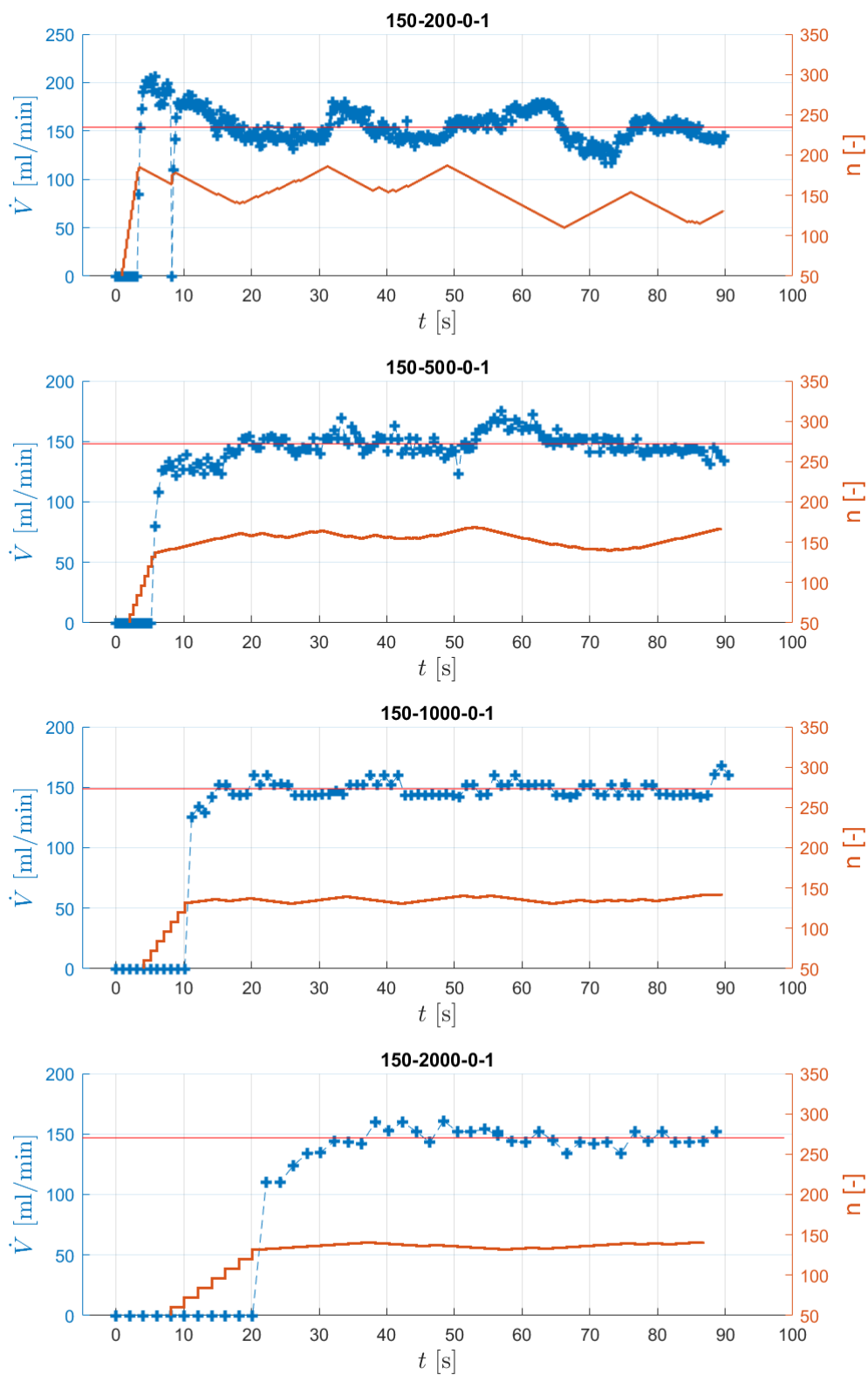


Obr. 6.8 Graf zobrazující regulaci průtoku pro různé nastavené hodnoty.

