

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra teorie obvodů



Diplomová práce

Firmware lékařského terapeutického laserového scanneru

Firmware for Medical Therapeutic Laser Scanner

Autor: Bc. Matyáš Pokorný

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Radil, Ph.D.

Garant za FEL: Ing. Jan Havlík, Ph.D.

Studijní program: Lékařská elektronika a bioinformatika

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pokorný** Jméno: **Matyáš** Osobní číslo: **510867**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**
Specializace: **Lékařská technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Firmware lékařského terapeutického laserového scanneru

Název diplomové práce anglicky:

Firmware for Medical Therapeutic Laser Scanner

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte existující řešení řízení 2-osého rozmitání terapeutického výkonového laseru.
- 2) Porovnejte výhody a nevýhody různých typů řízení pohonů.
- 3) Navrhněte regulátor pro řízení pohonů a stanovte parametry, které takové řízení musí splňovat s ohledem na cílovou aplikaci.
 - Pro scanovací terapie se používají pulzní lasery s typickými parametry:
 - frekvence 1 - 20 000 Hz
 - délka pulzu 20 μ s - 10 ms
 - Oblast rozmitání je typicky max. 20 x 20 mm. Paprsek je obvykle rozmitán po několika předdefinovaných trajektoriích.
- 4) Implementujte regulátor na platformě STM32. Charakterizujte a ověřte implementovaný regulátor.
- 5) Firmware bude součástí zdravotnického prostředku. Zhodnoťte aplikovatelné požadavky normy IEC 62304, které se na takovýto firmware vztahují.

Seznam doporučené literatury:

- [1] IEC 62304:2006+AMD1:2015. Medical device software - Software life cycle processes. Edition 1.1. International Electrotechnical Commission, 2015.
- [2] BENNER, William R. LASER SCANNERS: Technologies and Applications: How they work, and how they can work for your product. Pangolin, 2016. ISBN 978-0692747773.
- [3] NOVIELLO, Carmine. Mastering STM32: A step-by-step guide to the most complete ARM Cortex-M platform, using the official STM32Cube development environment [online]. Second Edition. 2022. Dostupné také z: <https://leanpub.com/mastering-stm32-2nd>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Radil, Ph.D. BTL Medical Solutions, a.s. , Praha

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

Ing. Jan Havlík, Ph.D. katedra teorie obvodů FEL

Datum zadání diplomové práce: **19.01.2023** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2024**

Ing. Tomáš Radil, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 8.1.2024

.....

Matyáš Pokorný

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Tomáši Radilovi, Ph.D. za jeho četné rady a připomínky, zejména k problematice normy IEC 62304. Dále děkuji vývojářům BTL Medical Technologies, a.s. za poskytnutou podporu a zázemí pro tvorbu práce.

Děkuji Ing. Jakubovi Horáčkovi z centra HiLASE FZU AV ČR za jeho mimořádnou vstřícnost v plánování pracovní doby, která mi umožnila studovat při zaměstnání a vytvořit tuto práci.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a vývojem software pro řízení galvanometrů laserového skeneru vyvíjeného pro použití v estetické medicíně. V úvodu je popsána technologie galvanometrických aktuátorů a způsobů jejich řízení. Dále je stručně popsána problematika vývoje software pro lékařská zařízení dle normy IEC 62304.

Na základě matematického modelu galvanometru a simulací je navržen číslicový regulátor pro řízení galvanometrů. Regulátor má strukturu modifikovaného PID regulátoru. Navržené řešení je následně implementováno pro mikrokontroler STM32 a otestováno pomocí osciloskopu. Implementované řešení splnilo požadavky stanovené na základě potřeb dané aplikace. Řešení je použitelné pro skenování pulsních laserů s opakovací frekvencí maximálně 100 Hz.

Klíčová slova: laserový skener, galvomotor, regulace, zpětnovazební řízení, PID regulátor

Abstract

The topic of this thesis is design and development of control system for a galvanometer powered laser scanner which is being developed for the use in aesthetic medicine. The introduction describes the technology of galvanometer actuators and methods employed for controlling them. A brief introduction to the topic of medical software development according to IEC 62304 is provided.

Using a mathematical model of galvanometer and simulations a digital controller is developed for galvanometer control. The controller features a modified PID algorithm. The designed solution is then implemented in software on STM32 microcontroller and tested using oscilloscope. The implemented solution satisfied the requirements given by the target application. The solution can be used for scanning of pulsed laser sources with maximum repetition frequency of 100 Hz.

Keywords: laser scanner, galvomotor, control system, feedback control, PID controller

Seznam použitých zkratek

ADC	Analogovo-digitální převodník
CPU	Centrální procesorová jednotka
DAC	Digitálně-analogový převodník
DMA	Přímý přístup do paměti
GPIO	Universální vstupní/výstupní rozhraní
HAL	Hardwarová abstrakční vrstva
PID	Proporčně integračně derivační (regulátor)
PWM	Pulsně šířková modulace
SOUP	Software neznámé provenience
USART	Universální synchronní/asynchronní přijímač a vysílač

Seznam obrázků

Obrázek 1: Galvomotor firmy ScannerMax, model Compact-506 s připevněným zrcátkem[8]	19
Obrázek 2: Vnitřní uspořádání galvomotoru ScannerMax Compact 506 [9, s. 114].....	19
Obrázek 3: Lineární Model galvanometru s restorativním momentem	20
Obrázek 4: Geometrické uspořádání skeneru s galvomotory.....	21
Obrázek 5: Uspořádání galvomotorů pro dvojrozměrné skenování [11]	22
Obrázek 6: Kaskádní struktura řízení galvanometru [3, s. 170]	23
Obrázek 7: Dopředné řízení	24
Obrázek 8: Zpětnovazební řízení	24
Obrázek 9: Regulační obvod s dopřednou a zpětnovazební větví	24
Obrázek 10: Princip napěťového a proudového řízení galvanometrů	25
Obrázek 11: Analogová realizace PID regulátoru s jedním operačním zesilovačem[13]	26
Obrázek 12: Vývojový diagram třídění software do bezpečnostních tříd dle IEC62304 [17]	29
Obrázek 13: Rozdělení systému na software objekty a jejich klasifikace do bezpečnostních tříd [15]	30
Obrázek 14: Trajektorie pro označení ošetřované oblasti Počáteční bod zvýrazněn červeně.	34
Obrázek 15: Trajektorie pro pokrytí ošetřované oblasti – esovitý vzor. Počáteční bod zvýrazněn červeně	35

Obrázek 16: Trajektorie pro pokrytí ošetřované oblasti – pseudonáhodný vzor. Pořadí skenování označeno popisem u bodů. Počáteční bod zvýrazněn červeně	35
Obrázek 17: Diagram požadovaného stavového automatu.....	36
Obrázek 18: Naměřená přechodová charakteristika soustavy	39
Obrázek 19: Porovnání odezvy galvanometru a modelu s původními a odhadnutými parametry	39
Obrázek 20: Prototyp driveru	41
Obrázek 21: Zjednodušené blokové schéma skeneru	41
Obrázek 22: Charakteristika filtru zpětné vazby	44
Obrázek 23: Schéma úvodní simulace zpětnovazebního řízení	45
Obrázek 24: Simulované odezvy veličin v řídicí smyčce s úvodními parametry.....	46
Obrázek 25: Schéma simulace zpětnovazebního řízení s modifikací D složky	47
Obrázek 26: Simulované odezvy veličin v řídicí smyčce s modifikovanou D složkou	48
Obrázek 27: Simulované odezvy veličin v modifikované řídicí smyčce s upravenými konstantami	49
Obrázek 28: Schéma simulace zpětnovazebního řízení s modifikací D složky a omezením rychlosti změny požadované hodnoty.....	50
Obrázek 29: Simulované odezvy veličin v řídicí smyčce s omezením rychlosti změny požadované veličiny	50
Obrázek 30: Amplitudová a frekvenční charakteristika soustavy s vyznačenými hodnotami rezervy fáze a zesílení.....	52
Obrázek 31: Diagram programu.....	54
Obrázek 32: Diagram hlavního stavového automatu.....	56
Obrázek 33: Stav H-můstku[24]	58
Obrázek 34: Diagram funkce <i>NextStep</i>	60
Obrázek 35: Diagram automatu pro kontrolu regulačních odchylek.....	61
Obrázek 36: Diagram automatu pro nastavování signálu CPU_Ready	62
Obrázek 37: Naměřená odezva osy X - plný pracovní rozsah	65
Obrázek 38: Naměřená odezva osy Y - plný pracovní rozsah.....	65
Obrázek 39: Naměřená odezva osy X - malý krok	66
Obrázek 40: Naměřená odezva osy Y - malý krok	67
Obrázek 41: Naměřený časový diagram vzoru čtverec - bez terapie	68
Obrázek 42: Naměřený časový diagram esovitého vzoru - s terapií.....	69
Obrázek 43: Naměřený časový diagram pseudonáhodného vzoru - s terapií	70
Obrázek 44: Naměřený časový diagram selhání galvanometru při skenování esovitého vzoru - s terapií	71
Obrázek 45: Záznam sériové komunikace.....	72

Seznam tabulek

Tabulka 1: Veličiny vystupující v modelu galvanometru.....	21
Tabulka 2: Příklad analýzy rizik	32
Tabulka 3: Tabulka hodnot parametrů galvanometru ScannerMax Compact 506	40
Tabulka 4: Úvodní konstanty PID regulátoru	45
Tabulka 5: Upravené konstanty regulátoru	48
Tabulka 6: Póly uzavřené regulační smyčky.....	51
Tabulka 7: Význam příkazů, odpovědí a zpráv komunikačního rozhraní	63
Tabulka 8: Zapojení osciloskopu pro ověření funkcionality	64

Obsah

Úvod	15
1. Technologie laserových skenerů	16
1.1. Elektro-optické modulátory	16
1.2. Akusticko-optické modulátory	16
1.3. Skenery s galvanometry	17
2. Řízení galvanometrických aktuátorů.....	23
2.1. Dopředné a zpětnovazební řízení.....	23
2.2. Napěťové a proudové řízení.....	25
2.3. Analogová a digitální realizace řízení	26
3. Požadavky na firmware laserového skeneru dle IEC 62304.....	27
3.1. Obecné požadavky IEC 62304	27
3.2. Klasifikace software do bezpečnostních tříd.....	27
3.3. Požadavky na procesy v životním cyklu software	30
3.4. Analýza rizik spojených se software skeneru	31
3.5. Klasifikace software skeneru do bezpečnostní třídy	33
4. Stanovení požadavků na software skeneru	34
5. Návrh řízení galvanometru	38
5.1. Modelování galvanometru ScannerMax Compact 506	38
5.2. Popis hardware	40
5.3. Omezení návrhu regulace plynoucí z použitého hardware.....	42
5.4. Snímání senzorů úhlu natočení	42
5.5. Filtrace snímaného úhlu	43
5.6. Návrh regulátoru úhlu natočení galvomotoru	44
6. Popis implementace řízení skeneru na platformě STM32	53
6.1. Sekvenční řízení.....	53

6.2.	Hlavní smyčka	54
6.3.	Měření a zpracování hodnot výstupní veličiny	56
6.4.	Regulátor	57
6.5.	Buzení galvomotorů pomocí H-můstku	58
6.6.	Skenování vzorů	59
6.7.	Kontrola regulační odchylky	60
6.8.	Komunikace	62
7.	Ověření navrženého řešení	64
7.1.	Ověření regulátoru	64
7.2.	Ověření skenování a kontroly regulačních odchylek	67
7.3.	Ověření komunikace	72
	Diskuse výsledků	73
	Závěr	74
	Použitá literatura	75
	Příloha 1- Schéma zapojení buzení galvomotoru [25]	78
	Příloha 2 - Zapojení senzoru natočení rotoru galvanometru [25]	79
	Příloha 3 – Zapojení mikrokontroleru [25]	80
	Příloha 4 – Seznam implementovaných funkcí a struktur	81
	Příloha 5 – Seznam elektronických příloh	82

Úvod

Od vynálezu laseru v 60. letech minulého století pronikají postupně laserové technologie do mnoha odvětví lidské činnosti. Jednou z významně ovlivněných oblastí je také lékařství a estetická medicína. Poměrně mladým přírůstkem do rodiny metod estetické medicíny je takzvaná frakční laserová terapie.

Princip této metody spočívá ve způsobení velmi malých cílených poranění ošetřované tkáně - kůže pomocí laserových mikropaprsků. Laser proniká pouze do svrchní a střední vrstvy kůže. Poranění se tak velmi rychle hojí. Toto cílené poranění stimuluje tvorbu kolagenu a po zhojení dochází k napnutí kůže. V oblasti estetické medicíny se proto využívá k ošetření defektů jako jsou drobné vrásky, jizvy, ale také pigmentové skvrny[1].

Jednou z technik používaných pro zlepšení výsledků laserové terapie je skenování laserových svazků. Laserový svazek je automaticky rozmítán po ploše ošetřované tkáně pomocí zařízení, které se nazývá laserový skener. Skenování svazku umožňuje velmi přesné dávkování terapie. Předchází tak nerovnoměrné aplikaci laserového záření a z toho plynoucích negativních důsledků, jako je nadměrné poškození ošetřované tkáně[2].

Cílem této práce je prozkoumat problematiku rozmítání laserových svazků pomocí galvanometrických skenerů, a získané poznatky aplikovat při návrhu a vývoji firmware pro digitální řízení takového skeneru. Firmware má sloužit k řízení prototypu laserového skeneru vyvíjeného výrobcem lékařských a estetických přístrojů.

1. Technologie laserových skenerů

Pro směřování laserových svazků lze použít celou řadu fyzikálních principů. Mezi používanými technologiemi jsou dramatické rozdíly v dosažitelných rychlostech, skenovacích úhlech, složitosti řízení a zejména finanční náročnosti. Zde je uveden stručný výčet nepoužívanějších technologií. Větší pozornost je dále věnována skenerům s galvanometri

1.1. Elektro-optické modulátory

Elektro-optické modulátory jsou zařízení založená na principu modulace optických vlastností materiálu – indexu lomu, pomocí elektrického pole. Sestávají z elektro-opticky aktivního krystalu, na který jsou přiloženy řídicí elektrody, a případně také z dalších optických prvků, jako jsou například polarizátory.[3, s. 21], [4]

Velkou výhodou skenerů s elektro-optickými modulátory je absence pohyblivých částí, a z toho plynoucí potenciál pro vysoké skenovací rychlosti (až stovky kHz). Výhodou je také relativně vysoká optická propustnost (~90%) a schopnost pracovat s různými vlnovými délkami. Hlavní nevýhodou elektro-optických systémů je velmi vysoká cena (řádově statisíce Kč pro dvouosý skenovací systém včetně řídicí elektroniky) a relativně nízké skenovací úhly, typicky menší než 1°.[3]

1.2. Akusticko-optické modulátory

Akusticko-optické modulátory pracují na principu difrakční mřížky v optickém médiu, typicky v materiálu podobném sklu (TeO_2 , PbMoO_4). Difrakční mřížka není statická, ale je způsobena lokálními změnami indexu lomu optického média v důsledku podélného mechanického vlnění šířícího se materiálem. Toto mechanické vlnění je aktivně vytvářeno, typicky piezoelementem, na jedné straně média. Na protější straně je umístěn mechanický absorbér, který vlnění pohlcuje, aby nedocházelo ke zpětnému odrazu. Takto vytvořená difrakční mřížka se tedy neustále pohybuje směrem od vysílače k absorbéru, a její periodu lze dynamicky měnit změnou budící frekvence. Tato frekvence se pohybuje v řádu desítek MHz až jednotek GHz [5].

Hlavní předností akusticko-optických modulátorů je vysoká skenovací rychlost (kolem 100 kHz) a možnost měnit intenzitu výstupního svazku. Použití těchto modulátorů pro skenování

1. Technologie laserových skenerů

záření s různými vlnovými délkami v jeden okamžik je omezené, neboť úhel vychýlení svazku je závislý také na vlnové délce – tedy záření s různými vlnovými délkami jsou modulátorem ovlivněna odlišně. Dosažitelné skenovací úhly se pohybují v jednotkách stupňů. Nevýhodou akusticko-optických modulátorů je jejich relativně nízká optická propustnost (~70 - 80% pro jeden modulátor), a také vysoká cena samotných modulátorů, ale i budící elektroniky. [3, s. 19–20]

1.3. Skenery s galvanometry

Skenery s galvanometry patří do široké rodiny mechanických skenerů. Princip mechanických skenerů je zásadně odlišný od zařízení popsaných v předchozích odstavcích. Zatímco elektro-optické a akusticko-optické modulátory vychylují svazek při průchodu pevným optickým médiem, mechanické skenery vychylují svazek pomocí odrazu od pohyblivého zrcátka. Zrcátko může být poháněno různými způsoby, například pomocí piezomotorů, galvanometrů, krokových motorů apod.

Předností skenerů s galvanometry (a zpravidla i dalších typů mechanických skenerů) jsou vysoké skenovací úhly. Galvanometry mívají mechanický rozsah skenovacích úhlů v jedné ose zhruba $\pm 20^\circ$ ($\pm 40^\circ$ opticky). Protože je laserový svazek směřován fyzickými zrcátky, dosahují tyto skenery také vysoké optické propustnosti a mohou skenovat zároveň lasery s různými vlnovými délkami. Cena řešení je oproti předchozím jmenovaným technologiím podstatně nižší. Hlavní nevýhodou je nižší maximální rychlost rozmítání (stovky až tisíce Hz) z důvodu mechanických setrvačností pohyblivých částí[3, s. 52–55].

Princip galvanometrických aktuátorů laserových skenerů vychází původně z přístrojů na přesné měření elektrického proudu - galvanometrů. Někdy bývají v kontextu skenování laserových svazků označovány tyto aktuátory také jako „galvomotory“. V rámci této práce jsou oba pojmy považovány za ekvivalentní. Stejně jako u galvanometrů používaných k měření elektrických veličin je hlavní částí galvanometrického aktuátoru specializovaný typ elektromotoru, který je vysoce citlivý na budící proud a pracuje pouze v omezeném rozsahu úhlů. K rotoru elektromotoru je připevněno zrcátko, nebo jiný optický element. Obvykle je také součástí aktuátoru přesný senzor úhlu natočení rotoru používaný pro zpětnovazební řízení. Některé galvanometry obsahují rovněž mechanismus vytvářející restorativní točivý moment, který vrací rotor do nulové polohy. Může se jednat o mechanickou pružinu, nebo speciální uspořádání elektromotoru, kdy je pružinového efektu dosaženo reluktančními silami.

1. Technologie laserových skenerů

Historicky existovalo několik různých provedení galvanometrů, používajících pro vytvoření točivého momentu rozdílná uspořádání elektromotoru. Prvním typem galvomotorů, které dosáhly komerčního úspěchu, byly galvomotory s rotorem tvořeným magneticky měkkým železem.[3, s. 56–57] Stator je v tomto typu zařízení tvořen cívkou. Točivý moment je vytvářen reluktančními silami mezi rotorem a cívkou statoru, případně magnetickými silami mezi rotorem a shodně zmagnetizovanou lopatkou statoru. [6]

Dalším uspořádáním používaným v galvanometrických skenerech jsou aktuátory s rotorem tvořeným cívkou a statorem s permanentními magnety. Ačkoli se jedná o jeden z nejstarších typů galvanometrů, nikdy nedosáhl takové popularity jako uspořádání s železným rotorem.[3, s. 58]

Nejnovějším provedením jsou aktuátory se statorem tvořeným cívkou a rotorem tvořeným permanentními magnety – nejčastěji silnými neodymovými magnety. Toto uspořádání je široce používáno od začátku 90. let a oproti předchozím jmenovaným konstrukcím dosahuje lepších parametrů, zejména co se týče indukčnosti statorové cívky. [3, s. 59]

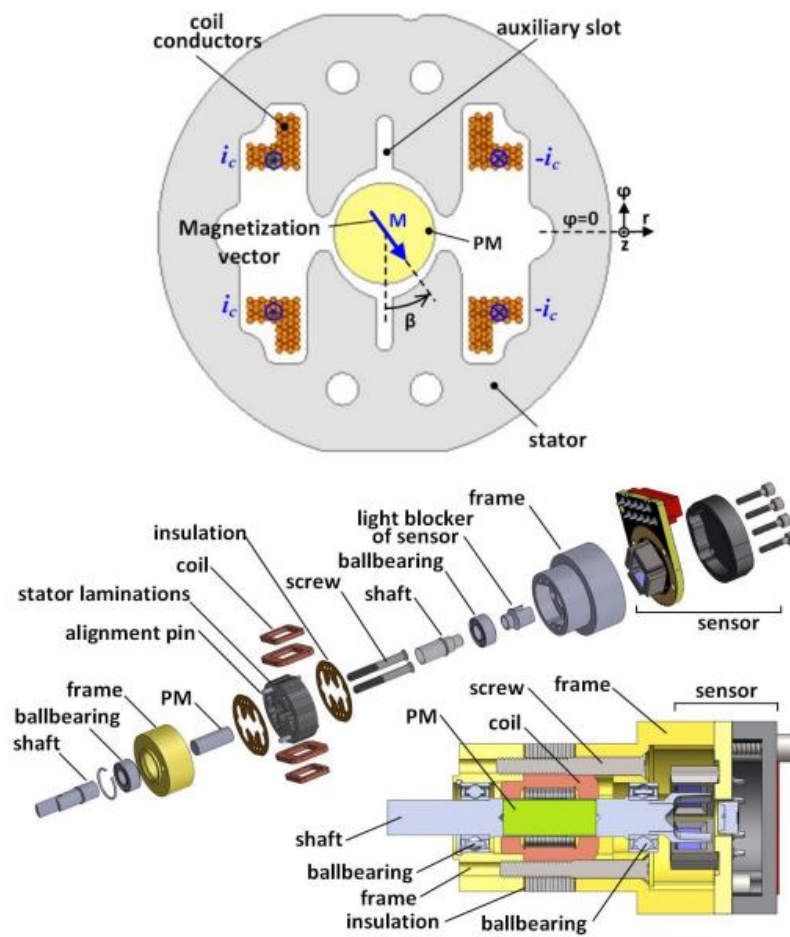
Senzory natočení rotoru mohou rovněž být implementovány různými způsoby. Podstatný rozdíl je mezi analogovými senzory – kapacitními, či optickými, a digitálními – senzory s enkodérem. Společným prvkem všech řešení je pohyblivý element upevněný k hřídeli rotoru. Velikost a tvar tohoto elementu přispívá k celkovému momentu setrvačnosti rotoru a ovlivňuje tak dynamiku aktuátoru. Různé implementace senzoru nabízejí rozdílné kompromisy mezi přesností, rotační setrvačností, úrovní šumu, teplotní stabilitou, linearitou a cenou. Nejpopulárnějším řešením jsou v současnosti optické analogové senzory.[7]

Na obrázcích níže je galvomotor Compact-506 vyvinutý firmou Pangolin Laser Systems (pod značkou ScannerMax) a jeho vnitřní uspořádání.