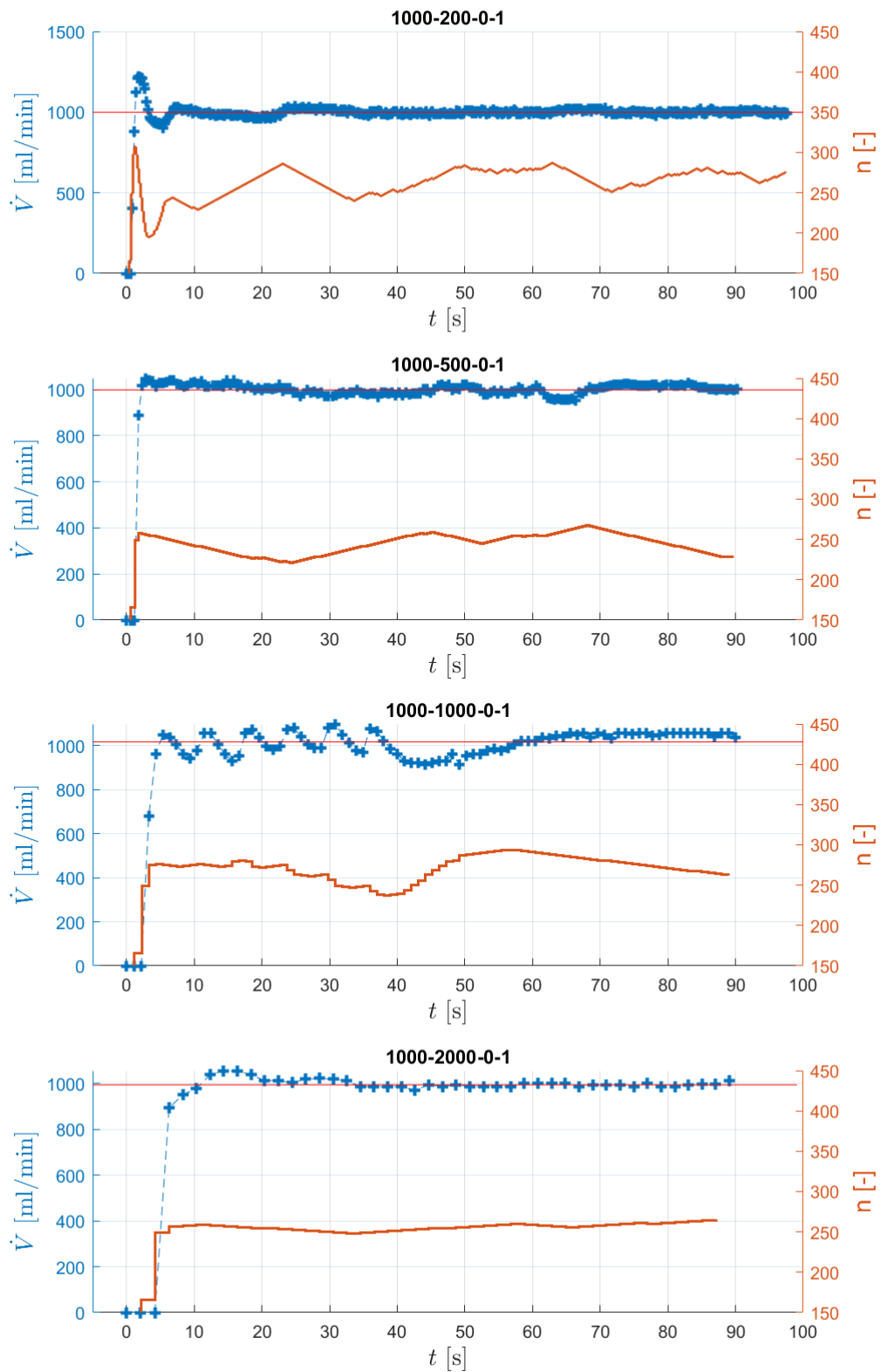
Příloha 9 - Měření optimálních parametrů krokového motoru



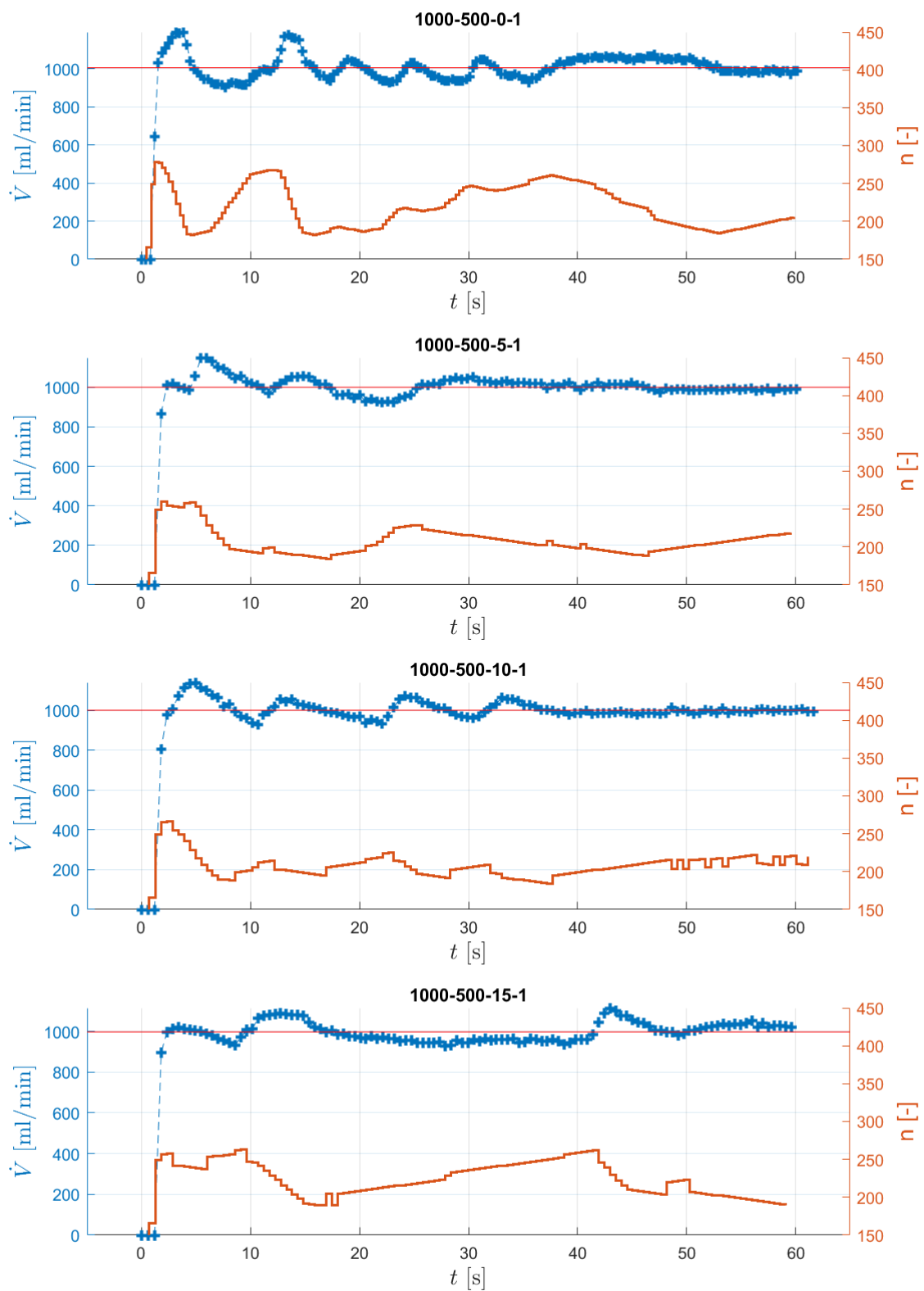
Obr. 6.9 Naměřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru pro 4 nastavení času zpoždění mezi zastavením motoru a přečtením hodnoty průtoku a to: 200 ms, 500 ms, 1000 ms a 2000 ms. Červenou čarou je zobrazena průměrná hodnota průtoku za posledních 30 sekund. Průtok nastaven na 500 ml/s



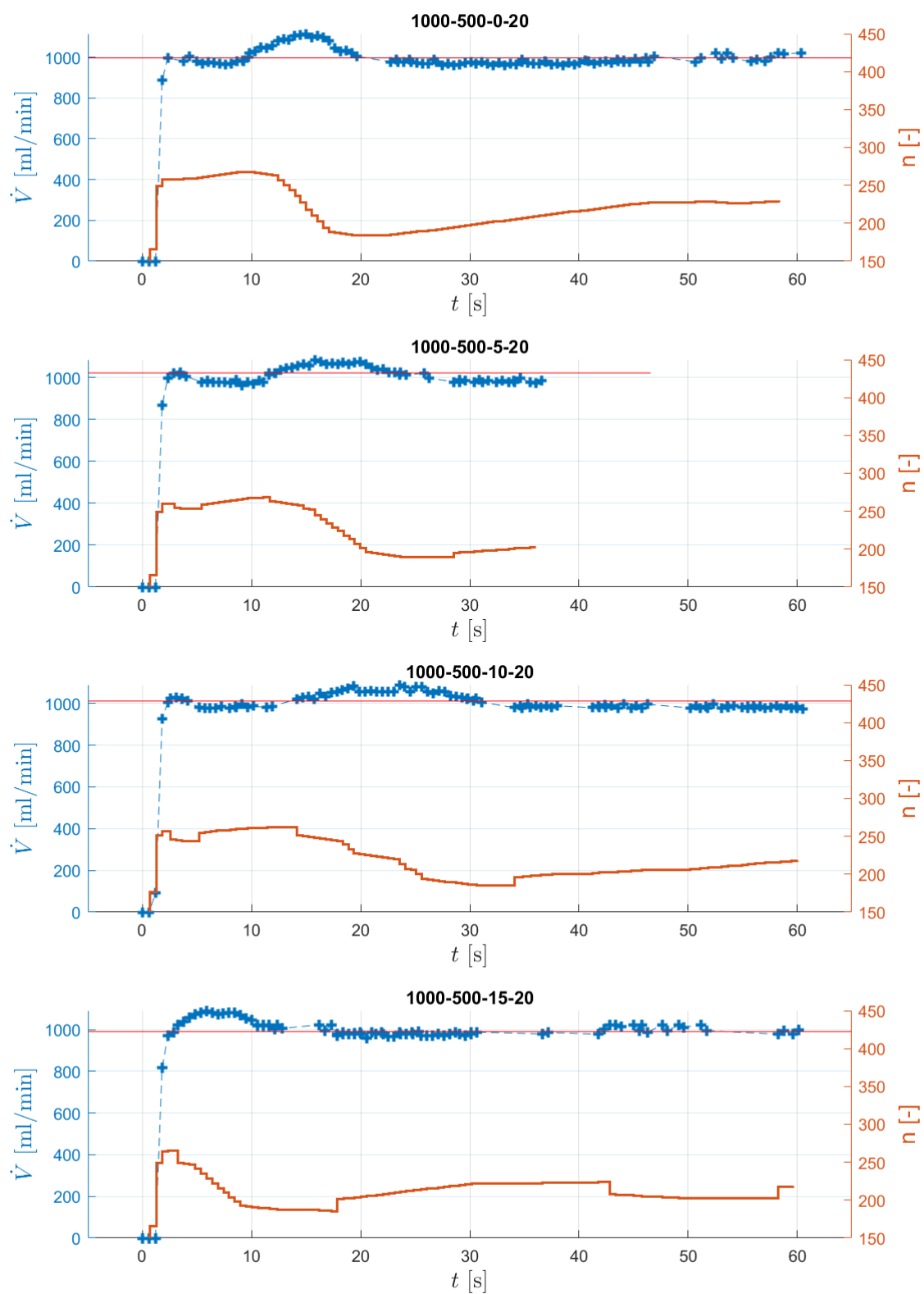
Obr. 6.10 Naměřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru pro 4 nastavení času zpoždění mezi zastavením motoru a přečtením hodnoty průtoku a to: 200 ms, 500 ms, 1000 ms a 2000 ms. Červenou čarou je zobrazena průměrná hodnota průtoku za posledních 30 sekund. Průtok nastaven na 150 ml/s