1. Technologie laserových skenerů



Obrázek 1: Galvomotor firmy ScannerMax, model Compact-506 s připevněným zrcátkem[8]



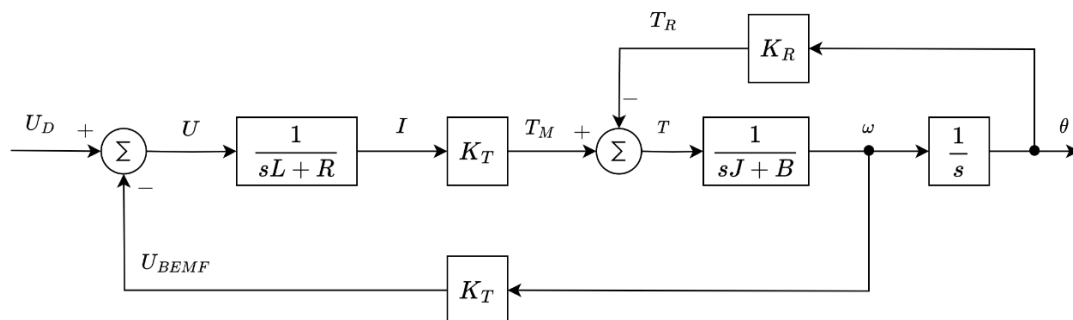
Obrázek 2: Vnitřní uspořádání galvomotoru ScannerMax Compact 506 [9, s. 114]

1. Technologie laserových skenerů

Z vnitřního uspořádání lze usuzovat, že se jedná o galvomotor s rotorem z permanentních magnetů. Tento model obsahuje také mechanismus pro návrat rotoru do nulové polohy pomocí reluktančních sil v důsledku eliptického tvaru kavity statoru kolem rotoru[9].

Poziční senzor tohoto aktuátoru je optický – analogový. Senzor sestává z jedné nebo dvou LED a dvou protilehlých fotodiód s velkou plochou. Konstrukce s dvěma protilehlými fotodiódami potlačuje vliv možného pohybu rotoru ve směru rotační osy (axiální pohyb), a ve směru kolmém na tuto osu (radiální pohyb), na výstupní signál. Úhel natočení rotoru je v určitém rozsahu přímo úměrný rozdílu výstupních signálů fotodiód.[3, s. 252–258]

Z hlediska řízení lze galvomotor modelovat v nejjednodušším pohledu jako soustavu druhého řádu s charakteristikou dolní propusti. Takový model pokrývá pouze dynamiku mechanické části aktuátoru. Vstupní veličinou modelu druhého řádu je proud cívkou statoru a výstupem poloha rotoru. Budeme-li modelovat také dynamiku elektrického obvodu motoru, dostaneme soustavu třetího řádu. V závislosti na přítomnosti, či absenci restorativního momentu může mít soustava integrující charakter. Komplexnější modely mohou obsahovat také modely rezonančního chování, ke kterému může docházet v důsledku omezené tuhosti hřídele a zrcátka, či detailnější modely tření mezi rotorem a státorem. Na obrázku 3 je diagram lineárního modelu galvanometru s restorativním momentem jako soustavy třetího řádu. Vysvětlení symbolů použitých v diagramu je v tabulce níže.



Obrázek 3: Lineární Model galvanometru s restorativním momentem

Na základě tohoto diagramu lze sestavit rovnici přenosu galvanometru [9], [10]:

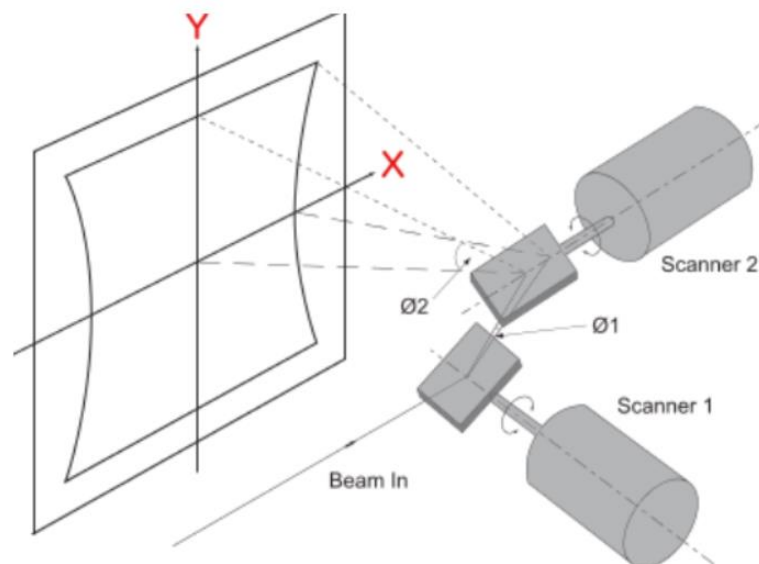
$$\frac{\theta}{U_D} = \frac{K_T}{s^3 J L + s^2 (J R + B L) + s (B R + L K_R + K_T^2) + K_R R} \quad (I)$$

1. Technologie laserových skenerů

Tabulka 1: Veličiny vystupující v modelu galvanometru

Symbol	Popis	Jednotka
U_D	Napětí aplikované řídicí elektronikou	V
U	Napětí na cívce galvanometru	V
U_{BEMF}	Elektromotorické napětí indukované v cívce galvanometru	V
L	Indukčnost cívky galvanometru	H
R	Odpor cívky galvanometru	Ω
I	Proud cívkou galvanometru	A
K_T	Koeficient točivého momentu	$N.m.A^{-1}$
T_M	Točivý moment vyvíjený buzením cívky galvanometru	N.m
T_R	Točivý moment vyvíjený restorativním mechanismem galvanometru	N.m
T	Točivý moment působící na rotor galvanometru	N.m
J	Moment rotační setrvačnosti rotoru a zrcátka	$kg.m^2$
B	Koeficient dynamického tření	$N.m.s.rad^{-1}$
ω	Úhlová rychlost rotoru	$rad.s^{-1}$
θ	Úhel natočení rotoru	rad
K_R	Koeficient restorativního točivého momentu	$N.m.rad^{-1}$
T_R	Restorativní točivý moment	N.m

Pro skenování laserových svazků v dvourozměrném prostoru jsou galvanomotory poháněná zrcátka uložena na vzájemně kolmých osách. V tomto uspořádání pak jedno zrcátko rozmítá svazek ve směru osy X a druhé ve směru osy Y. Geometrické uspořádání skeneru a příklad reálného zařízení jsou na obrázcích níže.



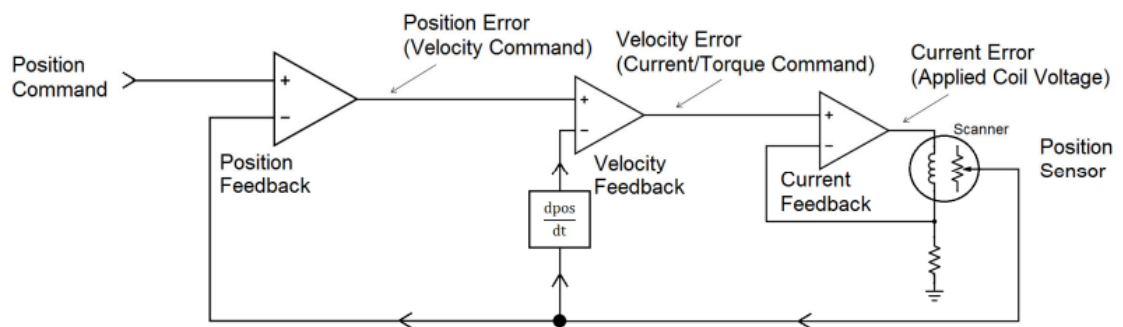
Obrázek 4: Geometrické uspořádání skeneru s galvanomotory



Obrázek 5: Uspořádání galvomotorů pro dvojrozměrné skenování [11]

2. Řízení galvanometrických aktuátorů

Dle dostupné literatury je nejčastěji pro řízení galvanometrických pohonů používáno zpětnovazební řízení s PI, PD a PID regulátory. Často uplatňovaným konceptem je kaskádní struktura řízení s vícero regulačními smyčkami vnořenými do sebe [3], [9].



Obrázek 6: Kaskádní struktura řízení galvanometru [3, s. 170]

Ačkoli je zřetězení regulačních smyček funkčně ekvivalentní s řešením, kdy jsou výstupy všech smyček sčítány v jediném uzlu, umožňuje toto uspořádání efektivně od sebe smyčky oddělit. To je výhodné v případech kdy některé smyčky mohou být implementovány analogově, zatímco jiné číslicově, nebo pokud mají být, v případě číslicového řešení, prováděny s rozdílnou periodou.

Používají se i modifikace standardního PID regulátoru, jako například PDF (Pseudo Derivative Feedback), kdy je ve vnější smyčce kaskádního uspořádání sčítán integrál regulační odchylky se zápornou zpětnou vazbou úhlu rotoru galvanometru. Jinou modifikací řídicí struktury je doplnění regulátoru o větev dopředného řízení. [3, s. 175–176]

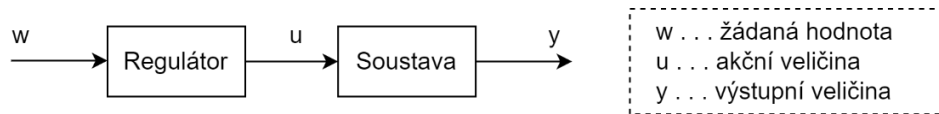
Některé postupy pro syntézu řídicího obvodu také staví na základě stavového popisu soustavy, a řízení implementují pomocí stavových zpětných vazeb. Podrobnější popis různých přístupů k řízení galvanometrů, včetně jejich relativních výhod a nevýhod je v následujících podkapitolách.

2.1. Dopředné a zpětnovazební řízení

Dopředné řízení představuje nejjednodušší formu řídicího obvodu. V tomto uspořádání působí regulátor na řízenou soustavu pouze na základě požadované hodnoty. Výhodou dopředné regulace je její extrémní jednoduchost a nenáročnost. Nevýhodou je zejména

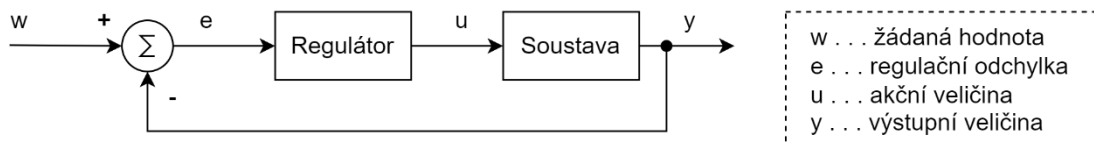
2. Řízení galvanometrických aktuátorů

nemožnost eliminace trvalé regulační odchylky. Toto řešení lze použít pro řízení jednoduchých soustav, pokud není vyžadována vysoká přesnost regulace.



Obrázek 7: Dopředné řízení

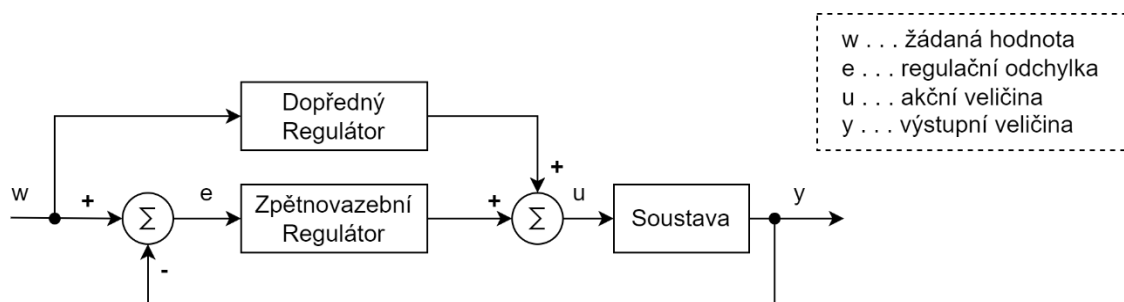
Zavedení zpětné vazby umožňuje navrhnout takový regulátor, který je schopen odstranit trvalou regulační odchylku. V tomto uspořádání je hodnota zpětné veličiny na vstupu odečítána s požadovanou hodnotou. Regulací za pomoci zpětné vazby lze zpravidla dosáhnout daleko přesnějšího nastavení výstupní veličiny. Nevýhodou ovšem je větší složitost celého systému, potřeba senzorů pro snímání výstupní veličiny, a potřeba zpracování signálu zpětné vazby. Přítomnost zpětné vazby také zavádí do systému potenciál pro vznik nestability při špatném nastavení parametrů regulátoru.



Obrázek 8: Zpětnovazební řízení

V některých případech může být výhodné oba předchozí přístupy zkombinovat. Je-li znám dostatečně přesný model řízené soustavy, může být dopředná větev řízení využita ke kompenzaci dynamiky soustavy, včetně nelineárních efektů, jako je například tření.[12]

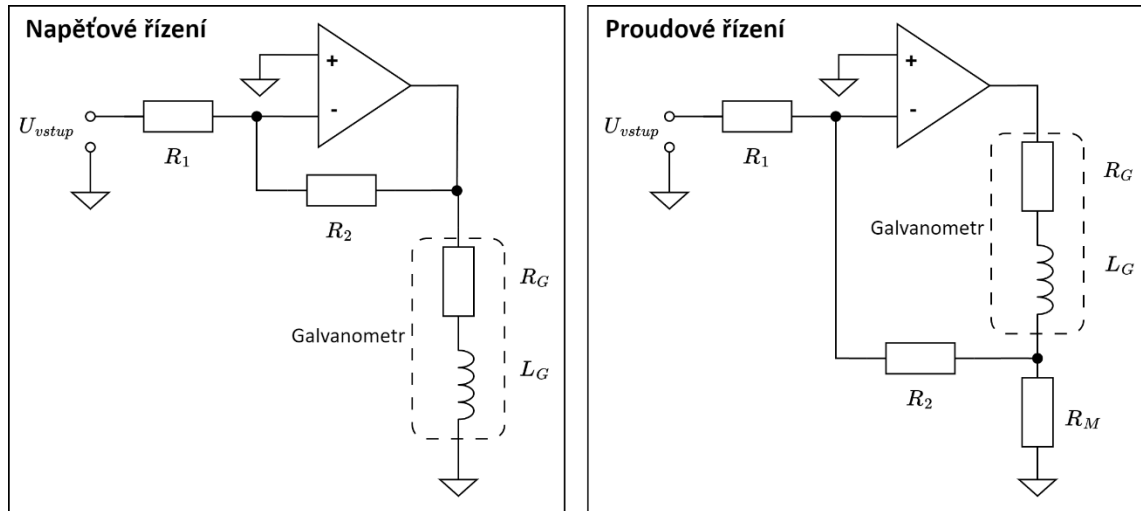
Nevýhodou je samozřejmě zvýšení komplexity řídicího systému.



Obrázek 9: Regulační obvod s dopřednou a zpětnovazební větví

2.2. Napěťové a proudové řízení

Termíny „napěťové řízení“ a „proudové řízení“ jsou spojovány spíše s oblastí audiotechniky, ale jejich princip je obecně uplatnitelný pro zařízení, jež jsou tvořena induktivní zátěží, včetně galvanomotorů.



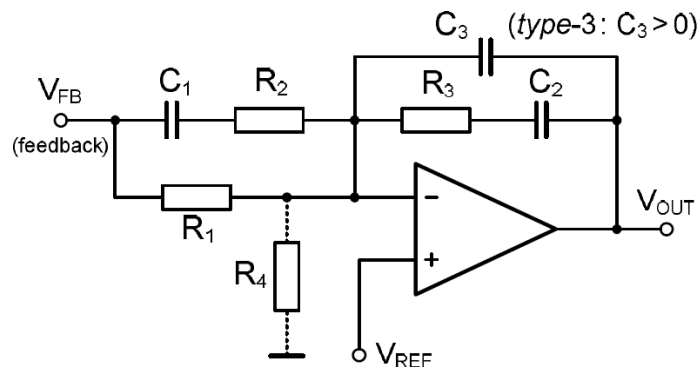
Obrázek 10: Princip napěťového a proudového řízení galvanometrů

Při napěťovém řízení je zanedbána dynamická charakteristika elektrického obvodu galvanomotoru – vztah mezi napětím na svorkách elektromotoru je považován za lineární a nezávislý na frekvenci budícího napěťového signálu. Tento přístup klade nižší nároky na řídicí obvod, omezuje však efektivní skenovací rychlost galvanomotoru.

Proudové řízení využívá principu zpětné vazby pro regulaci proudu cívkou galvanomotoru. Tato regulační smyčka pak tvoří vnitřní část kaskádního regulačního obvodu (viz „Current Feedback“ na obrázku 6). Proudové řízení přináší velké výhody – při vhodném nastavení proudového regulátoru je možné dosáhnout požadovaného proudu podstatně rychleji než v případě napěťového řízení. Tento efekt může mít velký dopad na rychlost skenování a stabilitu regulace, neboť točivý moment vyvíjený elektromotorem galvanometru je přímo úměrný proudu procházejícího vinutím, nikoli napětí na svorkách. Dalším pozitivem proudového řízení je eliminace teplotních vlivů na velikost budícího proudu. Proudové řízení však vyžaduje složitější řídicí elektroniku. Elektrický obvod galvanomotoru se chová jako soustava prvního řádu s velmi krátkou časovou konstantou. Z toho důvodu musí být pro realizaci regulátoru proudové smyčky použito analogového obvodu, nebo dostatečně výkonného mikrokontroleru.

2.3. Analogová a digitální realizace řízení

Zpětnovazební regulační obvody s PID regulátory lze v zásadě implementovat jak prostředky analogové, tak digitální techniky. Analogové řešení je typicky tvořeno pomocí obvodů s operačními zesilovači. Parametry takového regulátoru jsou stavitelné pouze v určitém rozsahu pomocí proměnných rezistorů. Nespornou výhodou analogového řešení je bezkonkurenční rychlost zpracování signálu. Z tohoto důvodu se regulace pomocí analogových obvodů používá pro realizaci proudové smyčky galvomotorů.



Obrázek 11: Analogová realizace PID regulátoru s jedním operačním zesilovačem[13]

Je-li rovnice požadovaného regulátoru diskretizována, může být tento regulátor implementován digitálním procesorem, nebo hradlovým polem. Číslicová realizace regulačního obvodu přináší několik výhod. Parametry číslicového regulátoru nejsou ovlivněny nejistotami při výrobě elektronických komponent, ani závislostí elektrických vlastností komponent na teplotě. Další výhodou je možnost realizovat složitější typy regulátorů nad rámec PID. V neposlední řadě přináší toto řešení možnost realizace algoritmů pro automatické nalezení parametrů regulace, sekvenční řízení aplikace, a sběr hodnot procesních veličin [14]

3. Požadavky na firmware laserového skeneru dle IEC 62304

3.1. Obecné požadavky IEC 62304

IEC 62304 je mezinárodní technická norma upravující životní cyklus software určeného pro použití v lékařství. Účelem normy je standardizovat vývojový proces software, který zaručí kvalitu a bezpečnost vyvinutého produktu, a také jeho údržbu po uvedení na trh. Norma byla poprvé vydána v roce 2006 a poté aktualizována v roce 2015 dodatkem. Dodatek zahrnuje zejména problematiku software, který nebyl vyvinut v souladu s aktuálním zněním normy. Může se jednat o software vyvinutý podle starších norem, nebo například o software třetích stran, který nebyl původně vyvinut za účelem použití v lékařském zařízení, a nesplňuje tedy patřičné požadavky. Souhrnně se tento software označuje jako software neznámé provenience (SOUP)[15]

Obecnými požadavky, které norma klade na výrobce lékařských přístrojů jsou:

1. Mít zaveden systém řízení kvality
2. Zahrnout vývoj software do procesu řízení rizik
3. Určit tzv. bezpečnostní třídu software dle rizika
4. Prokázat shodu staršího software s požadavky normy, nebo zajistit náhradu tohoto software

Dále norma podrobně specifikuje podobu procesů životního cyklu software pro jednotlivé bezpečnostní třídy. Norma nepředepisuje výrobci organizační strukturu, ani použití konkrétního modelu vývoje, ani konkrétní podobu dokumentace. Tyto specifiky jsou ponechány na rozhodnutí výrobce, shoda s normou však vyžaduje, aby byly všechny předepsané úkoly, aktivity a procesy provedeny, a aby byla vypracována požadovaná dokumentace [16]

3.2. Klasifikace software do bezpečnostních tříd

Rozdělení software do bezpečnostních tříd je klíčovým prvkem normy IEC 62304. Norma definuje třídy **A**, **B**, **C** podle rostoucí závažnosti dopadů selhání software. Každý software objekt

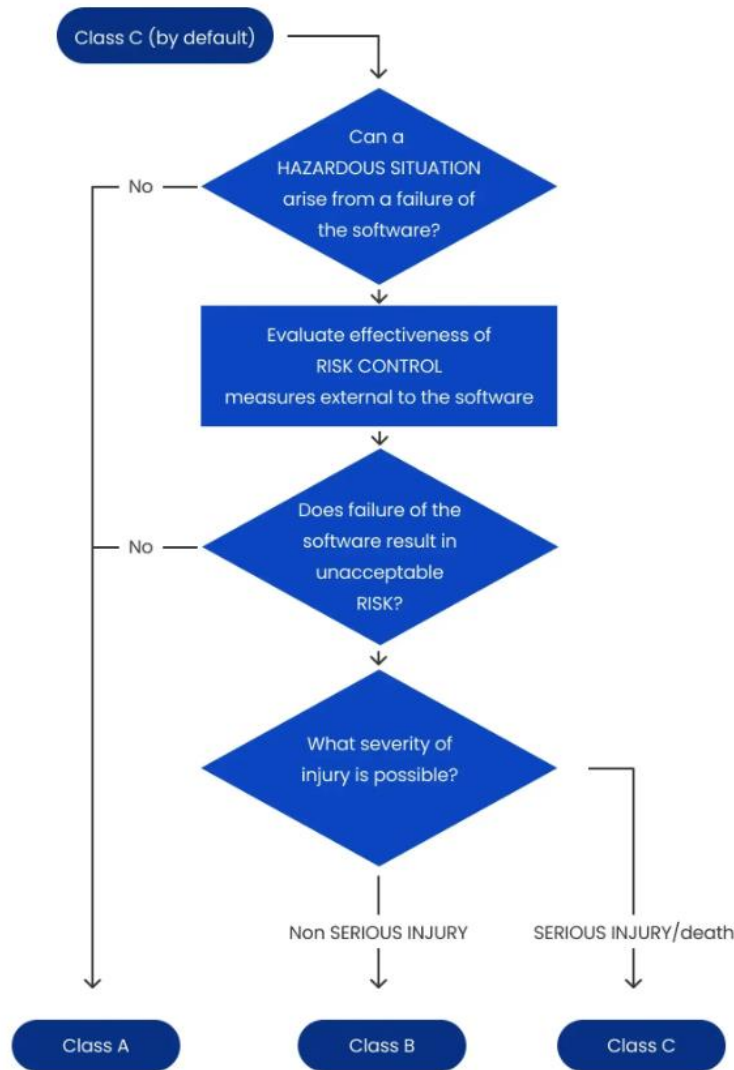
3. Požadavky na firmware laserového skeneru dle IEC 62304

se hodnotí samostatně, přičemž se na začátku analýzy přiřadí do nejpřísnější třídy **C**. V dalších krocích je vyhodnocen vliv externích (mimo software) opatření na zmírnění rizika, a také závažnost důsledků selhání software. Podle výsledku tohoto procesu je každý software objekt systému klasifikován do jedné ze tříd:

- **Třída A** – selhání software nemůže způsobit nebezpečnou situaci, anebo způsobená nebezpečná situace nevede k nepřijatelnému riziku, s přihlédnutím k externím opatřením.
- **Třída B** – selhání software může způsobit nebezpečnou situaci, která vede k nepřijatelnému riziku (s přihlédnutím k externím opatřením), přičemž způsobené zranění *není vážné*.
- **Třída C** – selhání software může způsobit nebezpečnou situaci, která vede k nepřijatelnému riziku (s přihlédnutím k externím opatřením), přičemž je způsobeno *vážné zranění, případně smrt* [16].