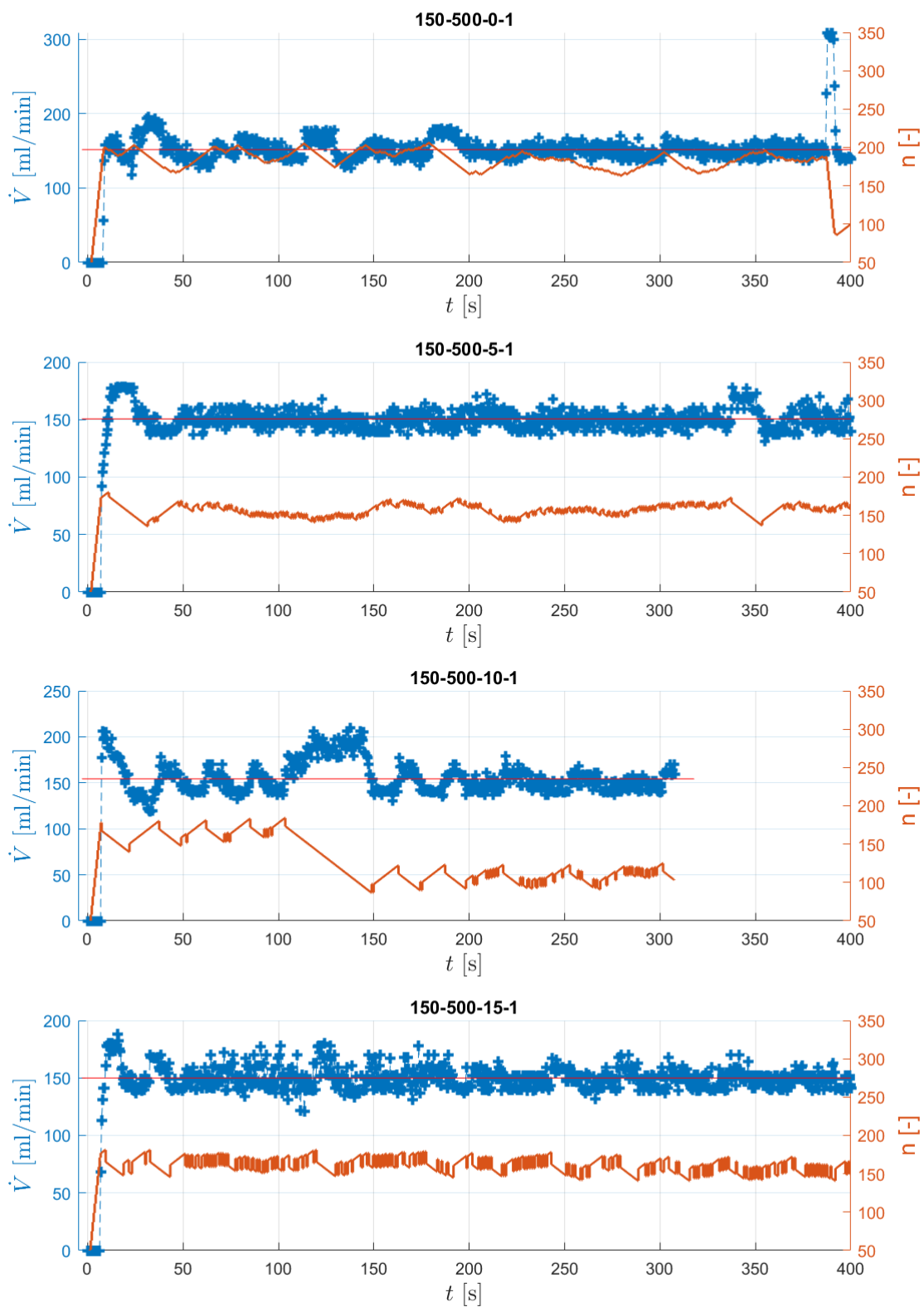
Obr. 6.11 Naměřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru pro 4 nastavení času zpoždění mezi zastavením motoru a přečtením hodnoty průtoku a to: 200 ms, 500 ms, 1000 ms a 2000 ms. Červenou čarou je zobrazena průměrná hodnota průtoku za posledních 30 sekund. Průtok nastaven na 1000 ml/s