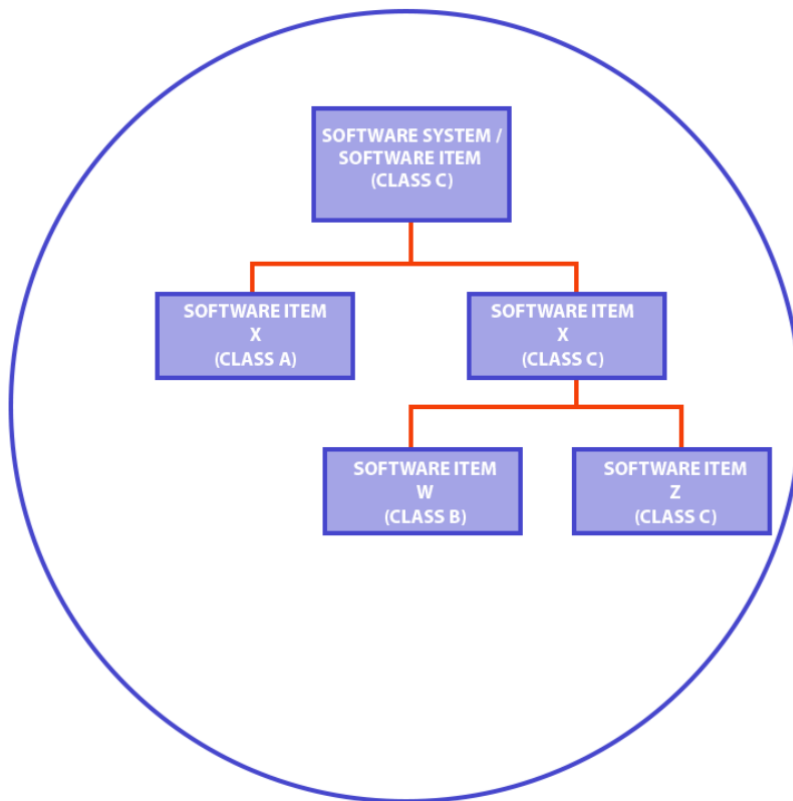
Postup klasifikace software do tříd je zachycen na digramu v Obrázku 12.

3. Požadavky na firmware laserového skeneru dle IEC 62304



Obrázek 12: Vývojový diagram třídění software do bezpečnostních tříd dle IEC62304 [17]

V případech, kdy je systém rozdělen do více vzájemně interagujících software objektů, postupuje se stejným způsobem od nejvyšší úrovně k nejnižším. Při vhodném rozdělení je tak možné přiřadit jednotlivé objekty do různých tříd a potenciálně tak snížit požadavky na vývoj některých částí systému. Příklad takového rozdělení je na obrázku 13.



Obrázek 13: Rozdělení systému na software objekty a jejich klasifikace do bezpečnostních tříd [15]

3.3. Požadavky na procesy v životním cyklu software

V dalších kapitolách normy je podrobně specifikována podoba procesů v životním cyklu software. Jedná se konkrétně o tyto procesy:

- **Proces vývoje software** – plánování, analýzu požadavků, návrh architektury a detailní struktury, implementace, integrace, testování a vydávání software
- **Proces údržby software** – tvorba plánu údržby, analýza problémů a úprav, implementace úprav
- **Proces řízení rizik** – analýza vlivu software na vznik rizikových situací, opatření pro řízení rizik, verifikace opatření, řízení rizik při úpravách software,
- **Proces správy konfigurací software** – identifikace objektů, řízení změn konfigurace, vedení dokumentace o změnách

- **Proces řešení problémů** – hlášení problémů, šetření problémů, vedení záznamů o problémech, vyšetření trendů v hlášených problémech, verifikace řešení problémů, dokumentace provedených testů

U každého požadavku je uvedeno, pro které bezpečnostní třídy je nutné jej aplikovat pro dosažení shody s normou. Na software třídy C se vztahují všechny klauzule normy, na třídu B pouze určitá podmnožina z celku, a na třídu A pouze podmnožina z požadavků pro třídu B.

3.4. Analýza rizik spojených se software skeneru

Nezbytným předpokladem pro správnou klasifikaci software do bezpečnostní třídy dle normy je analýza rizik. V této kapitole je demonstrován základní postup analýzy a řízení rizik, který je u výrobce lékařského zařízení prováděn v rámci procesu vývoje a údržby každého výrobku. Proces řízení rizik je často implementován v souladu s normou ISO 14971, na kterou je také odkazováno z normy IEC 62304. Detailní popis postupu, definice závažnosti situací, a hodnoty pro rozhodování o přijatelnosti rizik musí být určeny interními směnicemi výrobce lékařského zařízení. V následující tabulce je ilustrován obecný zjednodušený postup pro nebezpečnou situaci způsobenou selháním software. Pro analyzovaná rizika jsou použity škály pravděpodobnosti výskytu 1 – nikdy, až 5 – při každém použití přístroje, a škály závažnosti 1 – žádné fyzické poškození, až 5 – smrt pacienta. Jako hranice nepřijatelnosti je zvolena hodnota 5, tedy hodnota rizika menší než 5 je považována za přijatelnou, hodnoty 5 a vyšší jsou považovány za nepřijatelné.

Tabulka 2: Příklad analýzy rizik

Analýza nebezpečné situace	
Nebezpečí	Laserové záření
Nebezpečná situace	Nadměrná expozice ošetřované tkáně laserovému záření
Události vedoucí ke vzniku nebezpečné situace	V průběhu skenování terapeutické trajektorie dojde k selhání řídicího software. Skenování není řízeno. Může dojít k aplikaci laserového svazku na jedno místo ošetřované tkáně po delší dobu, než určuje léčebný protokol.
Poškození	Poškození tkáně, lokální popáleniny 2. stupně
Závažnost	3/5
Pravděpodobnost	2/5
Riziko (závažnost * pravděpodobnost)	6 Nepřijatelné riziko
Opatření pro snížení rizika	Pravděpodobnost, že dojde ke vzniku zranění může být snížena omezením doby, po kterou je laserové záření chybně aplikováno. Toho je možné dosáhnout použitím watchdogu. Watchdog je dedikovaný hardwarový časovač, který restartuje procesor, dojde-li k selhání software. Při restartu jsou všechny GPIO reinitializovány do režimu vstupu, včetně GPIO pro signalizaci připravenosti skeneru (CPU_Ready). Zdroj laserového záření je tak včas informován o selhání skeneru.
Pravděpodobnost po přijetí opatření	1/5
Zbytkové riziko	3/25 Přijatelné riziko

3.5. Klasifikace software skeneru do bezpečnostní třídy

Software lékařského zařízení není většinou jedinou součástí tohoto zařízení. Zde je důležité podotknout, že norma ukládá povinnost klasifikovat software do bezpečnostních tříd s přihlédnutím k použitým externím opatřením pro snížení rizik. Například, pokud bychom jako externí opatření ke snížení rizika zasažení zraku pacienta, či obsluhy nemohli použít ochranné brýle, museli bychom na základě postupu stanoveného normou a popsáno v oddílu 3.2 klasifikovat software skeneru do **třídy C**. Skener může být obecně použit pro rozmítání laserového paprsku s výstupním výkonem a výkonovou hustotou dostatečnými pro poškození kůže a trvalé nevratné poškození zraku. Poškození zraku je považováno za závažné zranění. Po přijetí externích opatření v podobě použití ochranných brýlí je toto riziko minimalizováno na přijatelnou úroveň.

Dalším rizikem je poškození ošetřované tkáně. Zde je nutné zohlednit závažnost způsobeného zranění s přihlédnutím k aplikovaným opatřením pro snížení rizik. Pokud by například při nebezpečné situaci popsané v modelovém příkladě výše způsobila nekontrolovaná aplikace laserového zařízení pouze nezávažná zranění, mohl by být software skeneru zařazen do **třídy B**. Pokud by laserové záření do doby, než dojde k resetu procesoru skeneru, a než je vypnut laserový zdroj, nezpůsobilo žádné zranění, pak by mohl být software skeneru klasifikován dokonce do **třídy A**.

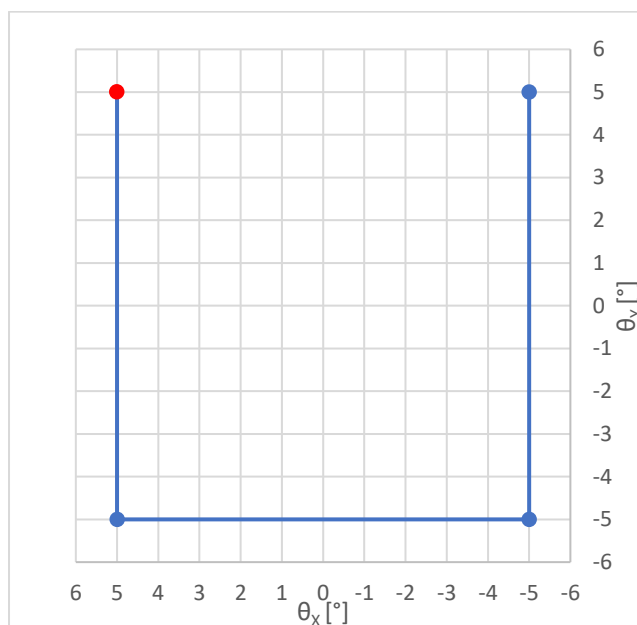
Po klasifikaci do bezpečnostní třídy dle IEC 62304 je možné přesně určit, které klauzule normy se na software skeneru vztahují. Obsah následujících kapitol - tedy stanovení požadavků na software, implementace a ověření software rovněž ve zjednodušené formě naplňuje některé z požadavků normy na procesy ve vývoji software zdravotnických prostředků.

4. Stanovení požadavků na software skeneru

Původní požadavky v zadání práce nejsou dostatečně konkrétní. V této kapitole jsou proto uvedeny přesnější požadavky na funkce firmwaru.

Software skeneru bude implementovat:

1. Zpětnovazební regulátor úhlu natočení rotoru galvanometru:
 - a. Pracovní rozsah: $+5^\circ$ až -5° ($0,0872$ až $-0,0872$ radiánů)
 - b. Tolerance odchylky požadovaného úhlu: $0,25^\circ$ ($4,4$ miliradiánů)
 - c. Zpětnovazební smyčka musí být stabilní
 - d. Přechodový děj nesmí způsobovat viditelný překmit ($\pm 0,25^\circ$)
 - e. Přechodový děj mezi dvěma body trajektorie musí být kratší než 10 ms
2. Point-to-point řízení natočení rotorů obou os skeneru po předdefinovaných trajektoriích:
 - a. Trajektorie pro označení místa terapie

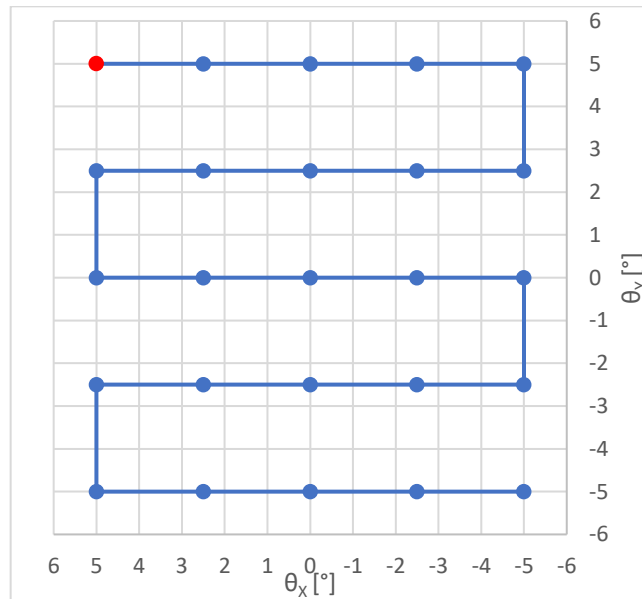


Obrázek 14: Trajektorie pro označení ošetřované oblasti Počáteční bod zvýrazněn červeně.

4. Stanovení požadavků na software skeneru

b. Trajektorie pro pokrytí ošetřované oblasti mřížkou bodů 5 x 5 v plném pracovním rozsahu.

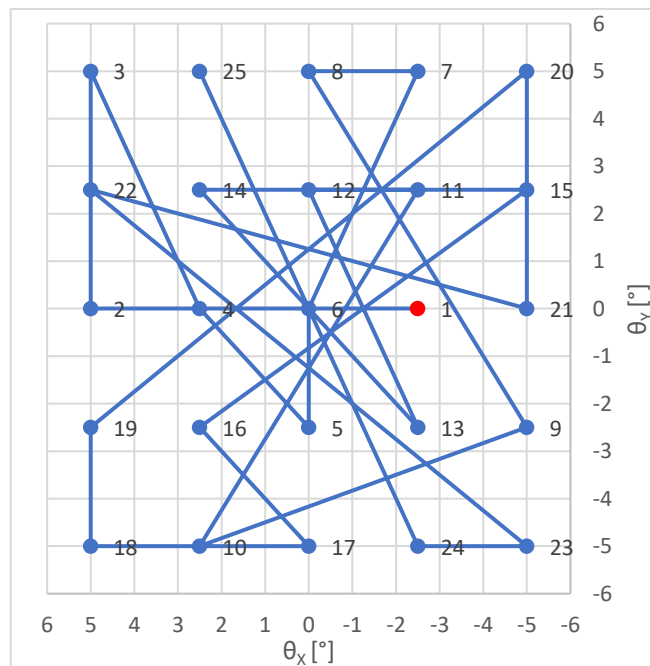
i. Esovitý vzor – prochází body postupně v řadách



Obrázek 15: Trajektorie pro pokrytí ošetřované oblasti – esovitý vzor.

Počáteční bod zvýrazněn červeně

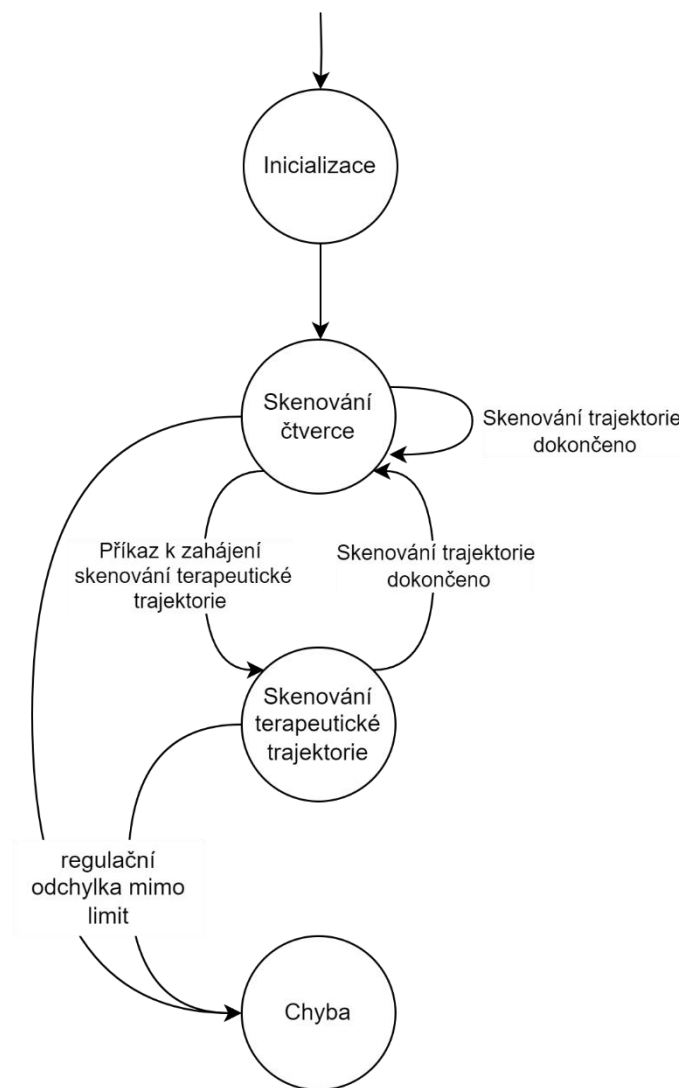
ii. Pseudonáhodný vzor – prochází body v předgenerované pseudonáhodné sekvenci.



Obrázek 16: Trajektorie pro pokrytí ošetřované oblasti – pseudonáhodný vzor. Pořadí skenování označeno popiskem u bodů. Počáteční bod zvýrazněn červeně.

4. Stanovení požadavků na software skeneru

3. Sekvenční řízení podle následujícího diagramu:



Obrázek 17: Diagram požadovaného stavového automatu

4. Signalizaci nastavení obou os do požadovaného úhlu pro nadřazené řízení při skenování trajektorie pro pokrytí ošetřované oblasti pomocí GPIO výstupu (3,3 V – aktivní, 0 V – neaktivní). Tento výstup je ve schématu a v dalších částech práce označován názvem CPU_Ready.
5. Kontrolu regulační odchylky v reálném čase
 - a. Při překročení prahu regulační odchylky vyšší než $0,25^\circ$ v době, kdy mají být osy nastaveny do finálního úhlu při skenování bodu trajektorie, bude signál nastavení os do požadovaného úhlu resetován a bude odeslána po komunikačním rozhraní chybová zpráva do nadřazeného řízení.

4. Stanovení požadavků na software skeneru

6. Komunikace po sériové lince s nadřazeným řídicím systémem

- a. Software skeneru bude odesílat zprávy o úspěšné/neúspěšné inicializaci systému
- b. Software skeneru bude odesílat zprávu o selhání skenování z důvodu překročení limitu regulační odchylky.
- c. Software skeneru bude přijímat povel k zahájení skenování terapeutické trajektorie.
- d. Software skeneru bude přijímat povel pro změnu terapeutické trajektorie (mezi dvěma výše uvedenými variantami)
- e. Přijetí každého platného povelu bude potvrzeno odesláním potvrzovací zprávy
- f. Při přijetí neplatného povelu bude odeslána zpráva o neplatném povelu

5. Návrh řízení galvanometru

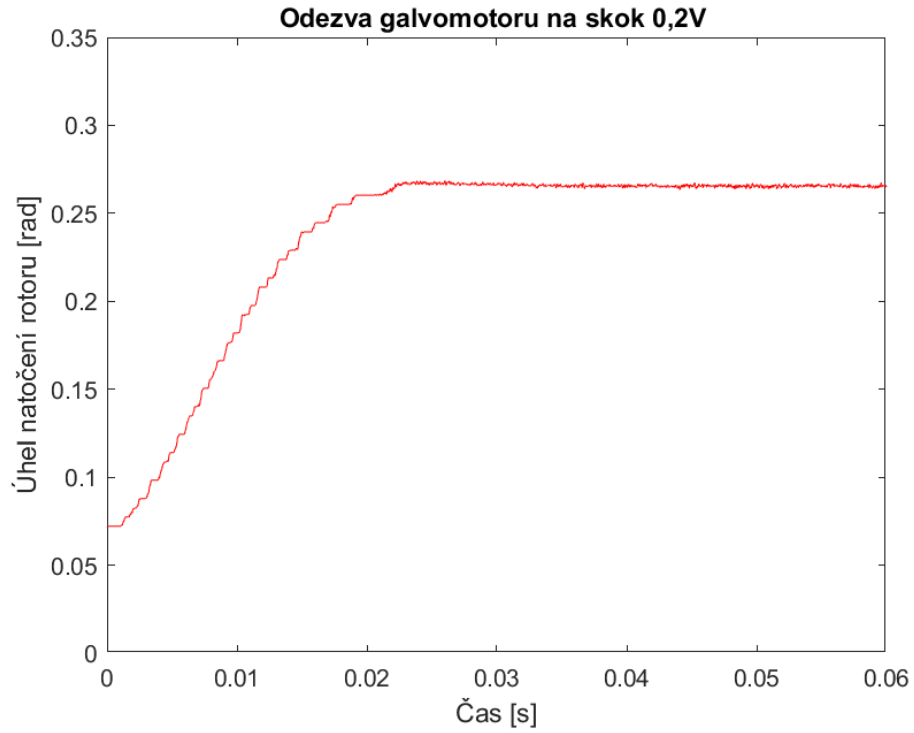
5.1. Modelování galvanometru ScannerMax Compact 506

Známe-li všechny parametry systému, můžeme pomocí rovnice (I) vytvořit model galvanometru. Převážná část parametrů byla získána z dokumentace výrobce [11] Některé parametry však bylo nutné doplnit:

- **Celkový odpor (R):** Odpor vinutí galvomotoru dle výrobce je $1,8 \Omega$. Změřená hodnota včetně přívodních vodičů je $2,1 \Omega$. K tomu je nutné připočítat odpor tranzistorů v H-můstku $2 \cdot 300 \text{ m}\Omega$ [18], a odpor měřícího rezistoru $150 \text{ m}\Omega$ (viz R18 /R19 v příloze 1)
- **Celkový moment rotační setrvačnosti (J):** Je součtem rotační setrvačnosti rotoru galvanometru a rotační setrvačnosti zrcátka. Hodnotu rotační setrvačnosti zrcátek pro rozmítání max. 10 mm svazku, pro které je systém vyvíjen, byla získána přímo od výrobce.
- **Koeficient dynamického tření (B):** Jako původní odhad bylo považováno $B = 0$. Dále byla hodnota ručně odhadnuta tak, aby přechodová charakteristika modelu odpovídala experimentálně změřené přechodové charakteristice motoru. Tato hodnota ovlivňuje zejména kmitavý charakter soustavy.
- **Koeficient restorativního točivého momentu (K_R):** Pro původní odhad byly použity hodnoty z dříve publikované práce, která se zabývala řízením motoru Compact 506 [9]. I v této studii však hodnota vykazuje značnou variabilitu v závislosti na pracovním bodě. Protože při použití původní hodnoty ($1,1 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.rad}^{-1}$) neodpovídalo statické zesílení modelu reálným datům, bylo nutné tuto hodnotu rovněž ručně odhadnout.