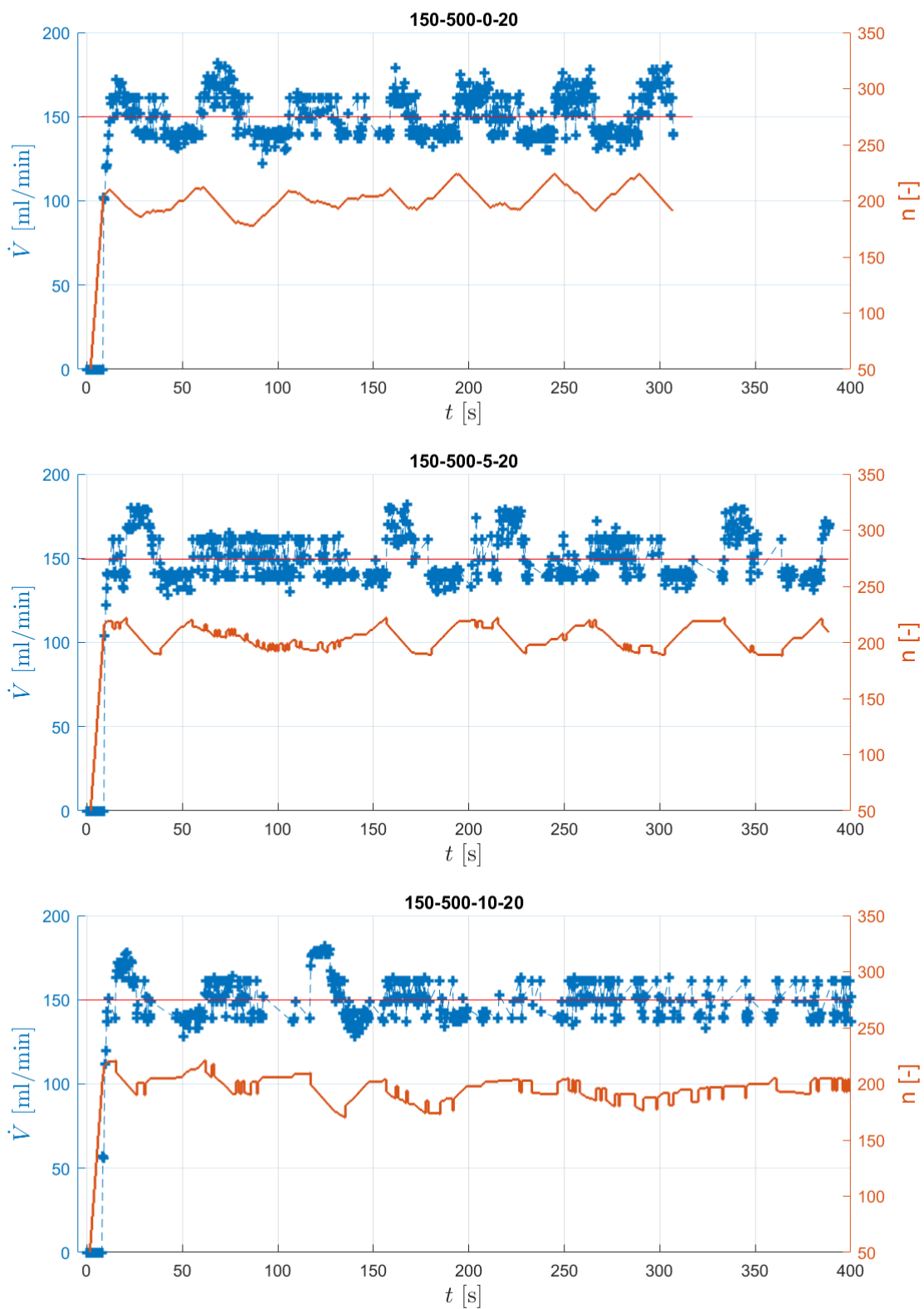
Obř. 6.12 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 1000ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků a 15 kroků. Červená přímka v grafu je průměrný průtok za posledních 20 sekund.



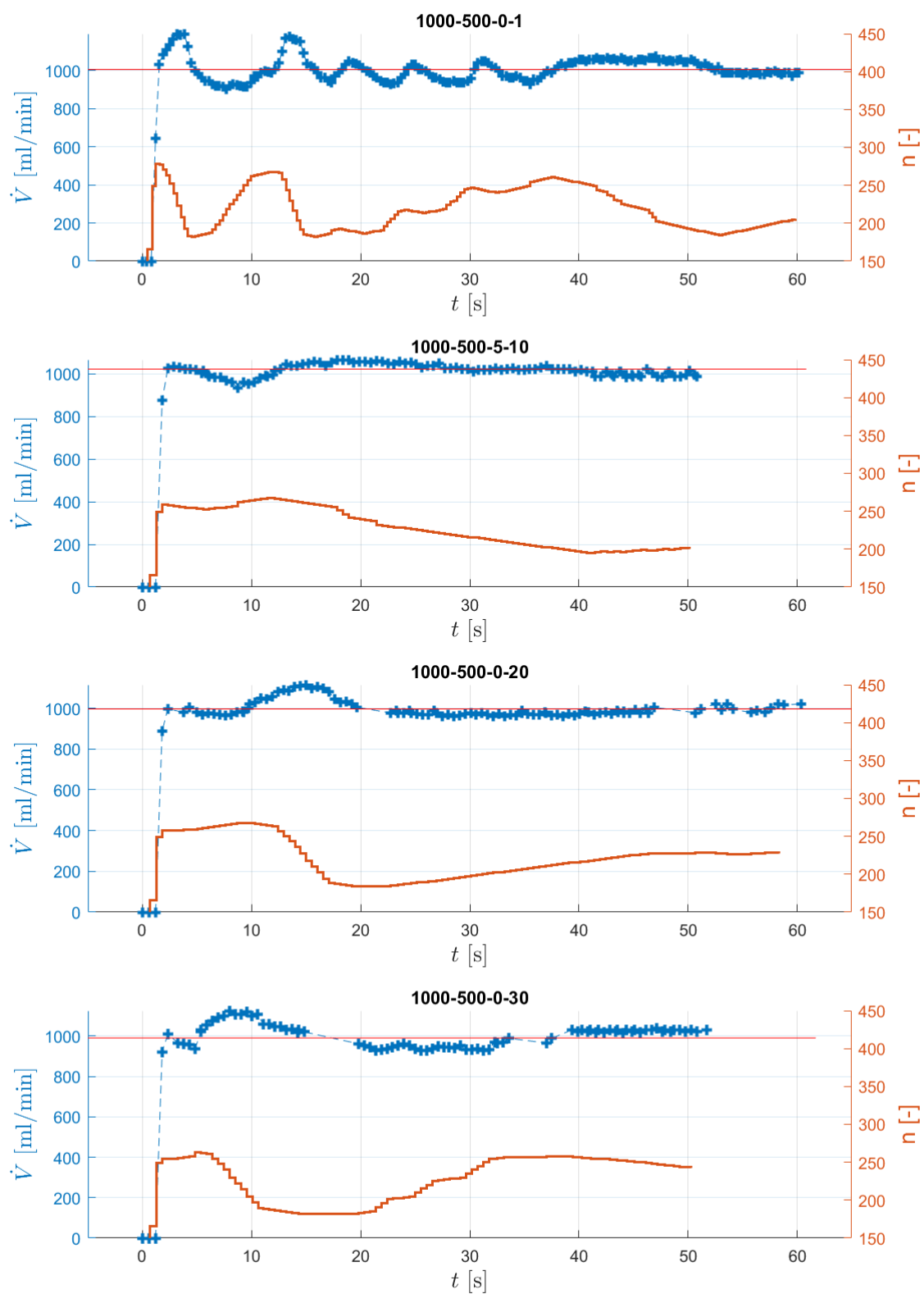
Obr. 6.13 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 1000ml/s, časové zpoždění 500 ms a povolenou $\delta = 20$ ml/s. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků a 15 kroků. Červená přímka v grafu je průměrný průtok za posledních 20 sekund.