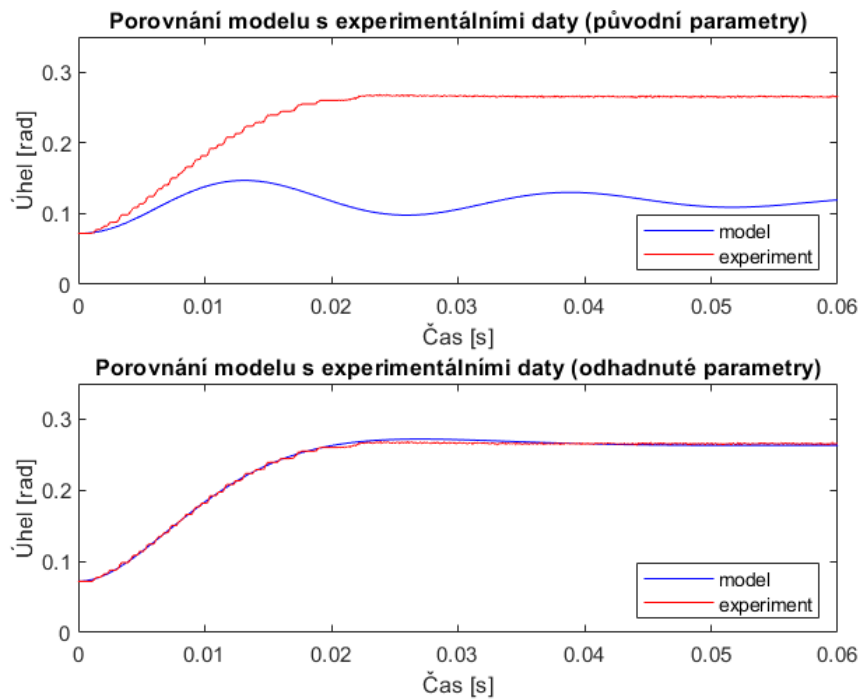
Pro odhad parametrů bylo nutné získat reálnou přechodovou charakteristiku galvomotoru. Toho bylo dosaženo změřením odezvy senzoru natočení při buzení motoru skokem 0-0,2 V (PWM signálem s frekvencí 20 kHz s negativní střídou 4 % při napájecím napětí H-můstku 5 V).

5. Návrh řízení galvanometru



Obrázek 18: Naměřená přechodová charakteristika soustavy

Následně bylo možné odhadnout hodnoty koeficientů B a K_R . Výsledné hodnoty odhadnutých parametrů jsou v tabulce níže.



Obrázek 19: Porovnání odezvy galvanometru a modelu s původními a odhadnutými parametry

5. Návrh řízení galvanometru

Tabulka 3: Tabulka hodnot parametrů galvanometru ScannerMax Compact 506

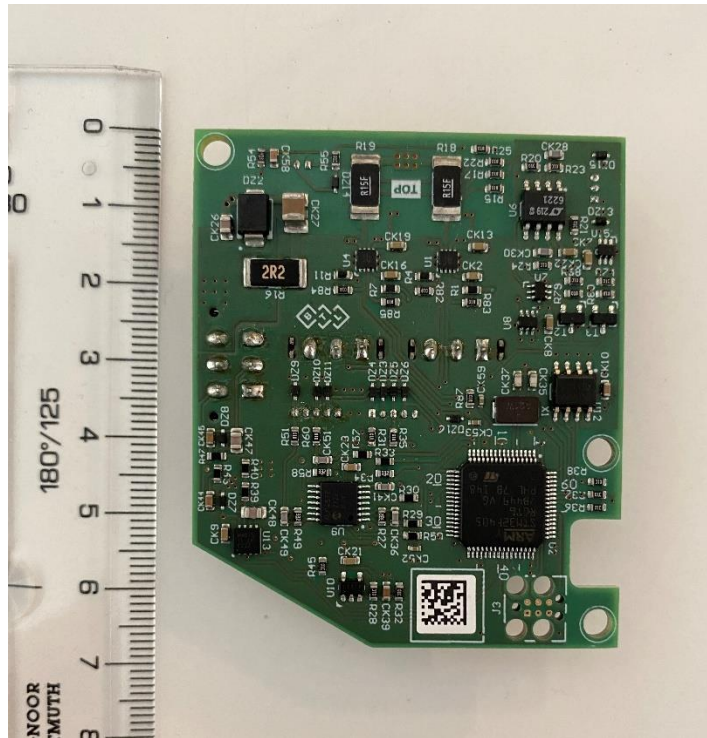
Symbol	Popis	Hodnota	Jednotka
L	Indukčnost cívky galvanometru	$2.8 \cdot 10^{-8}$ (1)	H
R	Celkový odpor budícího obvodu (cívka, vodiče, H-můstka)	2.85	Ω
K_T	Koeficient točivého momentu	$1,84 \cdot 10^{-3}$ (1)	$N.m.A^{-1}$
J_R	Moment rotační setrvačnosti rotoru	$01,4 \cdot 10^{-9}$ (1)	$kg.m^2$
J_M	Moment rotační setrvačnosti zrcátka (10 mm)	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$kg.m^2$
J	Celkový moment rotační setrvačnosti rotoru a zrcátka	$1,82 \cdot 10^{-8}$	$kg.m^2$
B	Koeficient dynamického tření [$N.m.s.rad^{-1}$]	$3 \cdot 10^{-6}$	$N.m.s.rad^{-1}$
K_R	Koeficient restorativního točivého momentu	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$N.m.rad^{-1}$

Je třeba zmínit, že tento model pokrývá pouze lineární časově invariantní (LTI) dynamiku systému, nepokrývá tedy jevy jako nelineární tření, nebo změnu elektrických parametrů galvanometru v závislosti na teplotě.

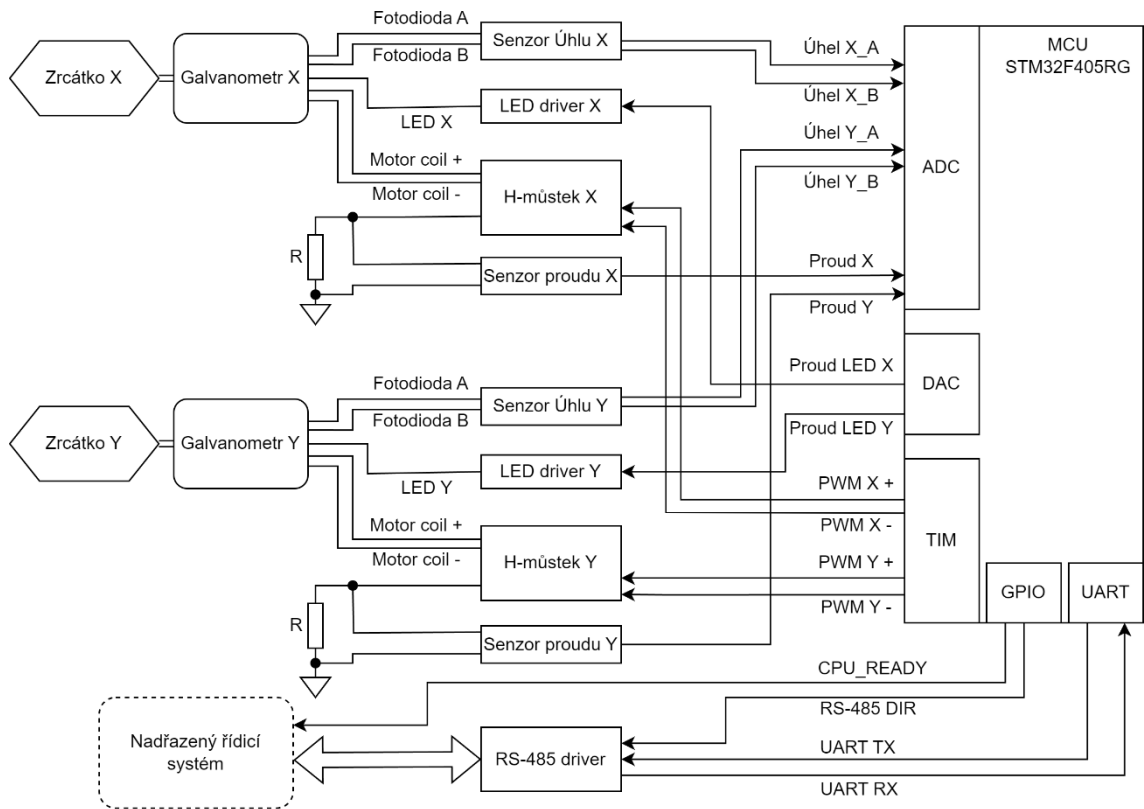
5.2. Popis hardware

Prototyp hardware driveru galvomotorů navržený společností BTL Medical Solutions obsahuje mikrokontroler STM32F405RG, dva H-můstky pro řízení motorů DRV8231DSGR, analogové obvody pro zpracování signálů ze senzorů natočení a proudové zpětné vazby, převodník mezi UART a RS485, EEPROM, regulátory napětí a bezpečnostní obvody. Napájení H-můstků je oddělené od napájení ostatních obvodů, a umožňuje buzení galvanometrů napětím 5-12 V. Části schématu prototypu relevantní pro řešenou problematiku jsou přiloženy v přílohách 1-3.

5. Návrh řízení galvanometru



Obrázek 20: Prototypy driveru



Obrázek 21: Zjednodušené blokové schéma skeneru

5.3. Omezení návrhu regulace plynoucí z použitého hardware

Princip proudového řízení galvanometru předpokládá (jak bylo vysvětleno v kapitole 2.2) snímání proudu procházejícího vinutím galvanometru a jeho aktivní regulaci. Prototyp hardware driveru obsahuje obvod pro snímání proudu vinutím galvanometru, neobsahuje však příslušný analogový regulátor. Jedinou možností, jak realizovat proudovou regulační smyčku je tedy diskrétně pomocí mikroprocesoru. Obvod motoru galvanometru je systémem prvního řádu, jehož časová konstanta τ se vypočítá:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (II)$$

Kde L je indukčnost cívky vinutí a R je celkový odpor budícího obvodu včetně odporu cívky vinutí. Po dosazení skutečných hodnot (viz tabulka 3) získáme $\tau \approx 100 \mu\text{s}$. Aby bylo možné regulovat proud cívku pomocí číslicového regulátoru, musí být perioda regulační smyčky nejméně několikanásobně nižší, než je časová konstanta regulované soustavy. Při předběžném testování však bylo zjištěno, že takové periody regulační smyčky není možné s použitým mikrokontrolerem dosáhnout, neboť dvě instance algoritmu PID regulátoru s potřebnou filtrací signálu mohou běžet s minimální periodou $\approx 100 \mu\text{s}$.

Další nevýhodou hardwarové realizace je nemožnost měřit proud procházející cívku galvanometru mimo periodu aktivního buzení H-můstku (bližší vysvětlení v podkapitole 6.5). Při přechodech mezi aktivní a pasivní periodou H-můstku dochází v obvodu k přechodovým jevům, ztěžujícím přesné měření. V situaci, kdy je právě akční veličina nulová pak není možné měřit proud vůbec.

Z výše uvedených důvodů vyplývá, že implementace diskrétního proudového řízení galvanometru není pomocí současného prototypu realizovatelná. Regulace úhlu natočení galvanometru bude tedy implementována PID regulátorem, se snímáním zpětné vazby úhlu natočení rotoru pomocí vestavěného senzoru úhlu, a buzením galvanometru v režimu napětového řízení. Regulační smyčka bude pracovat s periodou $100 \mu\text{s}$.

5.4. Snímání senzorů úhlu natočení

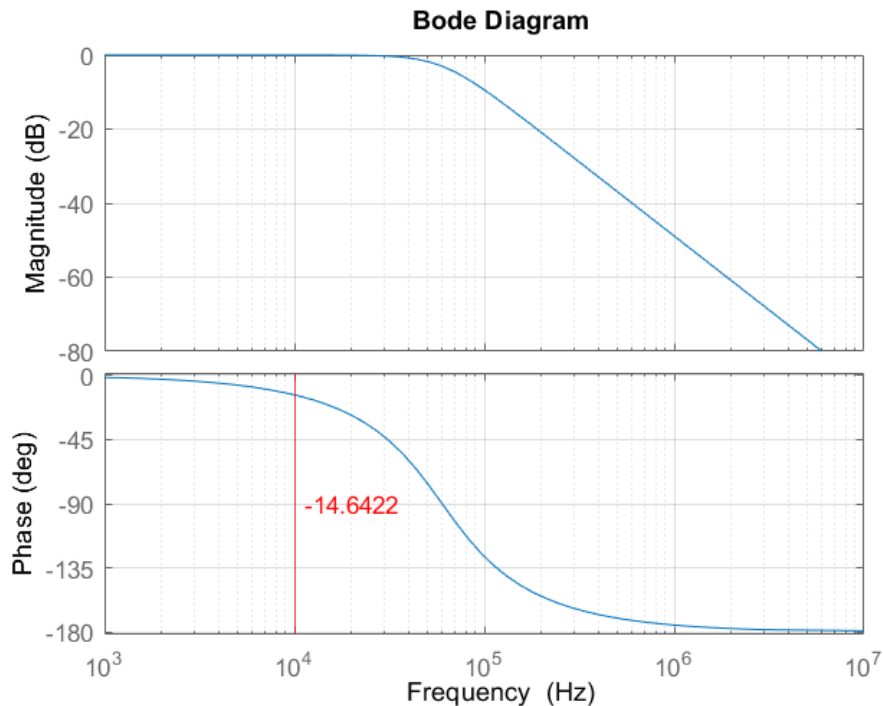
Dle manuálu výrobce je úhel natočení rotoru galvanometru přímo úměrný rozdílu proudu z fotodiod senzoru natočení. Proudů z fotodiod jsou převedeny na napětí pomocí analogového obvodu se zesílením $3.3\text{mV}/\mu\text{A}$ (viz Příloha 2). Mezi zesilovačem a ADC převodníkem

mikrokontroleru je zařazen filtr typu dolní propust, tvořený RC článkem, s mezní frekvencí ≈ 72 kHz. Aby se předešlo aliasingu je dle literatury [19] doporučeno vzorkovat signál osminásobkem mezní frekvence filtru, tedy zhruba s frekvencí 576 kHz. Zpracování takového množství dat v následujících krocích algoritmu se ukázalo jako značně omezující pro rychlost provádění regulační smyčky. Z toho důvodu byla vybrána vzorkovací frekvence nižší - **262,5 kHz**.

5.5. Filtrace snímaného úhlu

Protože regulační smyčka bude běžet s mnohem nižší frekvencí, než je frekvence vzorkování úhlu natočení rotoru, je potřeba měřené hodnoty dále filtrovat, aby při převzorkování nedocházelo k aliasingu vysokofrekvenčních složek (včetně kvantizačního šumu AD-převodníku). Nejedná se však o typický anti-aliasingový filtr, neboť zásadní roli zde hraje kromě útlumu vysokofrekvenčních složek také fázový posun signálu v propustném pásmu. Aby byl fázový posun signálu co nejmenší, volí se cut-off frekvence filtru násobně vyšší, než je frekvence regulační smyčky [10, s. 48].

Protože regulační smyčka má běžet s frekvencí ≈ 10 kHz, je pro filtraci signálu zpětné vazby použit **Butterworthův filtr 2. řádu s mezní frekvencí 60 kHz**. Navržený filtr má pro frekvence signálu kolem 10 kHz (frekvence regulační smyčky) fázový posun přibližně -14.6° .



Obrázek 22: Charakteristika filtru zpětné vazby

Diskretizací funkce navrženého filtru metodou bilineární transformace pro vzorkovací periodu 262,5 kHz obdržíme rovnici filtru pro diskrétní realizaci:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0,2037z^2 + 0,4074z + 0,2037}{z^2 - 0,3827z + 0,1976} \quad (\text{III})$$

Po vynásobení pravé strany přenosu výrazem $\frac{z^{-2}}{z^{-2}}$, přeuspořádání členů, a zpětné transformaci dostaneme diferenční rovnici filtru ve tvaru:

$$y(k) = 0,2037x(k) + 0,4074x(k-1) + 0,2037x(k-2) + 0,3827y(k-1) - 0,1976y(k-2) \quad (\text{IV})$$

Kde y je výstup filtru, x je vstup filtru, a index k udává pořadí vzorku.

5.6. Návrh regulátoru úhlu natočení galvomotoru

Pro úvodní odhad konstant PID regulátoru byla použita funkce `piddtune()` v prostředí MATLAB. Funkce přijímá jako vstupní parametr model řízené soustavy, požadovaný typ regulátoru a požadovanou crossover frekvenci otevřené smyčky řízení. Jako model řízené soustavy posloužil

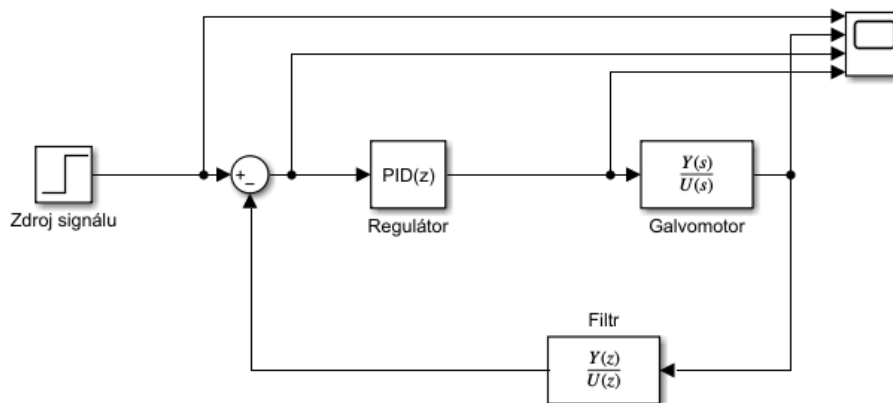
5. Návrh řízení galvanometru

dříve popsaný model galvanometru. Typ regulátoru byl zvolen PID. Crossover frekvence 1600 rad/s byla odhadnuta tak, aby byla doba náběhu výstupní veličiny v uzavřené smyčce dostatečně krátká. Získané konstanty regulátoru jsou uvedeny v tabulce níže (Hodnoty K_p a K_i byly zaokrouhleny na celá čísla, hodnota K_d byla zaokrouhlena na tři desetinná místa).

Tabulka 4: Úvodní konstanty PID regulátoru

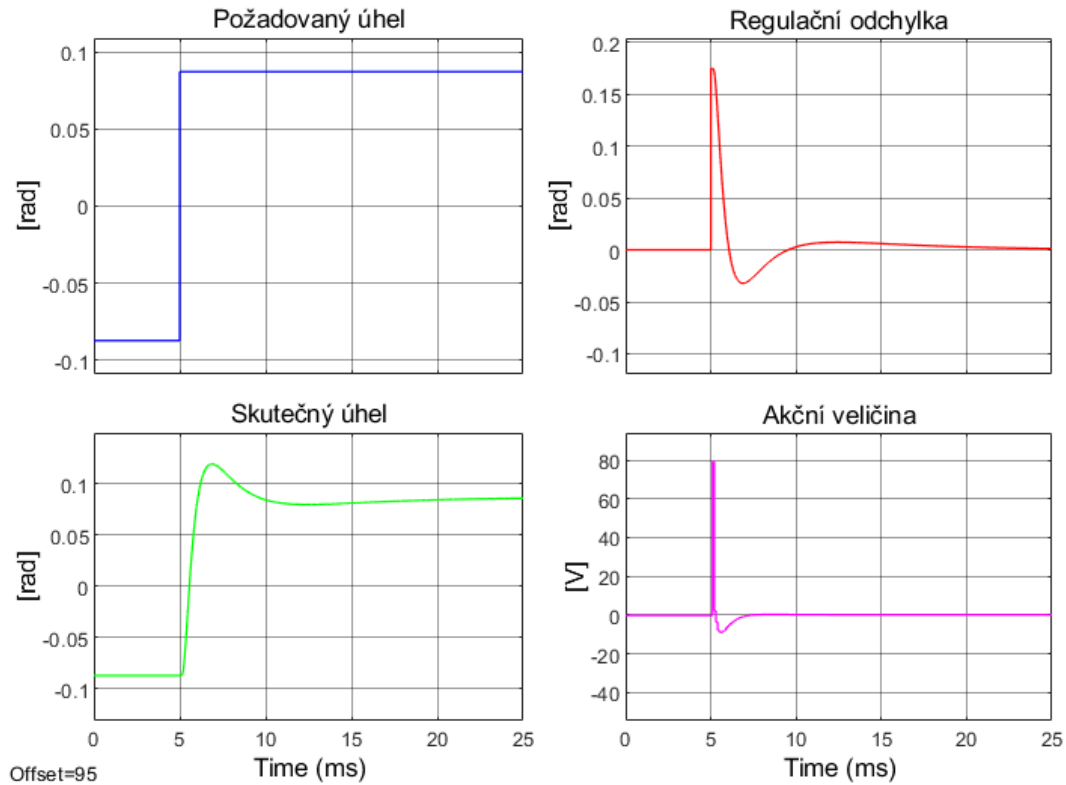
Konstanta	Hodnota
K_p	22
K_i	2796
K_d	0,043

Následně byla regulace s úvodními konstantami simulačně otestována pomocí nástroje Simulink již s diskrétním PID regulátorem a zpětnovazebním filtrem s vzorkovacími frekvencemi 10 kHz, respektive 262,5 kHz. Jako testovací signál byl vygenerován skok z úhlu $-0,872$ radianů do $0,872$ radianů ($\approx -5^\circ$ až 5°), což odpovídá maximálnímu možnému skoku dle požadavků na řízení. Schéma simulace zpětnovazebního obvodu a grafy průběhu veličin jsou na obrázcích níže. Simulace je také přiložena v elektronických přílohách (soubor „uvodni_simulace.slx“).



Obrázek 23: Schéma úvodní simulace zpětnovazebního řízení

5. Návrh řízení galvanometru



Obrázek 24: Simulované odezvy veličin v řídicí smyčce s úvodními parametry

Z výsledků simulace lze vyčíst několik podstatných faktů. Prvním je, že délka přechodového jevu je dostatečně krátká pro splnění požadavků (< 10 ms). Druhým je přítomnost relativně velkého překmitu, který je nežádoucí. Nejzásadnějším poznatkem je však skutečnost, že akční veličina v tomto uspořádání regulačního obvodu dosahuje špičkově hodnoty 80 V. Prototyp hardware driveru umožňuje napájet H-můstky (a tím pádem i galvanometry) nejvýše napětím 12 V. Při použití tohoto regulátoru by tedy došlo velmi rychle k saturaci akční veličiny, což by do řídicí smyčky zaneslo nepředpokládanou nelinearitu.

Existuje více způsobů, jak lze omezit velikost akčního zásahu, tak aby nedocházelo k saturaci buzení galvanomotorů. Jednou z možností je modifikace diferenční složky regulátoru, neboť právě diferenční složka reaguje v klasickém PID regulátoru velice citlivě na prudké změny regulační odchylky. Modifikace spočívá v náhradě diference regulační odchylky diferencí výstupní veličiny.[20, s. 101–102]

5. Návrh řízení galvanometru

Akční zásah generovaný klasickou diferenční složkou diskrétního regulátoru v polohovém tvaru můžeme vyjádřit jako:

$$D(k) = K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_v} \quad (V)$$

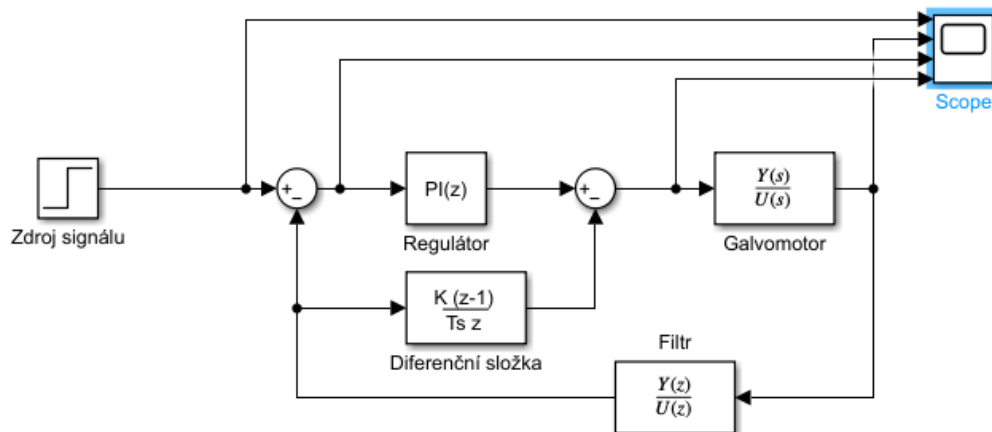
kde $D(k)$ je výstup diferenční složky v periodě k , e je regulační odchylka, T_v je perioda regulační smyčky, a K_d je zesílení diferenční složky a index k udává pořadí vzorku.