Obr. 6.14 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 150 ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků a 15 kroků. Červená příčka v grafu je průměrný průtok za posledních 200 sekund



Obr. 6.15 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 150 ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků. Červená přímka v grafu je průměrný průtok za posledních 200 sekund



Obr. 6.16 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 150 ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavené hodnoty δ a to 1, 10, 20 a 30 ml/s. Červená přímka v grafu je průměrný průtok za posledních 20 sekund.

Seznam obrázků

Obr. 2.1	Vizualizace elektroporace buňky mezi dvěma elektrodami v silném elektrickém poli.	9
Obr. 2.2	Výsledky experimentu hlubokého zmrazování PEfovaného ovoce. [2]	10
Obr. 2.3	Porovnání doby sušení v závislosti na obsahu vody v ovoci při ošetření PE-Fem a bez ošetření. [2]	10
Obr. 2.4	Ukázka rozdílů při sušení neošetřeného a ošetřeného produktu [2]	10
Obr. 2.5	Laboratorní systém OMNIPEF ve verzi s Batch komorou [3]	11
Obr. 2.6	Batch komora, přizpůsobená pro ošetření tuhých produktů. [3]	11
Obr. 2.7	Průtoková komora pro ošetření kapalných produktů. Elektrody jsou pevné ve vzdálenosti 3 mm. [3]	11
Obr. 2.9	Ukázka bipolárních impulsů ± 10 kV	12
Obr. 2.8	OMNIPEF s průtokovou komorou s připojeným modulem OMNIPUMP [3] .	12
Obr. 2.10	Schématické zobrazení OMNIPEF zařízení v průtokové variantě.	13
Obr. 2.11	Ukázka HMI systému OMNIPEF. Horní panel dovoluje nastavit hodnoty napětí a parametry impulsu. Dole vpravo se nastavuje tlak a požadovaný průtok. Dolní levá část slouží pro kontrolu teploty elektroniky.	13
Obr. 2.12	Řez čtyř fázového krokového motoru s pasivním rotorem. Převzato z [6] . . .	14
Obr. 2.13	Schematické zobrazení magnetického pole uvnitř krokového motoru. Převzato z [4]	15
Obr. 2.14	Krokový motor s permanentním magnetem. Převzato z [7]	15
Obr. 2.16	Zapojení cívek hybridního krokového motoru a) unipolární, b) bipolarní, C) čtyřfázové	17
Obr. 2.17	Ukázka řízení dvoufázového motoru [7]	17
Obr. 2.18	Schématické zobrazení měření průtoku pomocí ultrazvuku [8]	19
Obr. 3.1	Schéma automatického řízení průtoku OMNIPUMP	21
Obr. 3.2	Ilustrace desky TMC2209 SilentStepStick s integrovaným driverem řízení TMC2209 od firmy Trinamic [12]	22
Obr. 3.3	Doporučená EMC ochrana driveru. Převzato z [5]	24
Obr. 3.4	Závislost momentu na řídicí frekvenci krokového motoru. Převzato z [14] . .	25
Obr. 3.5	Ukázka zavřeného ultrazvukového průtokoměru formy SONOTEC. Převzato z [17]	25
Obr. 3.6	Ukázka vložení trubky v níž bude probíhat měření průtoku do průtokoměru. Převzato z [17]	25
Obr. 3.7	Příprava CAM v programu PrusaSlicer pro 3D tisk držáků a spojky	27
Obr. 3.8	Výstupní piny VCU	27