Modifikaci pak můžeme vyjádřit rovnicí (odvozeno z přírůstkového tvaru v [20, s. 102]):

$$D(k) = K_d \frac{-[y(k) - y(k-1)]}{T_v} = K_d \frac{y(k-1) - y(k)}{T_v} \quad (VI)$$

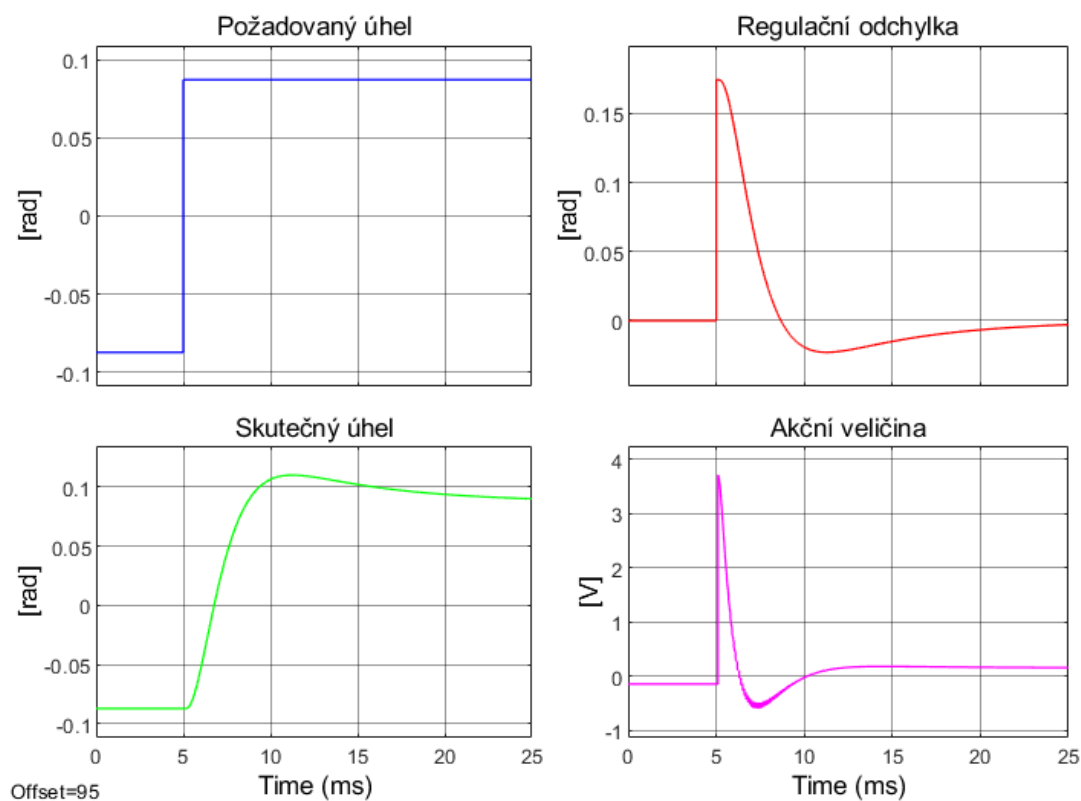
kde y je výstupní veličina. Důležitým detailem zde je, že difference výstupní veličiny vystupuje v rovnici se záporným znaménkem. Obě rovnice předpokládají lichoběžníkovou rekonstrukci spojitého signálu.

Schéma modifikovaného zpětnovazebního obvodu a výsledek simulace jsou na obrázcích níže.



Obrázek 25: Schéma simulace zpětnovazebního řízení s modifikací D složky

5. Návrh řízení galvanometru



Obrázek 26: Simulované odezvy veličin v řídicí smyčce s modifikovanou D složkou

Z výsledku simulace je zřejmé, že modifikace diferenční složky výrazně omezila velikost akčního zásahu na méně než 4 V ve špičce. Neblahým důsledkem modifikace je však značné zpomalení přechodového děje včetně prodloužení překmitu.

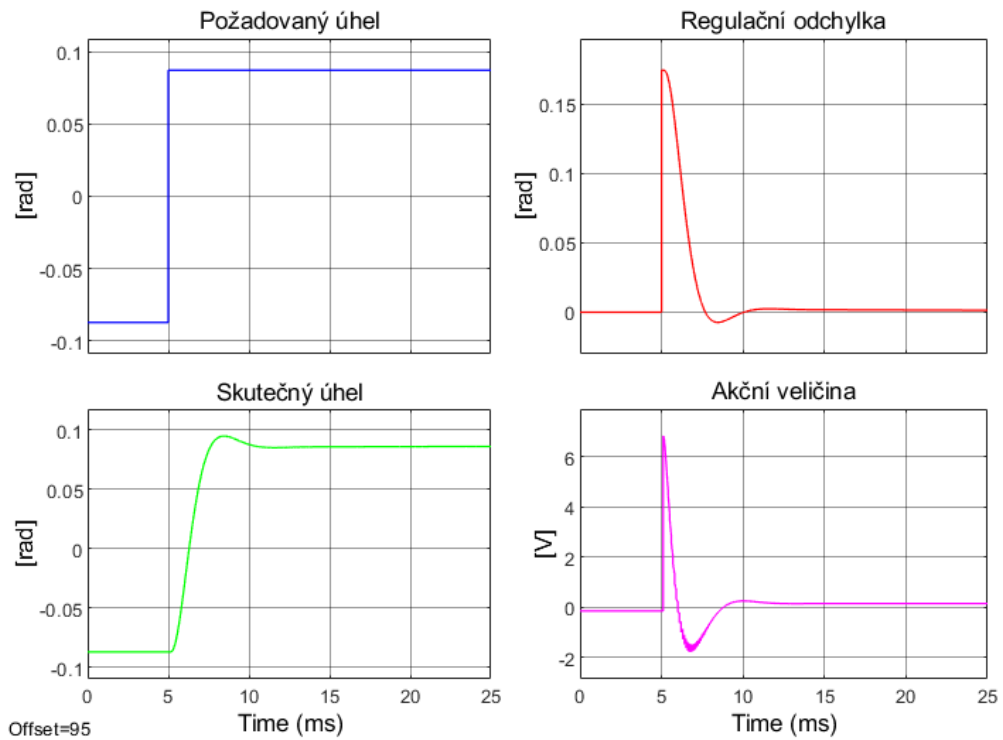
Tyto negativní dopady byly zvráceny úpravou konstant regulátoru podle obecně známých pravidel pro ruční ladění regulátorů. Je známo, že pro zrychlení přechodového děje je potřeba zvýšit zesílení proporční složky. Sumační (integrační) složka může při příliš vysokém zesílení vyvolávat překmity. Diferenční složka zpomaluje přechodový děj a tlumí zákmity [21] Upravené hodnoty konstant a výsledky simulace jsou níže.

Tabulka 5: Upravené konstanty regulátoru

Konstanta	Hodnota
K_p	40
K_i	750
K_d	0,047

5. Návrh řízení galvanometru

Níže je simulovaná odezva systému s novými parametry.

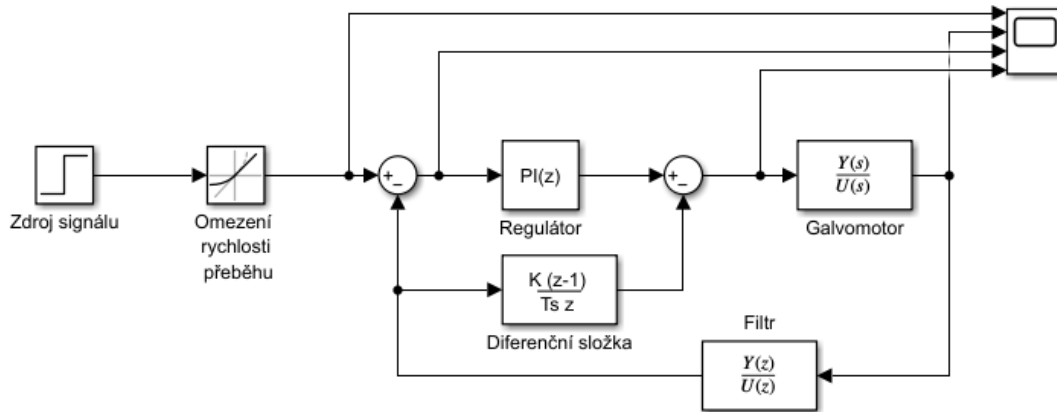


Obrázek 27: Simulované odezvy veličin v modifikované řídicí smyčce s upravenými konstantami

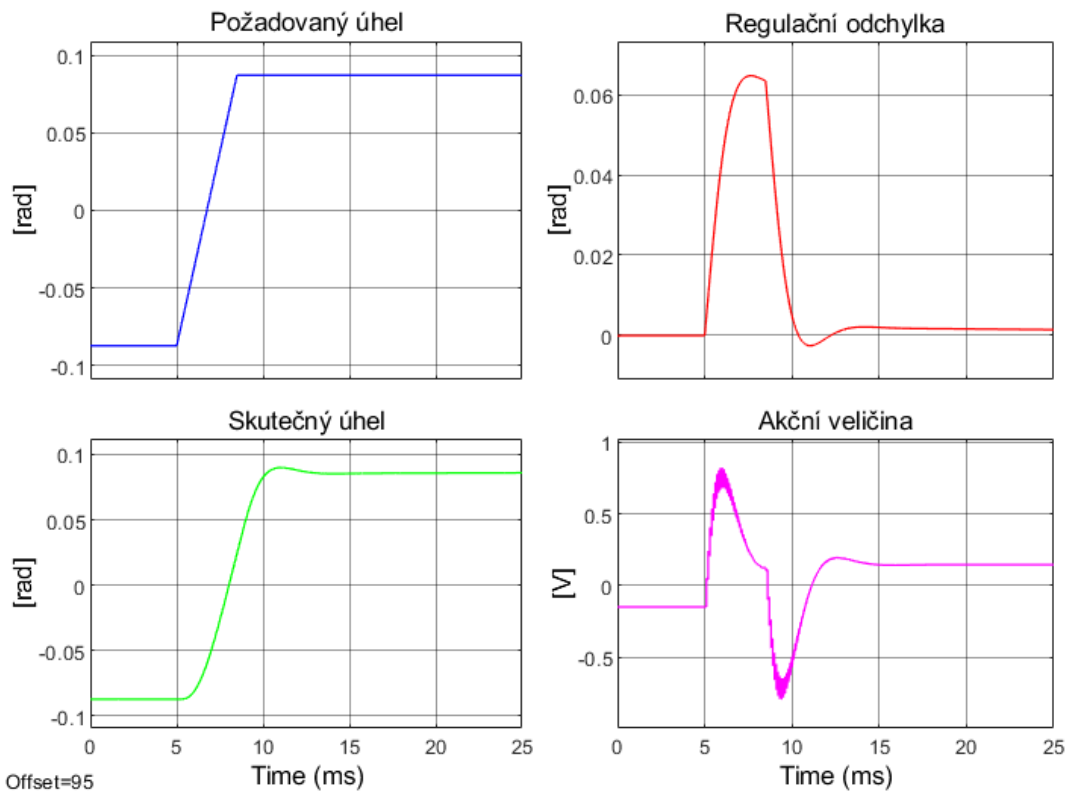
Úpravou konstant regulátoru bylo dosaženo zvýšení rychlosti přechodu za cenu mírného zvýšení akčního zásahu. Přechodový jev nicméně stále vykazuje značný překmit, který může být při skenování viditelný.

Potlačení zbývajících překmitů je možné provést omezením maximální rychlosti změny požadovaného úhlu. Omezení rychlosti přeběhu (slew rate) vstupu je v řízení galvomotorů dle literatury všeobecně používaným prvkem [3, s. 187]. Níže je schéma modifikovaného regulačního obvodu s omezením rychlosti přeběhu na hodnotu 50 rad/s, a výsledek simulace.

5. Návrh řízení galvanometru



Obrázek 28: Schéma simulace zpětnovazebního řízení s modifikací D složky a omezením rychlosti změny požadované hodnoty



Obrázek 29: Simulované odezvy veličin v řídicí smyčce s omezením rychlosti změny požadované veličiny

Omezením rychlosti změny požadovaného úhlu je dosaženo snížení překmitu za cenu mírného prodloužení přechodového děje. Stále je však splněn požadavek na rychlost přechodu. Při praktickém testování již není prakticky žádný překmit viditelný. Toto řešení má také nejmenší

5. Návrh řízení galvanometru

nároky na napájecí napětí. Modifikovaný model je přiložen v souboru „modifikovana_simulace.slx“

Rovnice navrženého regulátoru v polohovém tvaru lze zapsat následovně:

$$U(k) = K_p e(k) + K_i \frac{T_v}{2} \sum_{i=1}^k [e(i) - e(i-1)] + K_d \frac{y(k-1) - y(k)}{T_v} \quad (\text{VII})$$

kde U je akční zásah regulátoru, e je regulační odchylka, y je výstupní veličina (zde je uvažován signál úhlu po průchodu filtrem), T_v je vzorkovací perioda, K_p , K_i , K_d jsou konstanty regulátoru, a indexy k a i udávají pořadí vzorku.

Na závěr této kapitoly je vhodné zhodnotit stabilitu navrženého regulátoru. Na základě výše uvedené struktury (Obrázek 28) byl v prostředí MATLAB vytvořen spojitý model regulační smyčky včetně modelu galvanometru. Pomocí funkce pole() byly zjištěny póly uzavřené regulační smyčky.

Tabulka 6: Póly uzavřené regulační smyčky

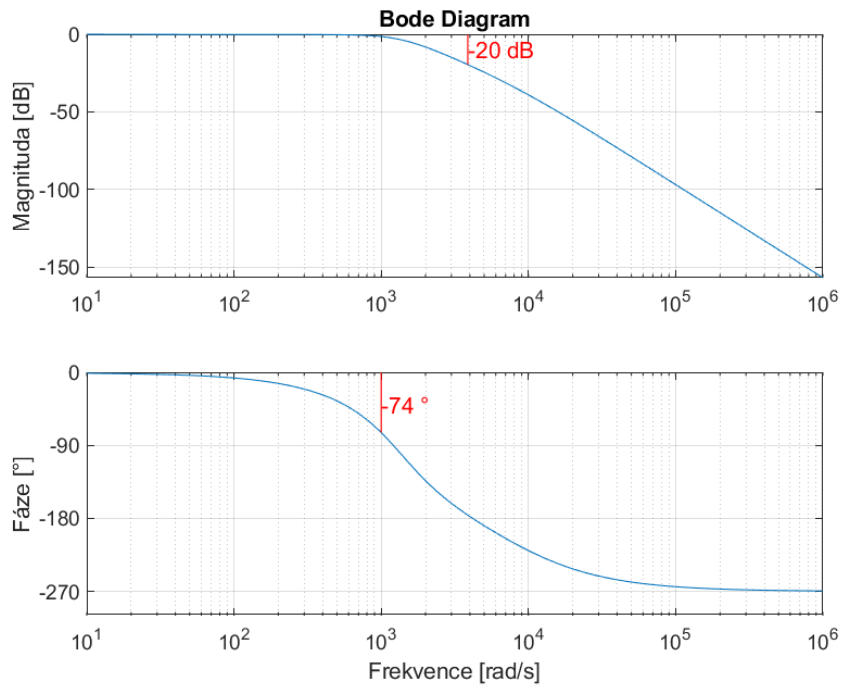
Póly uzavřené regulační smyčky
-266605 + 266572i
-266605 - 266572i
-266573 + 266573i
-266573 - 266573i
-8183
-956 + 941i
-956 - 941i
-18

Všechny póly soustavy mají zápornou reálnou část, z čehož plyne, že soustava je stabilní.

Při použití bilineární transformace (lichoběžníkové náhrady spojitého signálu) zůstává stabilita zachována také v diskrétní realizaci regulátoru [22].

Dále je možné pomocí amplitudové a frekvenční charakteristiky zjistit přibližné hodnoty rezervy fáze a zesílení. Nejprve byly na charakteristice nalezeny přibližné hodnoty fázové a amplitudové crossover frekvence. Následně byly na těchto frekvencích odečteny hodnoty rezervy fáze a zesílení. Takto zjištěná rezerva zesílení činí **20 dB**, a rezerva fáze **74°**.

5. Návrh řízení galvanometru



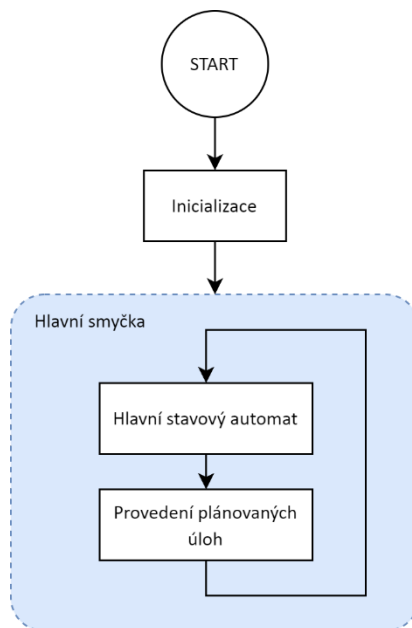
Obrázek 30: Amplitudová a frekvenční charakteristika soustavy
s vyznačenými hodnotami rezervy fáze a zesílení

6. Popis implementace řízení skeneru na platformě STM32

Aplikační kód pro platformu STM32 byl vyvinut v jazyce C++ ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE. Program je za účelem větší přehlednosti rozdělen do několika souborů. Seznam všech implementovaných funkcí a struktur je v příloze 4. Implementované funkce jsou importovány v souboru scanning.h a ten je poté importován v souboru main.c, kde běží hlavní smyčka programu. Nízkoúrovňové funkce, jako je inicializace a přístup k periferiím mikrokontroleru, a elementární plánování úloh za použití časovače, jsou obstarány knihovnamí vyvinutými společností BTL. Vývoj vlastních ovladačů je nezbytný chceme-li se vyhnout použití software neznáme provenience (jako jsou například knihovny STM32 HAL), jehož užití v lékařských přístrojích je problematické. Z licenčních důvodů není možné tyto knihovny k práci přiložit, v přílohách je tedy pouze implementovaný aplikační kód.

6.1. Sekvenční řízení

Po připojení prototypu skeneru k napájení je provedena inicializace všech potřebných periferií. Na konci tohoto procesu je spuštěn ADC převodník, který začíná měřit hodnoty ze senzorů natočení galvanometrů. Během inicializace běží watchdog s časovým limitem 400 ms. Následně program vstupuje do hlavní smyčky. Během hlavní smyčky běží watchdog s časovým limitem 1 ms.



Obrázek 31: Diagram programu

6.2. Hlavní smyčka

V hlavní je proveden hlavní stavový automat skeneru, a poté jsou plánovačem provedeny naplánované úlohy. Pomocí plánovaných úloh jsou obsluhovány funkce vyžadující periodické provádění. Jedná se o funkce pro skenování vzorů, zapínání kontroly regulačních odchylek a komunikaci po sériové lince.

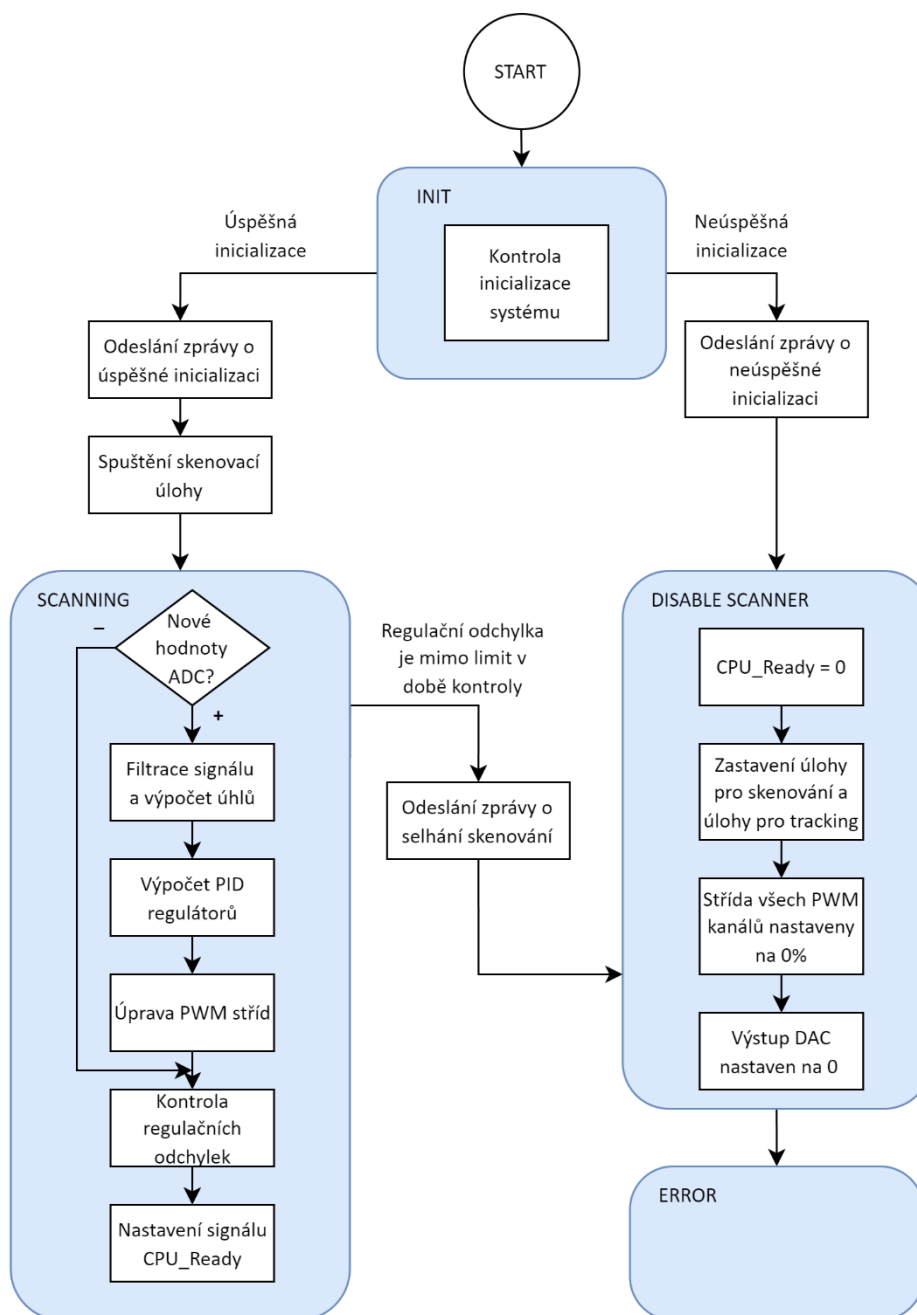
Hlavní stavový automat začíná ve stavu INIT. V tomto stavu dochází pouze ke kontrole inicializace periférií. K tomu slouží proměnná *bInitialisationFailed*, jejíž hodnota je inicializačními funkcemi nastavena na *true*, dojde-li při inicializaci některé z periférií k chybě. Proběhla-li inicializace bez chyb, je pomocí sériové linky odeslána zpráva o úspěšné inicializaci a program přechází do stavu *SCANNING*. Pokud inicializace selhala, je odeslána zpráva o neúspěchu (za předpokladu, že se podařilo inicializovat rozhraní USART) a program přechází do stavu *DISABLE_SCANNER*.