Obr. 3.9	Ukázka modulární konstrukce pouzdra. 1 - propojovací HBUS lišta, 2 - držák na DIN lištu, 3 - PCB pouzdro, 4 - PCB, 5 - horní kryt. Převzato z [19]	28
Obr. 3.10	Ukázka spojení několika modulů pomocí HBUS lišty. Převzato z [19]	28
Obr. 3.11	Rozměrové pokyny pro rozměry PCB pro použité pouzdro. Převzato z [20]	29
Obr. 3.12	Kompletace zařízení	30
Obr. 3.13	Kompletace zařízení	31
Obr. 3.14	Algoritmus vykonaný při zapnutí VCU.	32
Obr. 3.15	Algoritmus řízení krokového motoru. V tomto algoritmu jsem schopen měnit čas pauzy a hodnotu δ pro nalezení optimálních hodnot	33
Obr. 4.1	Výpis všech registrů po příkazu "motor get"	35
Obr. 4.2	Detailní výpis napětí ADC	36
Obr. 4.3	Ukázka výpisu při automatické regulaci. Čísla zleva doprava značí: čas výpisu, požadovaný průtok, aktuální průtok, čas zastavení motoru, absolutní pozice vůči nule, otočení motoru v minulém kroku, požadovaný průtok, aktuální průtok, delta průtoku, a poslední krok motoru.	36
Obr. 4.4	Graf zobrazující zatížení krokového motoru v závislosti na otáčení. Hodnota SGR je parametr, který je čten z registru driveru a čím větší hodnota SGR je, tím méně je motor zatížen. V tomto případě by nulové hodnota SGR znamenala plné využití kroutícího momentu motoru, tj. v našem případě $1 \text{ N} \cdot \text{m}$	37
Obr. 4.5	Graf zobrazující hodnotu zatížení motoru v průběhu zavírání při reálném provozu.	38
Obr. 4.6	Graf závislosti průtoku \dot{V} hodnotě napětí U_{ADC} měřeného na ADC z průtokoměru. Naměřené hodnoty proloženy lineární závislostí $f(x) = A \cdot x + B$, kde koeficienty A, B , jsou uvedeny v 4.1	39
Obr. 4.7	Závislost naměřené hodnoty průtoku v závislosti na nastavené hodnotě automatické regulace při časovém zdržení regulace 200 ms a nastavené $\delta = 1 \text{ ml/min}$	40
Obr. 4.8	Graf závislosti průtoku \dot{V} v závislosti na počtu mikrokroků motoru. Lze si povšimnout hystereze při zavírání a otevírání motoru.	41
Obr. 4.9	Ostré testování automatizace řízení pro nastavené 150ml/min při výbojích 7.5 kV v komoře	44
Obr. 6.1	Elektrické schéma vývojové desky TMC2209 SilentStepStick. Převzato z [12]	47
Obr. 6.2	Vykresová dokumentace k motoru [14]	48
Obr. 6.3	Elektrické schéma sestavy řízení krokového motoru	49
Obr. 6.4	Výkres sestavy	50
Obr. 6.5	Výkres držáku motoru	51
Obr. 6.6	Výkres spojky	52
Obr. 6.7	Výkres držáku sestavy pro uchycení motoru na lištu	53
Obr. 6.8	Graf zobrazující regulaci průtoku pro různé nastavené hodnoty.	54

Obr. 6.9 Naměřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru pro 4 nastavení času zpoždění mezi zastavením motoru a přečtením hodnoty průtoku a to: 200 ms, 500 ms, 1000 ms a 2000 ms. Červenou čarou je zobrazena průměrná hodnota průtoku za posledních 30 sekund. Průtok nastaven na 500 ml/s	55
Obr. 6.10 Naměřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru pro 4 nastavení času zpoždění mezi zastavením motoru a přečtením hodnoty průtoku a to: 200 ms, 500 ms, 1000 ms a 2000 ms. Červenou čarou je zobrazena průměrná hodnota průtoku za posledních 30 sekund. Průtok nastaven na 150 ml/s	56
Obr. 6.11 Naměřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru pro 4 nastavení času zpoždění mezi zastavením motoru a přečtením hodnoty průtoku a to: 200 ms, 500 ms, 1000 ms a 2000 ms. Červenou čarou je zobrazena průměrná hodnota průtoku za posledních 30 sekund. Průtok nastaven na 1000 ml/s	57
Obr. 6.12 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 1000ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků a 15 kroků. Červená přímká v grafu je průměrný průtok za posledních 20 sekund.	58
Obr. 6.13 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 1000ml/s, časové zpoždění 500 ms a povolenou $\delta = 20$ ml/s. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků a 15 kroků. Červená přímká v grafu je průměrný průtok za posledních 20 sekund.	59
Obr. 6.14 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 150 ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků a 15 kroků. Červená přímká v grafu je průměrný průtok za posledních 200 sekund	60
Obr. 6.15 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 150 ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavení velikosti okamžitého pootočení krokového motoru při změně směru a to: 0 kroků, 5 kroků, 10 kroků. Červená přímká v grafu je průměrný průtok za posledních 200 sekund	61
Obr. 6.16 Změřený časový vývoj průtoku \dot{V} a stavu otočení motoru n pro nastavený průtok 150 ml/s a časové zpoždění 500 ms. Měření provedeno pro 4 nastavené hodnoty δ a to 1, 10, 20 a 30 ml/s. Červená přímká v grafu je průměrný průtok za posledních 20 sekund.	62

Seznam tabulek

Tab. 3.1	Tabulka parametrů řídicí desky TMC2209 SilentStepStick [12]	22
Tab. 3.2	Výpis registrů driveru krokového motoru potřebné pro práci. Plný výpis driveru na [11]	23
Tab. 3.3	Výpis technických parametrů zvoleného průtokoměru CO55-R12K-M120-V2 [17]	26
Tab. 3.4	Tabulka popisu PINu pro komunikaci z VCU. Piny jsou zobrazeny na Obr.3.8	29
Tab. 4.1	Tabulka všech příkazů, pomocí kterých mohu snímat parametry motoru a ručně ho ovládat.	34
Tab. 4.2	Naměřené a zpracované hodnoty automatické regulace průtoku, pro 3 různé zadané průtoky (1000, 500, 150 ml/min) pro 4 různé hodnoty časového zdržení mezi provedením rotace motoru a snímáním další hodnoty průtoku. Jednotlivé měření jsou graficky zobrazeny na Obr. 6.10, Obr. 6.9 a Obr. 6.11. Jsou vyhodnoceny průměrné hodnoty a je jejich odchylka, maximální a minimální hodnota průtoku během regulace a časová konstanta τ	42
Tab. 4.3	Naměřené hodnoty průtoku pro proměnnou hodnotu n_{back} . Celý průběh měření lze nalézt na Obr.6.12 a Obr.6.13, Obr.6.13 pro 1000ml/s a Obr.6.14, ze který byl stanoven průměrný průtok, jeho odchylka a následně časová konstanta τ	43
Tab. 4.4	Naměřené hodnoty průtoku pro proměnnou hodnotu δ . Celý průběh měření lze nalézt na Obr.6.16, ze který byl stanoven průměrný průtok, jeho odchylka a následně časová konstanta τ	44

Seznam použité literatury

- [1] SYED, Q. A. *Pulsed electric field technology in food preservation: a review* [online]. Journal of Nutritional Health Food Engineering, 06.2017. Dostupné z: <https://medcraveonline.com/JNHFE/JNHFE-06-00219.pdf>.
- [2] WITT, J. et al. *Industrial application of Pulsed Electric Fields (PEF) in the food industry* [online]. Elea Technology, 09.2016. [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/308366941_Industrial_application_of_Pulsed_Electric_Fields_PEF_in_the_food_industry.
- [3] *OMNIPEF Pulsed Electric Fields System for lab use* [online]. VITAVE Tech. [cit. 03.07.2021]. Dostupné z: <https://www.vitave.com/products/pef-systems/omnipec>.
- [4] TAKASHI, K. *Stepping motors and their microprocessor control*. Oxford: Clarendon Press, 1984. ISBN 978-0198593850.
- [5] *TMC2209-la Datasheet* [online]. TRINAMIC Motion Control. [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2209-la/>.
- [6] RYDLO, P. *Krokové motory a jejich řízení - Studijní texty* [online]. 2000. [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: <http://cis.wz.cz/elz/krok2.pdf>.
- [7] EMELJANOV, A. V. *Shagovye Dvigateli*. RPK Politechnik, 2005. ISBN 5-230-04591-4.
- [8] *Measurement of fluid flow in closed conduits — Ultrasonic transit-time meters for liquid* [online]. International organization of standardization. [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12242:ed-1:v1:en>.
- [9] VLČEK, J. *D/A a A/D převodníky* [online]. [cit. 15.03.2021]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_da_ad_prevodniky.pdf.
- [10] REK, T. *Analyzátor AD převodníků*. Univerzita Pardubice, 2009, Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/34869/RekT_Analyzator_AD_MH_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [11] *TMC2209 - technical details* [online]. TRINAMIC Motion Control. [cit. 02.04.2021]. Dostupné z: <https://www.trinamic.com/products/integrated-circuits/details/tmc2209-la/#technical-details>.
- [12] *TMC2209 SilentStepStick Datasheet* [online]. TRINAMIC Motion Control. [cit. 02.05.2021]. Dostupné z: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Eval_Documents/TMC2209_SilentStepStick_Rev1.10.pdf.
- [13] PATEL, T. *Select the Right Varistors for Overvoltage Circuit Protection* [online]. [cit. 02.05.2021]. Dostupné z: <https://www>.

- electronicdesign.com/power-management/article/21800530/
select-the-right-varistors-for-overvoltage-circuit-protection .
- [14] *2-Phase Stepping Motor SANMOTION F2* [online]. Sanyodenki products, 2005. [cit. 07.06.2021]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2074956.pdf> .
- [15] *NEMA ICS 16 Industrial Control and Systems* [online]. National Electrical Manufacturers Associaton, 2001. [cit. 07.06.2021]. Dostupné z: <http://www.cncitalia.net/file/pdf/nemastandard.pdf> .
- [16] *Ultrasonic sensors for bioprocess pharmaceutical applications* [online]. SONOTEC CO. [cit. 09.06.2021]. Dostupné z: https://www.sonotec.eu/fileadmin/user_upload/business_units/1-non-invasive-fluid-monitoring/products/ultrasonic-flow-meter/fl-ultrasonic-sensors-for-bioprocess-and-pharma-en-sonotec.pdf .
- [17] *Technical Data Sheet, SONOFLOW® CO.55/xxx(H) V2.0* [online]. SONOTEC CO. [cit. 09.06.2021]. Dostupné z: https://www.sonotec.eu/fileadmin/user_upload/business_units/1-non-invasive-fluid-monitoring/products/ultrasonic-flow-meter/sonoflow-co-55/td-sonoflow-co-55-v2-0-en-sonotec.pdf .
- [18] *13-Bit Differential Input, Low Power A/D Converter with SPI Serial Interface* [online]. Microchip. [cit. 11.06.2021]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1486116.pdf> .
- [19] *Mounting base housing - BC 161,6 UT HBUS KMGY - 1227345* [online]. Phoenix Contact. [cit. 11.06.2021]. Dostupné z: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/gb/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=1227345&library=gben&pcck=P-01-12-02-01&tab=1&selectedCategory=ALL> .
- [20] *Mounting base housing - BC 161,6 UT HBUS KMGY - 1227345* [online]. Phoenix Contact. [cit. 11.06.2021]. Dostupné z: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/gb/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=1227345&library=gben&pcck=P-01-12-02-01&tab=1&selectedCategory=ALL> .
- [21] *Dual-Channel Digital Isolators ADuM1200/ADuM1201 Data Sheet* [online]. ANALOG DEVICES. [cit. 03.07.2021]. Dostupné z: https://eu.mouser.com/datasheet/2/609/ADuM1200_1201-279454.pdf .
- [22] *Hot Swappable, Dual I2C Isolators ADuM1250/ADuM1251 Data Sheet* [online]. ANALOG DEVICES. [cit. 03.07.2021]. Dostupné z: https://eu.mouser.com/datasheet/2/609/ADUM1250_1251-1503560.pdf .