Ve stavu *SCANNING* je v každém běhu smyčky kontrolován příznak o dostupnosti nových hodnot z ADC převodníku. Je-li příznak nastaven, jsou naměřené hodnoty ze senzorů natočení nejprve zpracovány filtrem typu dolní propust, a poté jsou z filtrovaných hodnot vypočteny okamžité úhly natočení galvomotorů. Následně je proveden algoritmus PID regulátorů pro obě osy a vypočítaný akční zásah je aplikován na motory pomocí změny PWM signálů. Dále jsou ve stavu *SCANNING* při každém běhu kontrolovány regulační odchylky obou os a na základě

6. Popis implementace řízení skeneru na platformě STM32

výsledku této kontroly je zde prováděno nastavení hodnoty výstupu CPU_Ready. Dojde-li k překročení limitu regulační odchylky v momentě, kdy je prováděna kontrola, přechází automat do stavu *DISABLE_SCANNER*, jinak setrvává při dalším průběhu smyčky, ve stavu *SCANNING*.

Stav *DISABLE_SCANNER* slouží pro bezpečné vypnutí skeneru v případě poruchy, nebo v případě selhání galvomotoru. Nejdůležitějším krokem v tomto procesu je nastavení výstupu CPU_Ready na logickou nulu. Tím je nadřazený řídicí systém zdroje laserového záření okamžitě informován o selhání skeneru, a lze tak snížit pravděpodobnost, že dojde ke zranění pacienta, či obsluhy přístroje. Dále jsou zastaveny úlohy plánovače, vypnuto buzení galvomotorů (střída nastavena na 0 %), a vypnut DAC. Stavový automat poté trvale přechází do stavu *ERROR*.



Obrázek 32: Diagram hlavního stavového automatu

6.3. Měření a zpracování hodnot výstupní veličiny

Pro správnou funkci senzorů úhlu natočení galvanometrů je potřeba budít LED v senzoru stanoveným proudem. Dle manuálu výrobce byla zvolena hodnota 25 mA [11] Proudový zdroj prototypu má zesílení 20 mA/V (viz přílohu 2), DAC převodník je napájen napětím 3.3 V a má rozlišení 12 bitů. Potřebnou hodnotu DAC pro nastavení požadovaného proudu tak lze vypočítat následovně:

$$DAC = \frac{25 \text{ mA}}{20 \text{ mA}} \cdot \frac{1 \text{ V}}{3.3 \text{ V}} \cdot 4096 \doteq 1552 \quad (\text{VIII})$$

ADC převodník mikrokontroleru je nakonfigurován se vzorkovací frekvencí 1,05 MHz. Jeho vstup je však multiplexován mezi čtyřmi kanály, na které jsou přiváděna napětí ze sensorů natočení. Vzorkovací frekvence všech kanálů je tedy dohromady 262,5 kHz. Převodník měří s rozlišením 12 bitů. Změřené hodnoty jsou pomocí DMA přenášeny do dvojitého bufferu. Velikost bufferu je $2 \cdot 26 \cdot 4 = 208$ vzorků. Při každém běhu regulační smyčky se zpracovává 26 vzorků z každého kanálu ADC. K přepínání mezi částmi bufferu slouží funkce *OnDMA_HalfTransfer* a *OnDMA_TransferComplete*. Tyto funkce jsou volány z přerušení generovanými DMA při dokončení přenosu poloviny, respektive všech vzorků. DMA je provozována v kontinuálním režimu, po dokončení přenosu se tak automaticky spustí nový.

Naměřená hodnota je díky realizaci analogového zesilovače prototypu zatížena offsetem v podobě referenčního napětí 1,65 V. Na výpočet úhlu natočení to však nemá vliv, neboť ten se vypočítá z rozdílu kanálů senzoru. Dle manuálu výrobce je při buzení LED senzoru proudem 25 mA rozdílový signál senzoru $20 \mu\text{A}/^\circ$ [11]. Analogový zesilovač prototypu má zesílení $3,3 \text{ mV}/\mu\text{A}$, a ADC převodník s rozlišením 12 bitů je napojen na vnitřní referenční napětí mikrokontroleru 3,3 V [23]. Hodnota úhlu v radiánech lze vypočítat následovně:

$$\theta[\text{rad}] = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\text{KanálB} - \text{KanálA}}{4096} \cdot \frac{3,3 \text{ V}}{66 \text{ mV}/^\circ} \quad (\text{IX})$$

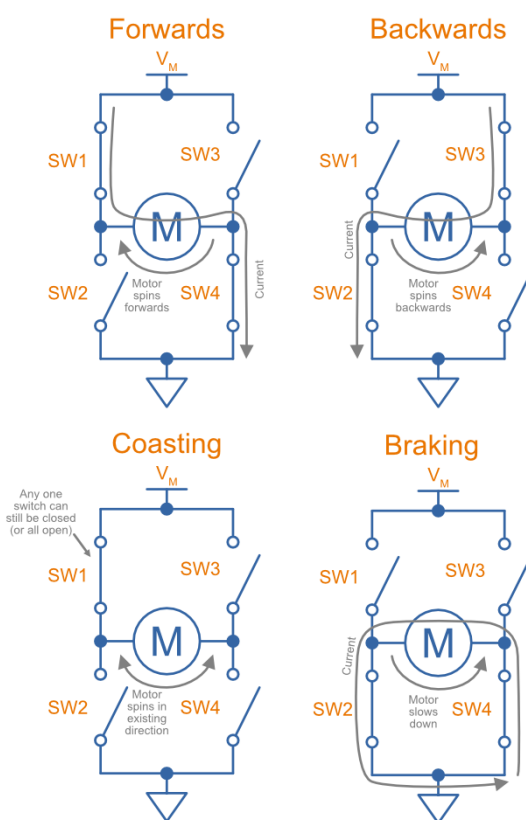
Z experimentální ověření však vyplynulo, že takto získanou hodnotu je ještě nutné vynásobit zhruba konstantou 1,25. Výpočet úhlu je implementován funkcí *CalculateMirrorAngle*, konstanty pro výpočet jsou uloženy ve struktuře *GALVOMOTOR_PARAMETERS_STRUCT*.

6.4. Regulátor

Regulátor navržený v kapitole 5 je implementován funkcí *AngleRegulator*. Funkce přijímá jako parametry požadovaný úhel a aktuální úhel. Proměnné regulátoru jsou uloženy v globální instanci struktury *ANGLE_REGULATOR_STRUCT* a konstanty jsou uloženy ve struktuře *ANGLE_REGULATOR_PARAMETERS_STRUCT*. Kromě funkcionality popsané v kapitole 5 implementuje funkce ještě anti-windup mechanismus pro integrační složku omezením maximální hodnoty integrované regulační odchylky.

6.5. Buzení galvomotorů pomocí H-můstku

Buzení každého z galvomotorů je ovládáno pomocí dvou kanálů PWM. Dle manuálu výrobce je můstek v aktivní fázi (viz režim „Forwards“ nebo „Backwards“ na obrázku níže), je-li jeden z PWM vstupů v logické 0, zatímco druhý je v logické 1. Jsou-li oba vstupy v logické 1, jsou sepnuty tranzistory pouze spodní strany můstku, a dochází k pomalému úbytku proudu v obvodu v důsledku odporových ztrát („Braking“ na obrázku níže). Výrobce doporučuje ponechat jeden vstup na logické hodnotě 1 a měnit efektivní napětí aplikované na cívku motoru pomocí střídy PWM signálu na druhém vstupu. Střídají se tak režimy „Forwards“/„Backwards“ a „Braking“[18].



Obrázek 33: Stav H-můstku[24]

Napětí aplikované na cívku motoru je při tomto režimu přímo úměrné negativní střídě PWM signálu. Při napájecím napětí H-můstku 12 V, a požadovaném napětí na svorkách motoru U , lze střídy PWM kanálů $Duty1$, $Duty2$ vypočítat následovně:

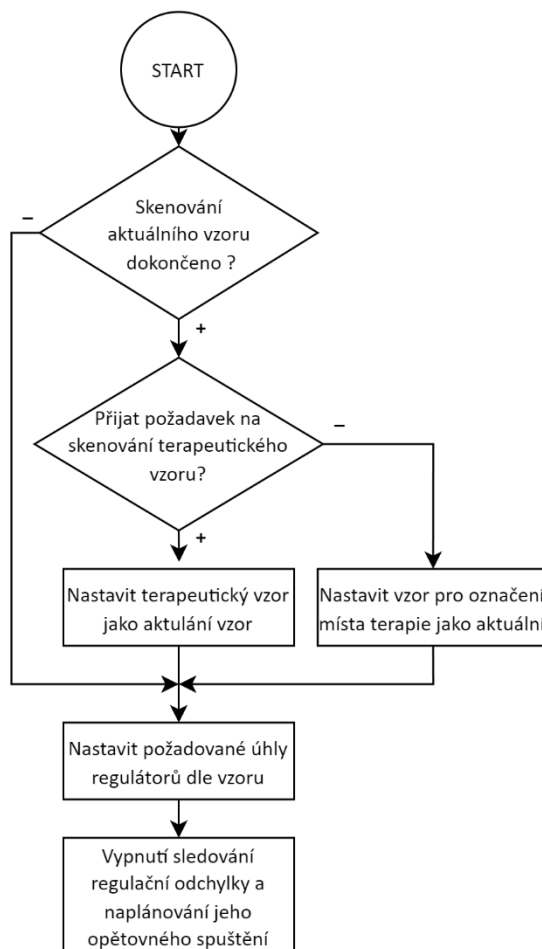
$$\begin{aligned} U \geq 0: \quad & Duty1 = 100 \cdot \left(1 - \frac{U}{12}\right), Duty2 = 100 \text{ [%]} \\ U < 0: \quad & Duty1 = 100, Duty2 = 100 \cdot \left(1 + \frac{U}{12}\right) \text{ [%]} \end{aligned} \quad (X)$$

Tento výpočet, a aplikaci vypočítaných stříd implementuje funkce *ApplyMotorPower*. Parametry jsou uloženy ve struktuře *GALVOMOTOR_PARAMETERS_STRUCT*. Frekvence pulsně šířkové modulace byla zvolena 20 kHz, tak aby byla mimo slyšitelnou oblast.

6.6. Skenování vzorů

Vzory jsou uloženy v souboru *patterns.h* jako pole souřadnic úhlů pro obě osy X a Y. Souřadnice jsou bezrozměrné hodnoty v rozsahu $\langle -1; 1 \rangle$. Velikost výsledného vzoru je tak nutné nastavit pomocí proměnné *m_fPatternScale*, která udává maximální úhel vzoru v radiánech. Tato proměnná je spolu s dalšími proměnnými pro nastavení parametrů skenování uložena v globální instanci proměnné typu *SCANNING_STRUCT*. Parametry trajektorie, jako je perioda přechodu mezi body, perioda inhibice kontroly regulační odchylky, limit regulační odchylky a příznak pro aplikaci terapie jsou uloženy ve struktuře *SCANNING_STRUCT* jako proměnná typu *TRAJECTORY_PARAMETERS_STRUCT*. Lze tak vytvořit více předdefinovaných konfigurací s různou rychlostí skenování. Skenování vzoru bez aplikace terapie je vhodné pro označení místa terapie naváděcím laserem.

Pro skenování vzoru je pomocí plánované úlohy periodicky volána funkce *NextStep*. Uvnitř této funkce je volána funkce *ScanPattern*, která postupně prochází pole souřadnic a nastavuje souřadnice aktuálního skenovaného bodu, včetně škálování, jako požadované hodnoty regulátorů. Funkce *NextStep* také přepíná mezi vzory pro označení ošetřovaného místa a vzory pro aplikaci terapie, a nastavuje úlohy plánovače pro skenování a kontrolu regulační odchylky.

Obrázek 34: Diagram funkce *NextStep*

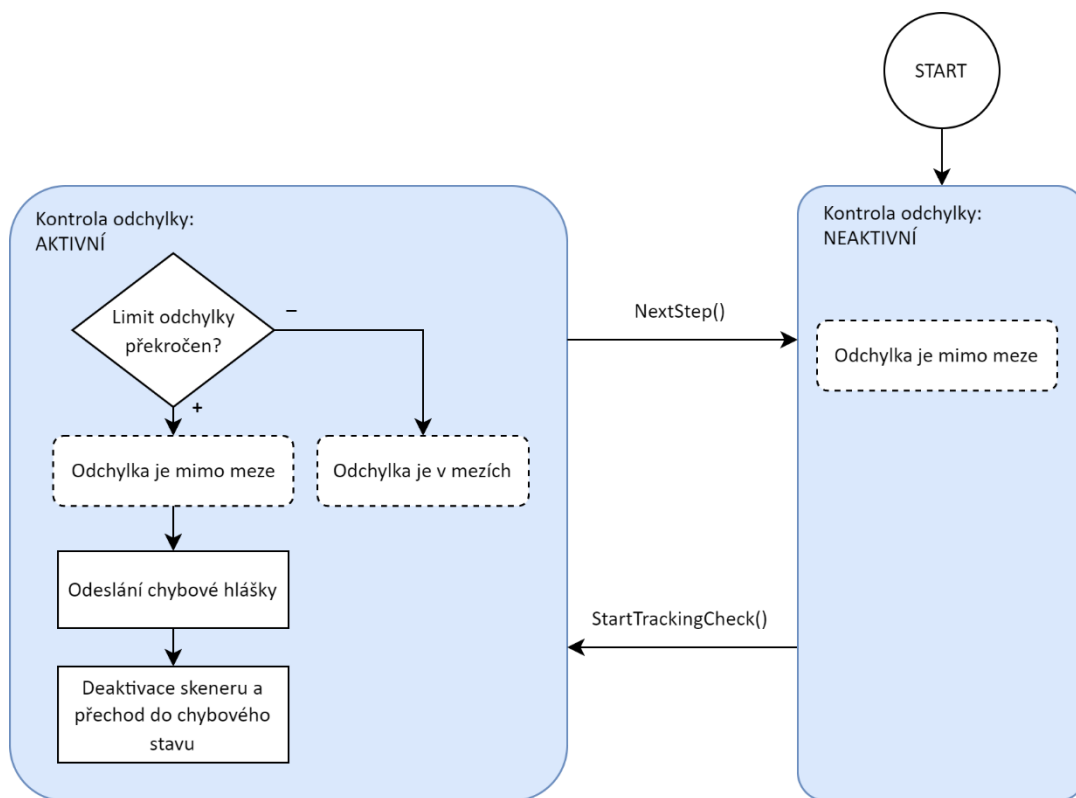
6.7. Kontrola regulační odchylky

Kontrola regulační odchylky je implementována jako opatření pro snížení rizika plynoucího z mechanického selhání galvomotoru, vniknutí cizího tělesa do skeneru, případně jiné poruchy fyzických součástí skeneru, jako jsou vodiče, senzory úhlu natočení apod. Kontrola odchylky je aktivní pouze v momentě, kdy je předpokládáno, že jsou obě osy natočeny do cílových úhlů pro daný bod vzoru. Regulační odchylka navrženého regulátoru totiž při přechodu mezi dvěma body vzoru překračuje stanovený limit. Při každé změně požadovaných úhlů ve funkci *NextStep* je tak kontrola deaktivována, a po uplynutí předem definované doby je opět aktivována plánovanou úlohou pomocí funkce *StartTrackingCheck*. Doby inhibice kontroly je možné konfigurovat pomocí proměnné *m_nTransitionDelay_ms*, která je jednou z proměnných struktury *TRAJECTORY_PARAMETERS_STRUCT*. Informace o tom, zda je kontrola aktivní je uložena v proměnné *m_eTrackingCheckState*, která je součástí struktury *SCANNING_STRUCT*. Při aktivní

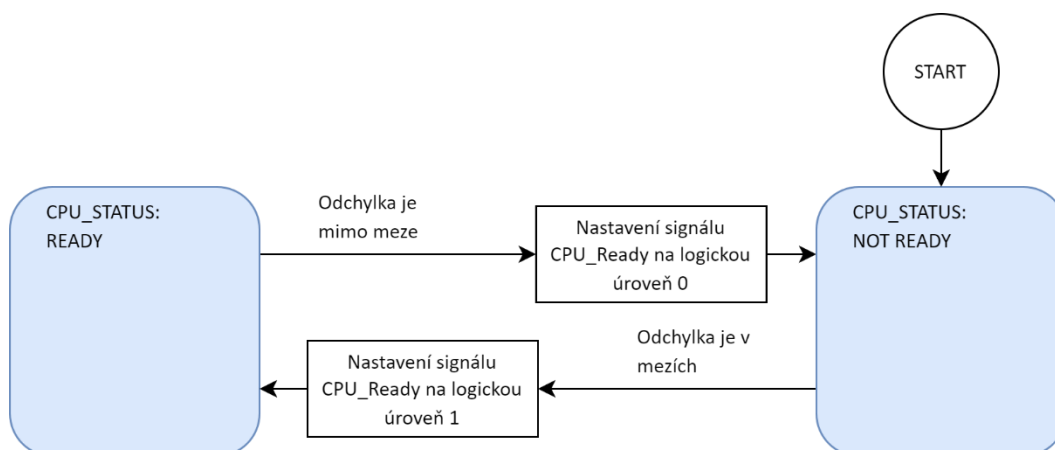
6. Popis implementace řízení skeneru na platformě STM32

kontrole jsou regulační odchylky obou os kontrolovány při každém běhu hlavní smyčky. Informace o výsledku kontroly je uložena v proměnné *m_eTrackingStatus*.

Má-li být při skenování vzoru aplikován terapeutický laser, je při kontrole odchylky nastaven výstupní signál CPU_Ready na logickou hodnotu 1, v opačném případě zůstává tento signál, stejně jako v době přechodu mezi dvěma body, na logické úrovni 0. Dojde-li kdykoliv v průběhu skenování k překročení limitu regulační odchylky na některé z os, je výstup CPU_Ready nastaven na logickou úroveň 0, dále je odeslána chybová hláška, skener je deaktivován a přechází do chybového stavu. Informace o stavu signálu CPU_Ready je uložena v proměnné *m_eCPUStatus* ve struktuře *SCANNING_STRUCT*. Na obrázcích níže je stavový diagram automatu pro kontrolu regulačních odchylek a stavový diagram automatu pro nastavování signálu CPU_Ready na základě výsledku kontroly.



Obrázek 35: Diagram automatu pro kontrolu regulačních odchylek



Obrázek 36: Diagram automatu pro nastavování signálu CPU_Ready

6.8. Komunikace

Firmware implementuje základní textové ovládací rozhraní skrze sériovou linku. K UART rozhraní mikrokontroleru je připojen driver SN65HVD75, který sériovou komunikaci převádí na protokol RS485. Komunikace je poloduplexní, k přepínání směru je použit GPIO pin mikrokontroleru. Komunikace je obsluhována a zpracovávána pomocí plánované úlohy, která volá funkci *HandleCommunication* periodicky každých 5 ms. Uvnitř této funkce je volána funkce *ProcessCommunication*, která implementuje stavový automat interaktivní poloduplexní komunikace, a funkce *ParseCommand*, která parsuje obdržené zprávy. Jedná se o velmi jednoduchou implementaci komunikace spíše pro demonstrační účely. Pro konečné řešení firmware je parsování textových zpráv na mikrokontroleru nepraktické, namísto toho je lepší použít protokol požívající rámce s předem definovanými poli.

Proměnné sériové komunikace jsou uloženy v globální instanci proměnné typu *USART_CONTROL_STRUCT*. Firmware přijímá několik textových příkazů tvořených třemi znaky z nichž poslední musí být symbol `\r` (return). Přijetí platného příkazu je potvrzeno odpovědí „Ack“ (Acknowledgement), přijetí neplatného příkazu je indikováno odpovědí „Invalid command“. Firmware také sám odesílá předdefinované zprávy o úspěšné, či neúspěšné inicializaci, a o selhání skeneru při překročení limitu regulační odchylky. Výčet příkazů, odpovědí a jejich významů je v tabulce níže. Pokud je přijat platný příkaz, nastaví funkce *ParseCommand* odpovídající příznak v globální instanci struktury *COMMAND_FLAGS_STRUCT*. Na základě nastavených příznaků v této struktuře mohou být v dalších částech programu provedeny požadované akce.

6. Popis implementace řízení skeneru na platformě STM32

Tabulka 7: Význam příkazů, odpovědí a zpráv komunikačního rozhraní

Příkazy	
tr	trigger – příkaz k zahájení skenu terapeutického vzoru
p1	pattern1 – příkaz k přepnutí terapeutického vzoru na variantu 1 (esovitý vzor)
p2	pattern2 – příkaz k přepnutí terapeutického vzoru na variantu 2 (pseudonáhodný vzor)
Odpovědi	
Ack	Acknowledgement – příkaz je platný a byl přijat
Invalid command	Neplatný příkaz
Zprávy	
Init successful	Inicializace skeneru proběhla bez chyb
Init failed	Inicializace skeneru selhala
Scanning failure	Skenování selhalo z důvodu překročení limitů regulačních odchylek

7. Ověření navrženého řešení

Pro ověření funkce implementovaného software byly změřeny analogové signály ze senzorů natočení před vstupem do MCU a digitální signál CPU_Ready na výstupu MCU. Měření bylo provedeno na osciloskopu Keysight InfiiVision MSOX2024A s následujícím zapojením:

Tabulka 8: Zapojení osciloskopu pro ověření funkcionality

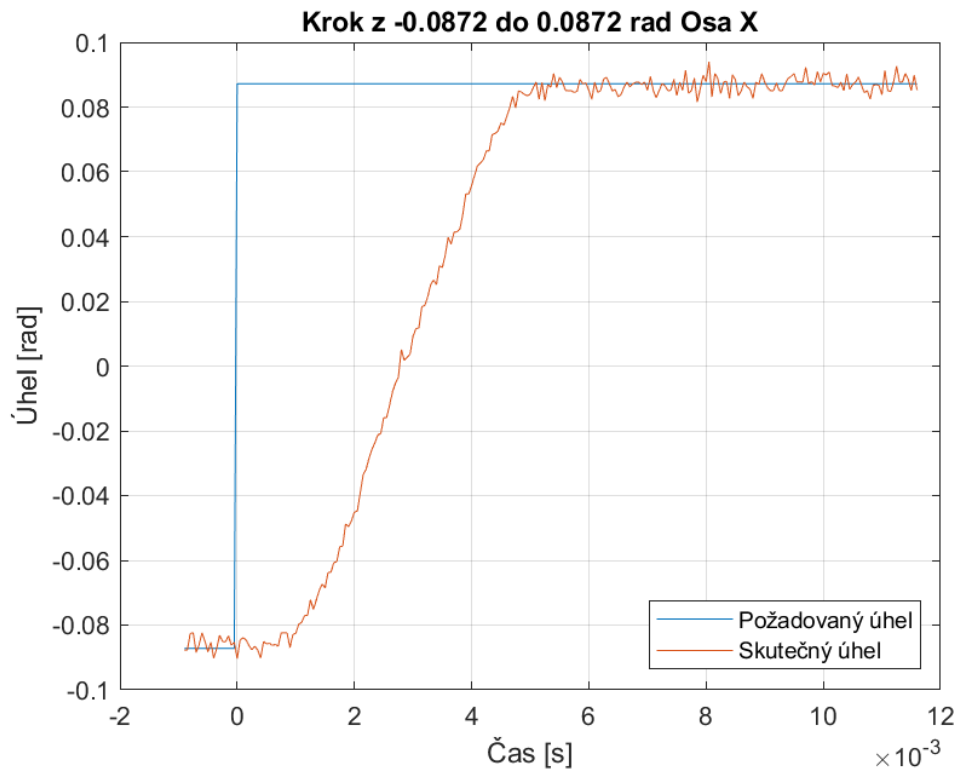
Signál	Kanál osciloskopu
ADC_PosXA	1
ADC_PosXB	2
ADC_PosYA	3
ADC_PosYB	4
CPU_Ready	D0

Naměřená data jsou přiložena v souborech „data_regulator.csv“, „data_square_pattern.csv“, „data_s_pattern.csv“, „data_pseudorandom_pattern.csv“, a „data_galvo_failure.csv“. Následně byla data importována do prostředí MATLAB. Použitý skript je přiložen v souboru „overeni.mlx“.

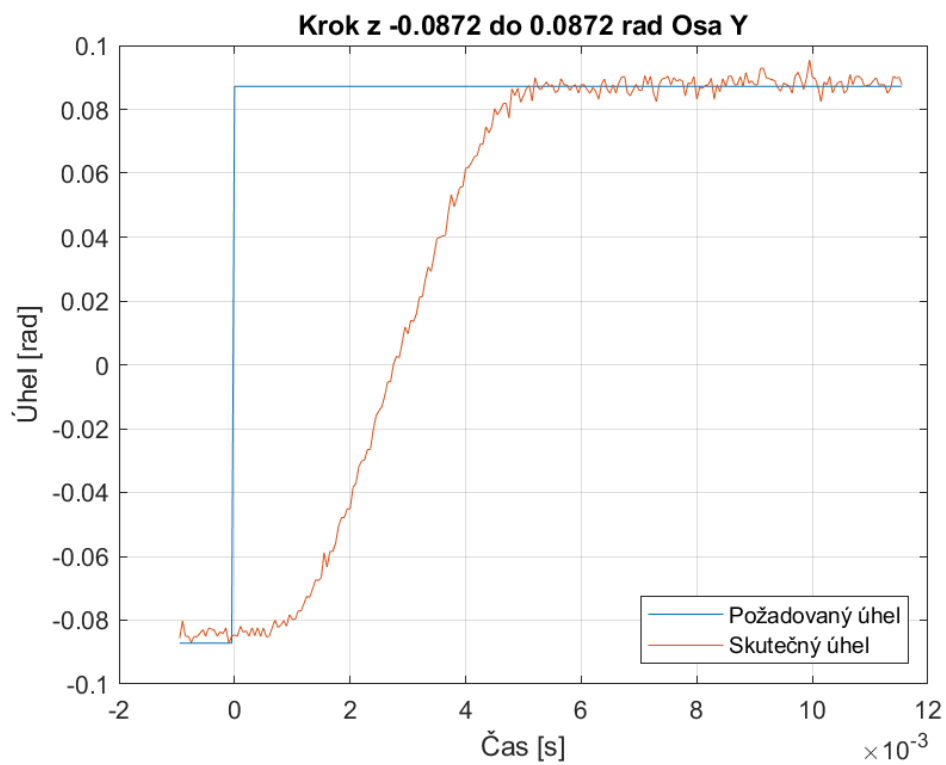
7.1. Ověření regulátoru

Signál požadovaného úhlu existuje pouze jako proměnná v paměti mikrokontroleru. Pomocí debuggeru nebylo možné jej pro účely ověření dostatečně rychle vyčítat. Program byl proto k tomuto měření mírně modifikován tak, aby při změně požadovaného úhlu na novou hodnotu byl fyzicky nastaven výstupní GPIO pin mikrokontroleru na logickou úroveň 1. Tím bylo možné synchronizovat měřené signály pomocí digitálního vstupu osciloskopu.

7. Ověření navrženého řešení



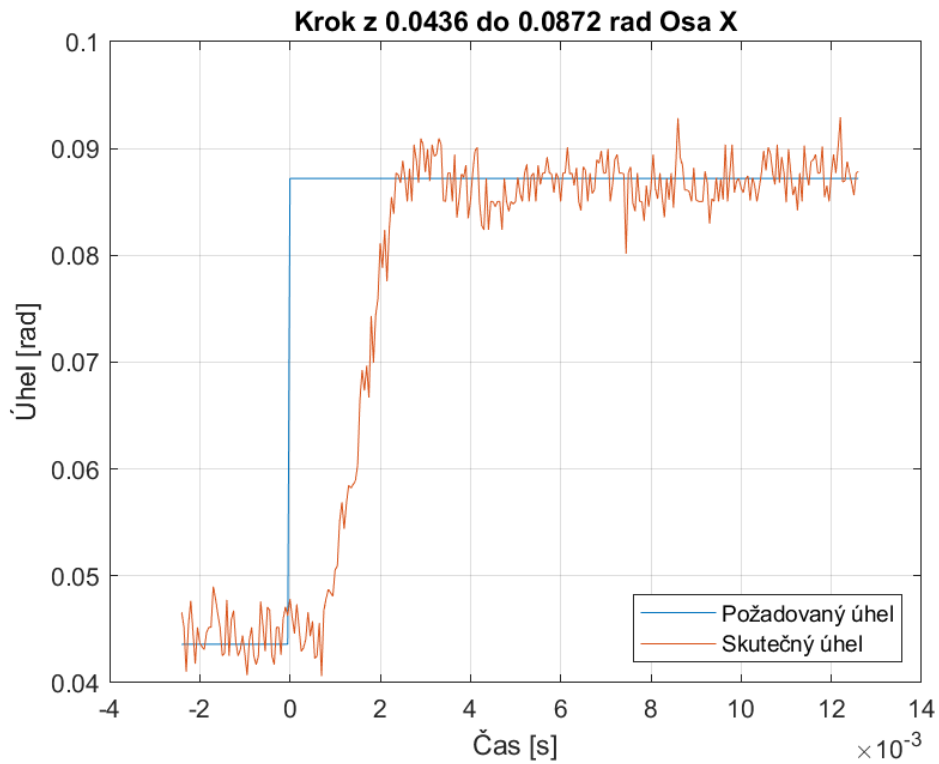
Obrázek 37: Naměřená odezva osy X - plný pracovní rozsah



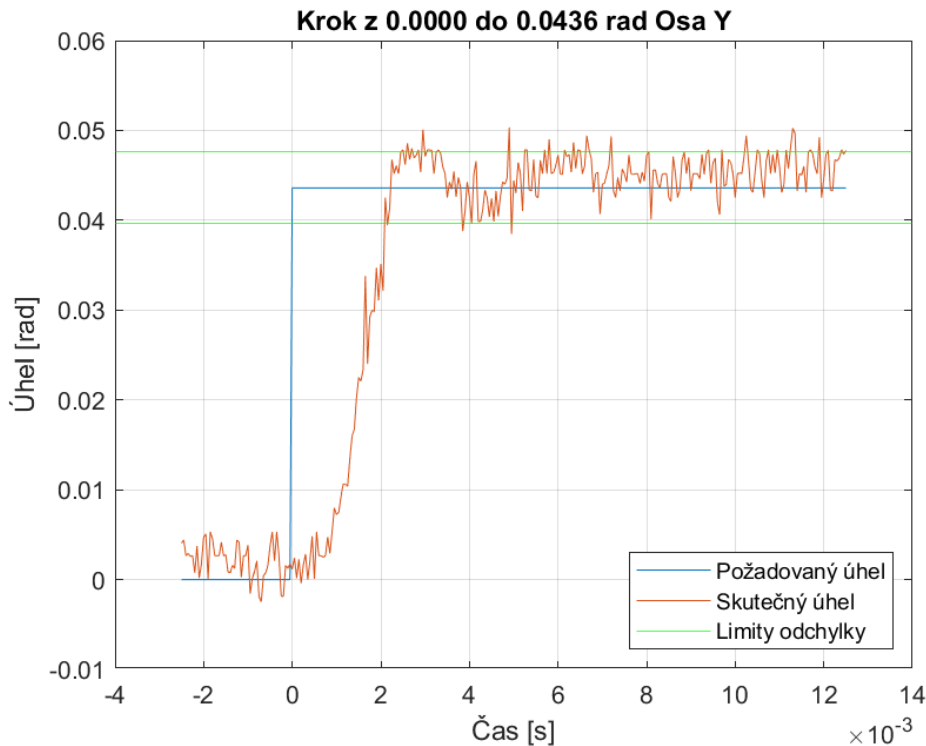
Obrázek 38: Naměřená odezva osy Y - plný pracovní rozsah

7. Ověření navrženého řešení

Z naměřených charakteristik je patrný velmi lineární průběh přechodu mezi požadovanými úhly. Přejed z $-0,0872$ do $0,0872$ radiánů využívá plný pracovní rozsah skeneru dle požadavků. Lze vidět, že navržený regulační systém dosáhne v tomto případě cílového úhlu zhruba po **5 ms** od změny požadovaného úhlu.



Obrázek 39: Naměřená odezva osy X - malý krok



Obrázek 40: Naměřená odezva osy Y - malý krok

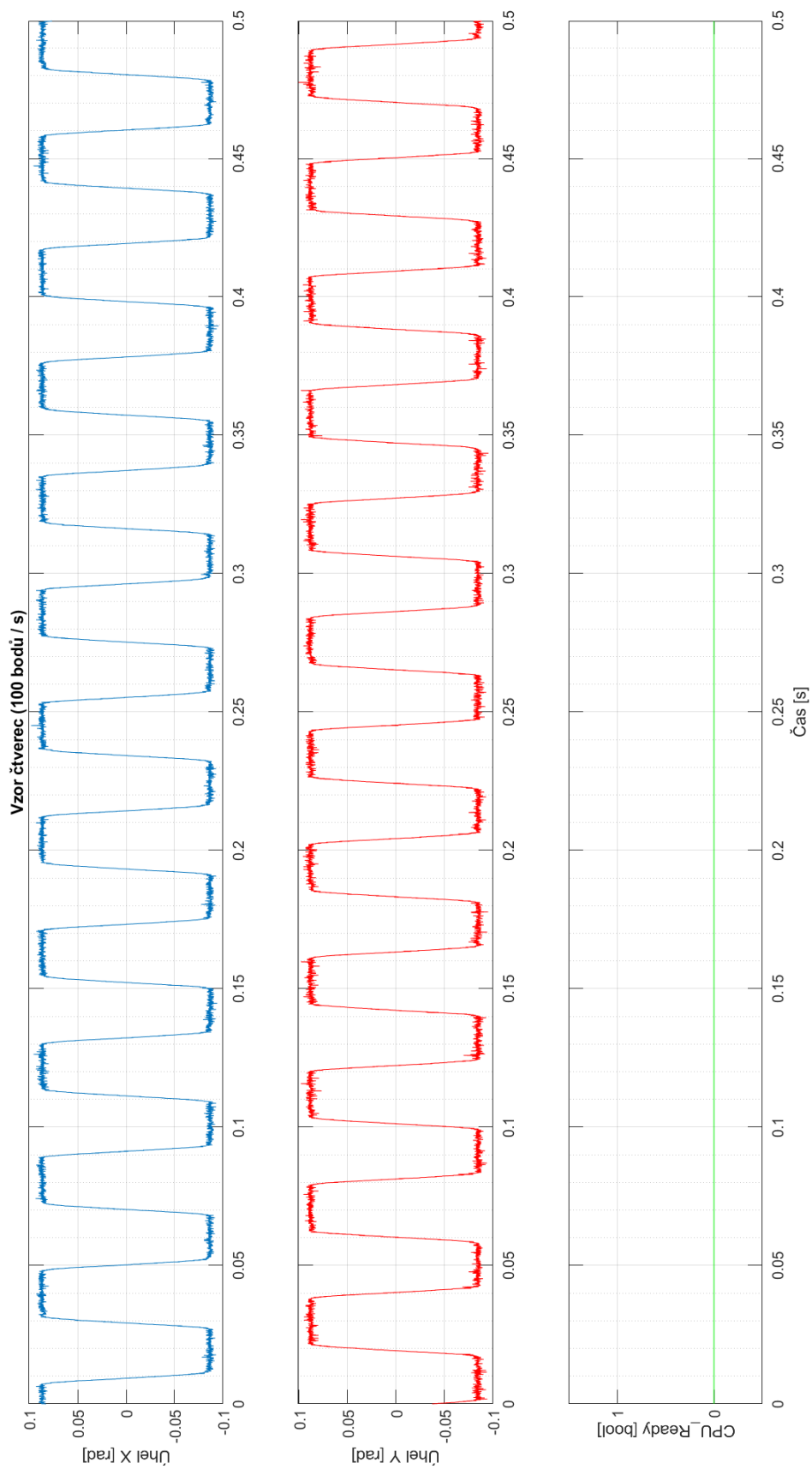
Z naměřených charakteristik menších změn požadovaného úhlu je patrné, že je cílový úhel dosažen dříve než při velké změně ($\sim 2 \text{ ms}$). V blízkosti cílového úhlu však dochází k drobnému zákmitu. Skutečný úhel se tak ustálí na cílové hodnotě o něco později. Pro srovnání velikosti zákmitu jsou v druhém obrázku vyznačeny limity tolerované odchylky $\pm 0,004$ radiánu. Překmit by tedy (dle definice v požadavcích) neměl být v koncové aplikaci viditelný. Limity také dokazují potřebu filtrace zpětnovazebního signálu úhlu pomocí firmware. Šum v signálu již před vstupem do mikrokontroleru je natolik významný, že by jeho náhodné fluktuace nutně vedly k časté detekci překročení limitů regulační odchylky.

Z výše uvedeného lze konstatovat splnění požadavku 1)

7.2. Ověření skenování a kontroly regulačních odchylek

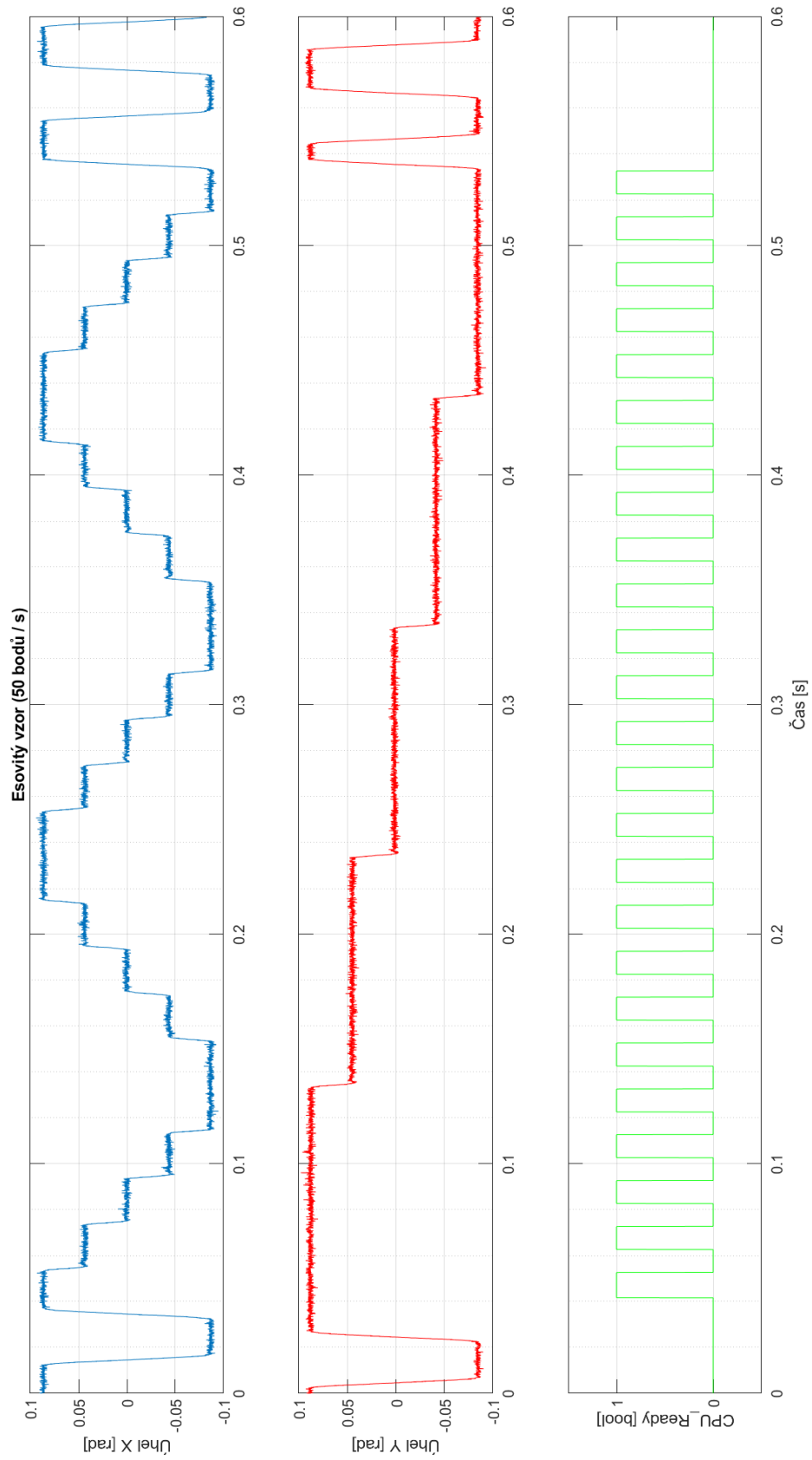
Pro ověření správné funkce skenování vzorů byly současně měřeny zpětnovazební signály obou os a výstup CPU_Ready. Výsledky jsou vyobrazeny na diagramech níže. V posledním diagramu je ověřeno překročení limitů regulačních odchylek při skenování terapeutické trajektorie (jednomu z galvomotorů je mechanicky zabráněno v pohybu).

7. Ověření navrženého řešení



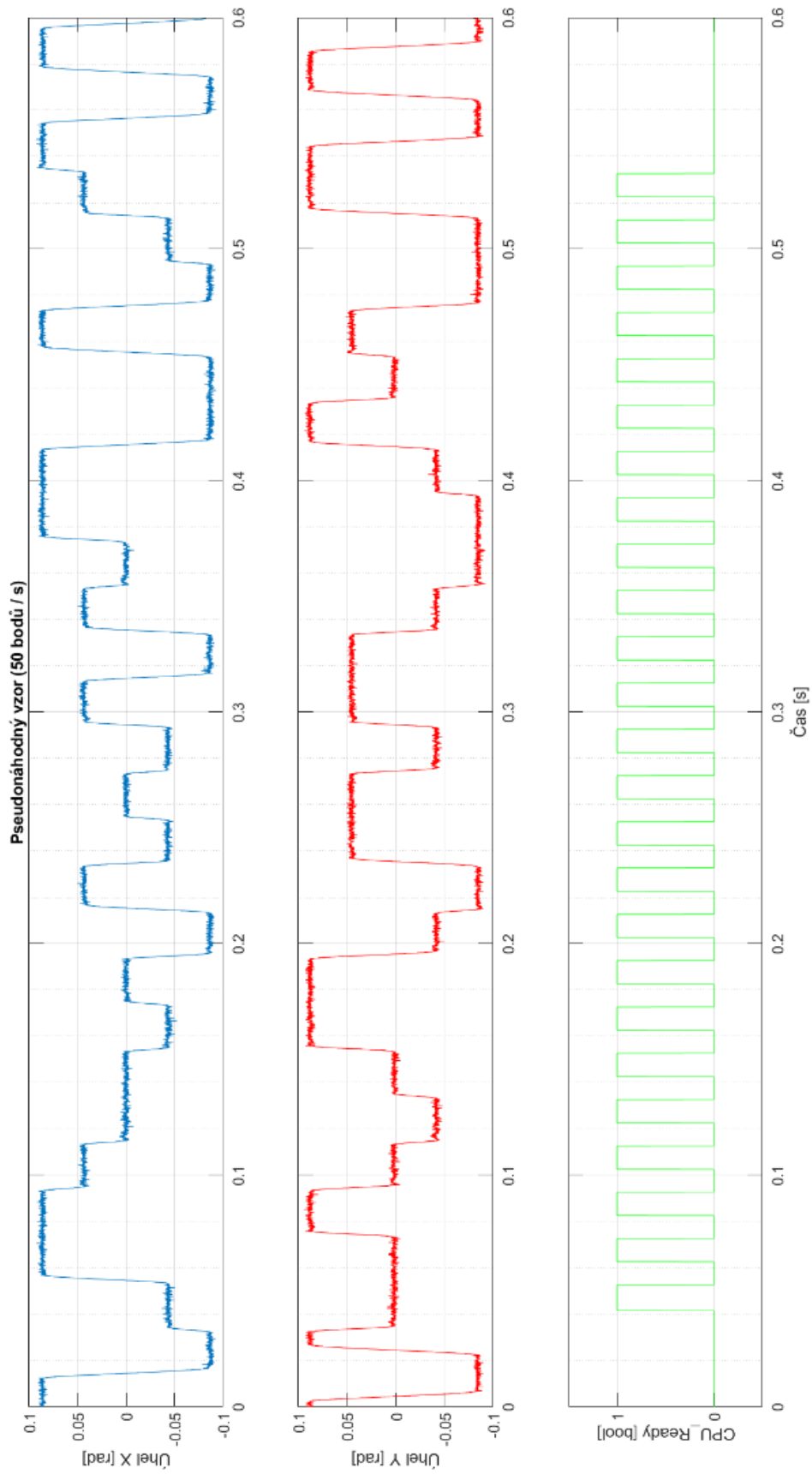
Obrázek 41: Naměřený časový diagram vzoru čtverec - bez terapie

7. Ověření navrženého řešení



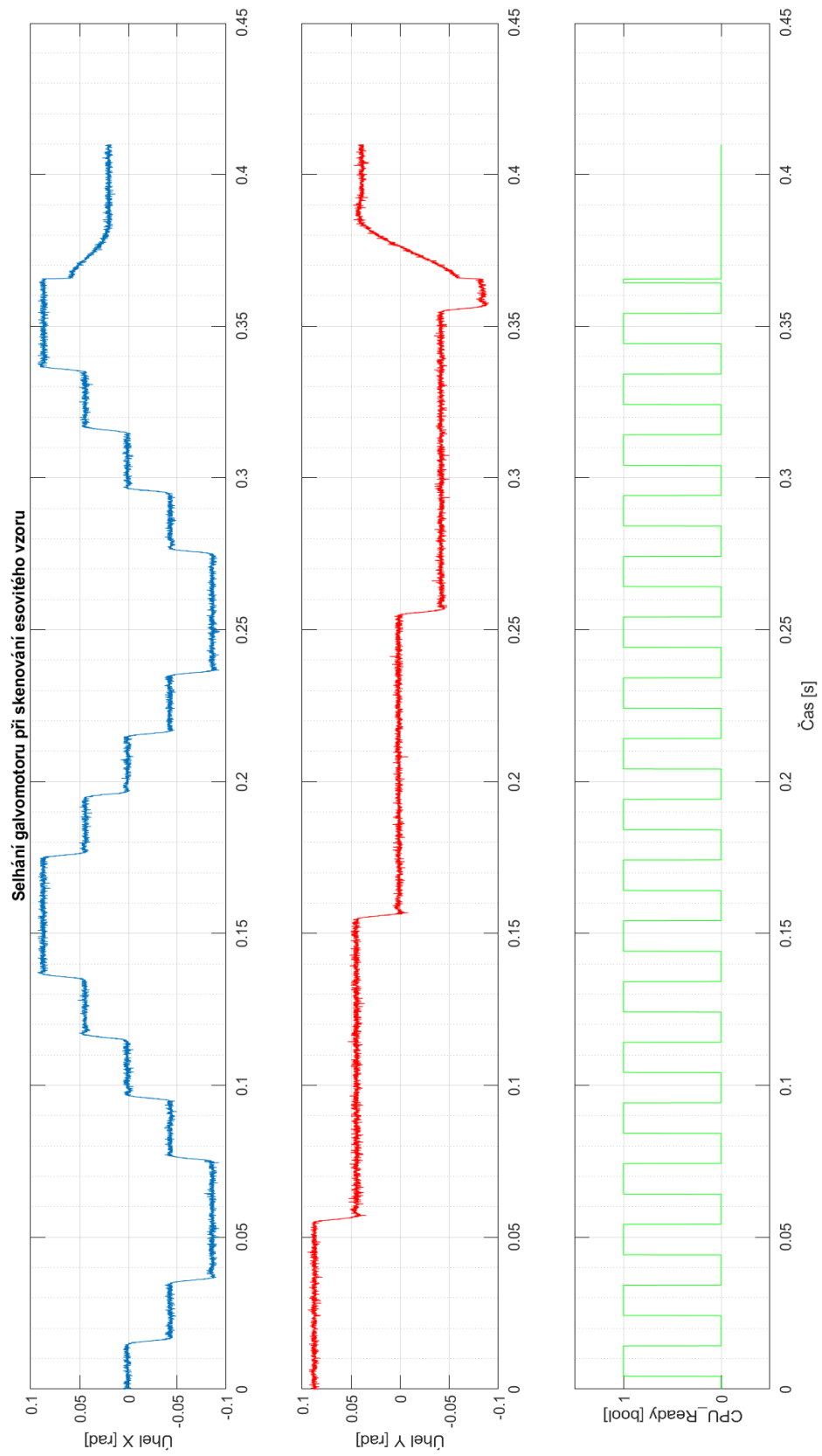
Obrázek 42: Naměřený časový diagram esovitého vzoru - s terapií

7. Ověření navrženého řešení



Obrázek 43: Naměřený časový diagram pseudonáhodného vzoru - s terapií

7. Ověření navrženého řešení



Obrázek 44: Naměřený časový diagram selhání galvanometru při skenování esovitého vzoru - s

terapií

7. Ověření navrženého řešení

Na uvedených diagramech lze vidět, že časové průběhy skenovacích úhlů odpovídají vzorům definovaným v požadavcích. (Požadavek 2)

V diagramech na obrázcích 42 a 43 lze také vidět na začátku a na konci přepnutí mezi skenováním čtvercového vzoru bez terapie a terapeutickým vzorem. (Požadavek 3)

Signál CPU_Ready je nastaven vždy až v momentě, kdy jdou obě osy natočeny v požadovaných úhlech. Při překročení limitů regulační odchylky je signál CPU_Ready neprodleně resetován na logickou úroveň 0. (Požadavky 4 a 5)

7.3. Ověření komunikace

Komunikace skeneru byla otestována zadáním všech povolených příkazů, neplatného příkazu, a simulováním mechanické poruchy galvanometru. Komunikace je zachycena na obrázku níže. Implementace splňuje požadavek 6.

```
Init successful
tr
Ack
p2
Ack
tr
Ack
p1
Ack
aa
Invalid command
tr
Ack

Scanning failure
█
```

Obrázek 45: Záznam sériové komunikace

Diskuse výsledků

Implementované řešení splňuje požadavky stanovené v kapitole 4. Doba přechodu mezi dvěma body trajektorie kolem 6 ms (i se zohledněním zákmitů) je dostatečně krátká pro použití skeneru k rozmítání pulzních laserů s opakovací frekvencí zhruba do 100 Hz (v závislosti na délce laserového pulzu). Přechody mezi body trajektorie vykazují prakticky neznatelné překmity, a regulace je stabilní. Určitého zvýšení rychlosti skenování, za cenu zvýšení překmitů, je možné dosáhnout odstraněním omezení rychlosti přeběhu signálu požadovaného úhlu.

Zásadním omezením dalšího zvyšování frekvence skenování je nemožnost použitelné realizace zpětné vazby proudu na současném hardwarovém prototypu (jak bylo popsáno v kapitole 5.3). Aby bylo možné proudovou smyčku realizovat, bylo by vhodné umístit rezistor pro snímání proudu do série hned vedle vinutí galvomotoru. Tak je možné měřit procházející proud nezávisle na stavu H-můstku. Nekompenzovaná dynamika elektrického obvodu galvanometru zanáší do charakteru řízené soustavy fázové zpoždění, jehož vliv roste s rostoucími úhlovými rychlostmi pohybu. Řešení tohoto problému spočívá v zavedení proudové regulační smyčky.

Protože je časová konstanta RL obvodu galvomotoru velmi krátká ($\sim 100 \mu\text{s}$), může být v tomto případě výhodné realizovat řízení proudu analogově. Digitální realizace proudového regulátoru klade vysoké nároky na výpočetní výkon, může proto být vhodnější použít FPGA nebo specializované mikrokontrolery pro DSP [9, s. 241].

Při návrhu případného proudového řízení je také třeba vzít v úvahu, že použitý H-můstek DRV8231 automaticky omezuje proud vinutím galvomotoru 2,2 A (podle hodnoty měřicího rezistoru R18/R19).

Závěr

Na začátku práce byly popsány technologie používané pro rozmítání laserových svazků. Větší pozornost byla věnována skenerům s galvomotory. Dále byly popsány známé přístupy k řízení galvanometrických skenerů, jejich výhody a nevýhody.

V další části práce byla stručně popsána problematika vývoje software pro lékařská zařízení a požadavků, které na procesy ve vývoji klade norma IEC62304. Na modelové situaci byl demonstrován postup analýzy rizik spojených se software, a poté byl na základě výsledků této analýzy vysvětlen postup klasifikace firmware skeneru do bezpečnostní třídy.

Pro firmware skeneru byly stanoveny základní požadavky na funkcionalitu. Na základě těchto požadavků byl proveden návrh regulační smyčky pro řízení úhlu galvomotoru. Návrh vycházel z modelu galvanometru s parametry, které byly identifikovány pomocí měření charakteristiky reálné soustavy. Byly diskutovány omezení prototypu hardware a jejich vliv na možné řešení regulace.

Navržené řešení bylo následně implementováno na platformě STM32, a byly popsány základní principy jeho stavby a funkce. Na závěr bylo řešení ověřeno pomocí měření zpětnovazebních signálů osciloskopem. Implementované řešení může být použito pro rozmítání laserů s opakovací frekvencí zhruba do 100 Hz.

Vytvořený software není hotovým firmware lékařského přístroje, výstupy a poznatky z této práce však mohou v budoucnosti být dobrým podkladem pro tvorbu takového firmware. Výstupy práce mohou být uplatnitelné také pro řízení skenerů pro nelékařské využití.

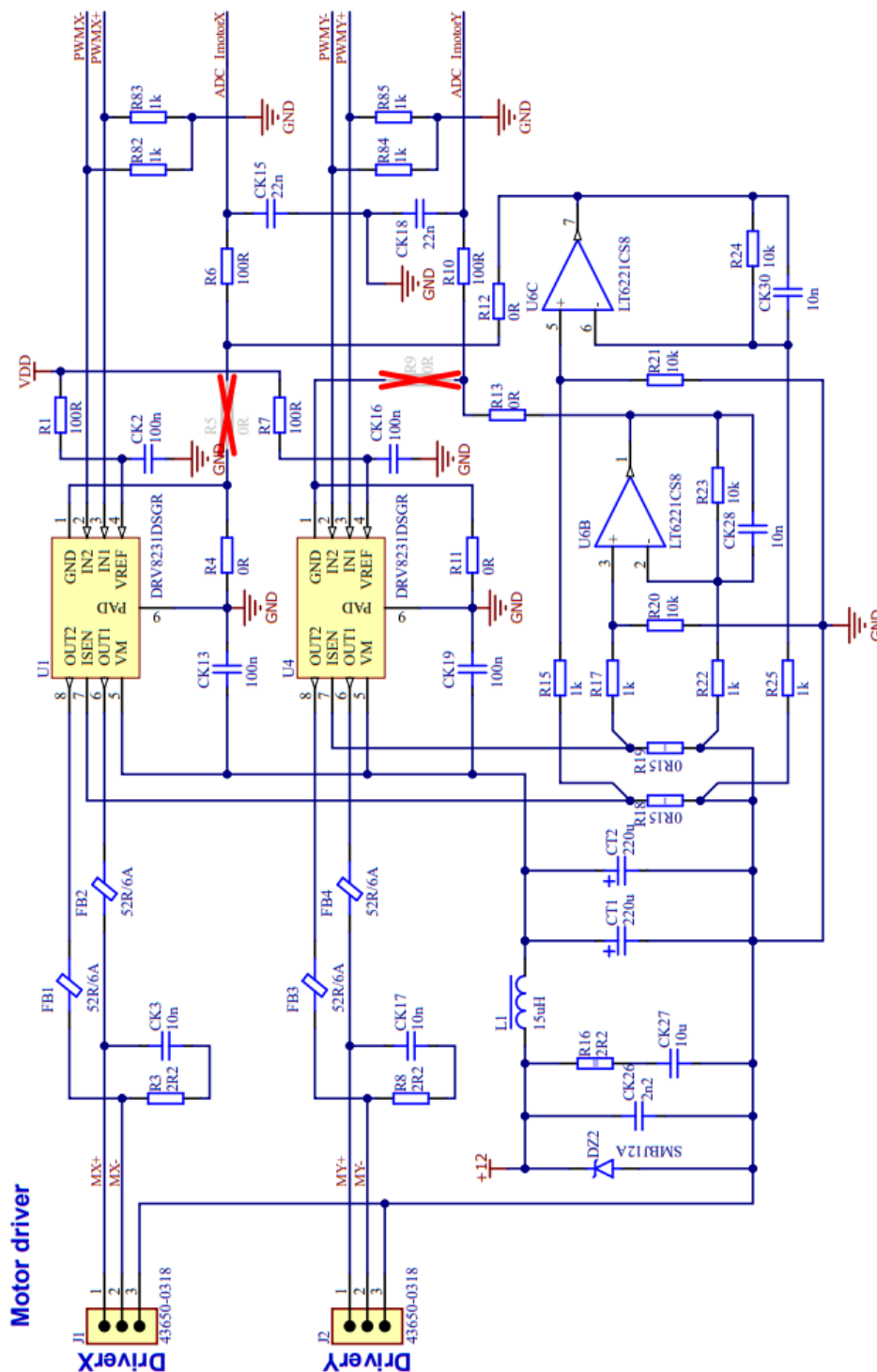
Použitá literatura

- [1] „Frakční laserový resurfacing - Ošetření pleti CO2 laserem v Praze". Viděno: 6. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.perfectclinic.cz/laserova-osetreni/>
- [2] Appold Karen, „The history of aesthetic lasers". Viděno: 6. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.dermatologytimes.com/view/history-aesthetic-lasers>
- [3] W. R. Benner Jr., *LASER SCANNERS: Technologies and Applications: How they work, and how they can work for your product*, 1 st Edition. Sanford, FL: Pangolin Laser Systems, Inc., 2016. ISBN 978-0692747773.
- [4] R. Paschotta, „electro-optic modulators", *RP Photonics Encyclopedia*, lis. 2023, doi: 10.61835/7RV.
- [5] G. R. B. E. Römer a P. Bechtold, „Electro-optic and Acousto-optic Laser Beam Scanners", *Phys Procedia*, roč. 56, s. 29–39, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.092.
- [6] Electrical4U, „Moving Iron Instrument | Electrical4U". Viděno: 15. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/moving-iron-instrument/>
- [7] V. Coffey-Rosich, „PRODUCT FOCUS: GALVANOMETER SCANNERS: What you need to know to buy a galvo-positioner | Laser Focus World". Viděno: 29. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/optics/article/16567973/product-focus-galvanometer-scanners-what-you-need-to-know-to-buy-a-galvo-positioner>
- [8] „COMPACT-506 GALVO – scanner-max". Viděno: 15. srpen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://scannermax.com/products/compact-506-galvo>
- [9] S. Mohammadi Yangijeh, „Modeling, Design, Identification, Drive, and Control of a Rotary Actuator with Magnetic Restoration", MIT, Cambridge, USA, 2022. Viděno: 2. září 2023. [Online]. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/1721.1/143363>
- [10] J. Keane, „Full State Feedback Control of Galvanometer Scanning System", Dublin City University, Dublin, 1994.

- [11] „Compact 506´ Optical Scanner for low-cost and light-weight applications", Viděno: 15. srpen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://download.scannermax.com/pdf/C506.pdf>
- [12] C. T. Johnson a R. D. Lorenz, „Experimental identification of friction and its compensation in precise, position controlled mechanisms", *IEEE Trans Ind Appl*, roč. 28, č. 6, s. 1392–1398, 1992, doi: 10.1109/28.175293.
- [13] V. Michal, C. Premont, G. Pillonet, a N. Abouchi, „Single active element PID controllers", in *20th International Conference Radioelektronika 2010*, IEEE, dub. 2010, s. 1–4. doi: 10.1109/RADIOELEK.2010.5478563.
- [14] J. Mulindi, „Analog vs. Digital Controllers - Control Systems". Viděno: 30. říjen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.electricalandcontrol.com/analog-vs-digital-controllers/>
- [15] M. Kruszynska, „IEC 62304:2006 - software life cycle processes explained - Spyrosoft". Viděno: 30. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://spyrosoft.com/blog/healthcare/iec-623042006-software-life-cycle-processes-explained>
- [16] *Medical device software - Software life cycle processes, IEC 62304:2006+AMD1:2015*. Ženeva: International Electrotechnical Commission, 2015.
- [17] „Ensuring safety in medical software: what is IEC 62304?" Viděno: 3. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://revolve.healthcare/blog/what-is-iec-62304>
- [18] „DRV8231 3.7-A Brushed DC Motor Driver with Integrated Current Regulation", 2022, Viděno: 21. září 2023. [Online]. Dostupné z: www.ti.com
- [19] K. J. Åström a T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995. ISBN 1-55617-516-7.
- [20] B. Šulc a M. Vítečková, *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*, Vydání první. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03007-5.

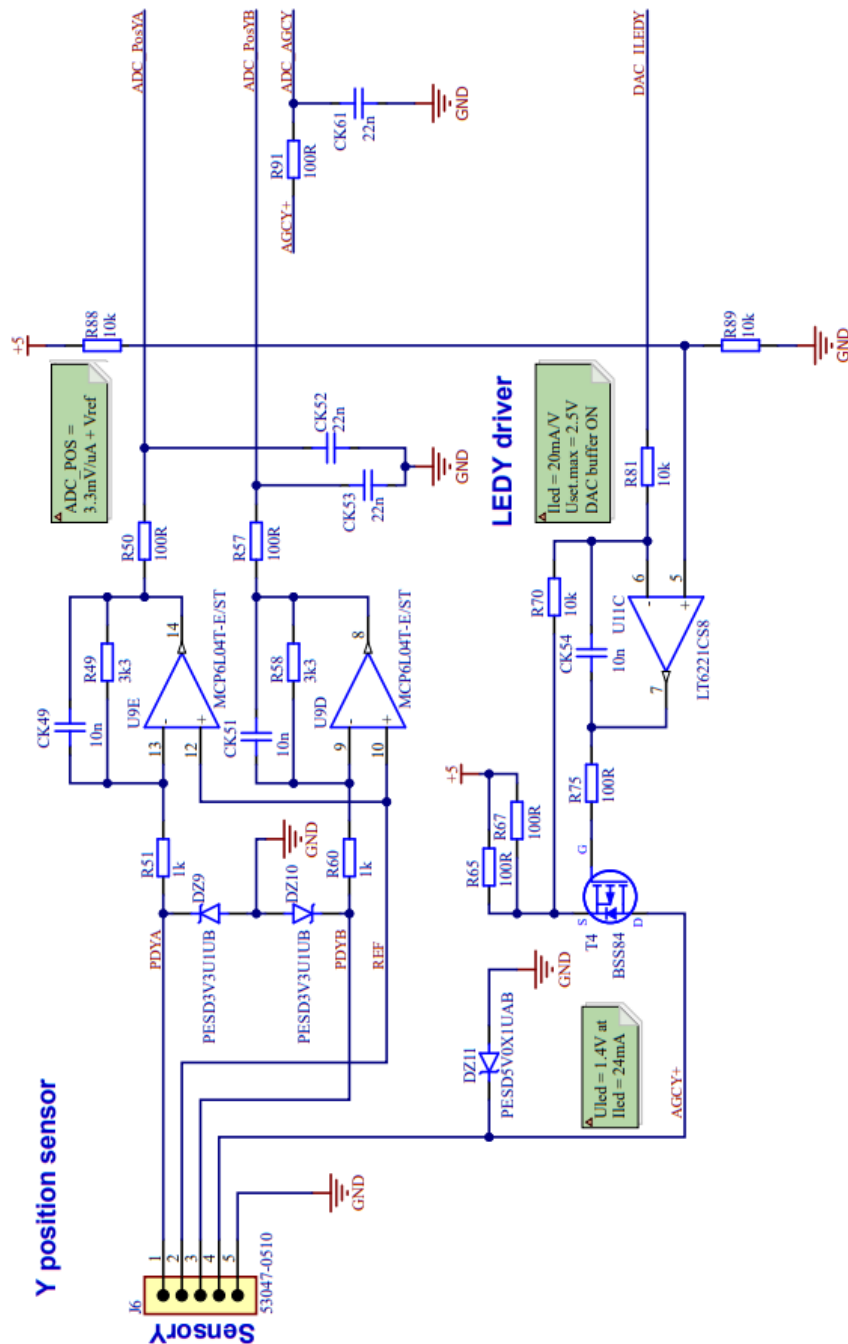
- [21] „Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Introduction: PID Controller Design". Viděno: 7. prosinec 2023. [Online]. Dostupné z: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID#9>
- [22] J. O. Smith, „Physical audio signal processing", *Stanford University, online book, date last viewed*, roč. 10, s. 12, 2010, Viděno: 2. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>
- [23] „STM32F405xx STM32F407xx Data Sheet", č. Rev 9. STMicroelectronics, 2020. Viděno: 6. listopad 2023. [Online]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f405rg.pdf>
- [24] G. Hunter, „H-Bridges | mbedded.ninja". Viděno: 3. leden 2024. [Online]. Dostupné z: <https://blog.mbedded.ninja/electronics/components/h-bridges/>
- [25] V. Popovsky, „Schéma hardware prototypu skeneru". BTL Medical Solutions, a.s., Praha, 2022.

Příloha 1- Schéma zapojení buzení galvomotoru [25]



	Číslo výkresu /drawing number/: 754-53scanner004		DPS projekt/PCB project/: 754-scanner	
	Název listu/sheet name/: 754-scanner.SchDoc		Schválil/approved by/: Bohuslav Riha	
	Kreslil/drawn by/: Vladyslav Popovskyy	Kontroloval/checked by/: Tomas Bourek	Podpis/signature: _____	
	Datum/date/: 02/08/2022		List /sheet/: 1 / 2	

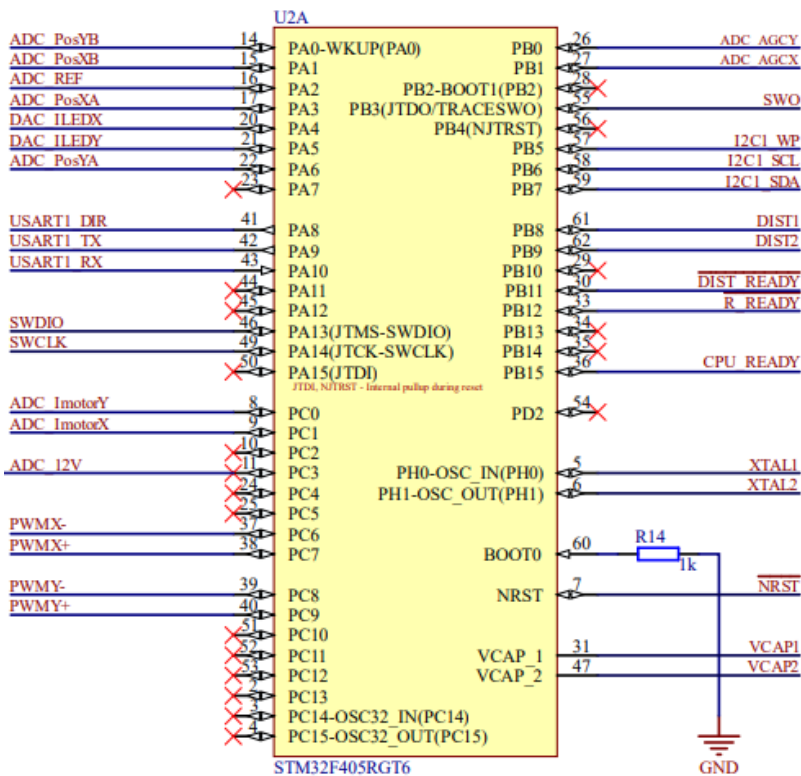
Příloha 2 - Zapojení senzoru natočení rotoru galvanometru [25]



Číslo výkresu /drawing number/: 754-53scanner004		DPS projekt/PCB project/: 754-scanner	
Název listu/sheet name/: 754-scanner.SchDoc		Podpis /signature/:	
Kreslil /drawn by/: Vladyslav Popovskyy	Kontroloval /checked by/: Tomas Bourek	Schválil /approved by/: Bohuslav Riha	
Datum /date/: 02/08/2022		List /sheet/: 1 / 2	

Příloha 3 – Zapojení mikrokontroleru [25]

CPU



Číslo výkresu /drawing number/: 754-53scanner004		DPS projekt/PCB project/: 754-scanner	
		Název listu/sheet name/: 754-scanner.SchDoc	
Kreslil /drawn by/: Vladyslav Popovskyy	Kontroloval /checked by/: Tomas Bourek	Schválil /approved by/: Bohuslav Riha	Podpis /signature/:
Datum /date/: 02/08/2022		List /sheet/: 1 / 2	

Příloha 4 – Seznam implementovaných funkcí a struktur

Soubor	Funkce a struktury
main.cpp	void NextStep() void StartTrackingCheck() void HandleCommunication()
scanning.h	enum MACHINE_STATE enum CPU_STATUS enum TRACKING_CHECK_STATE enum TRACKING_STATUS enum ADC_CHANNEL_FUNCTION typedef struct ADC_CONTROL_STRUCT typedef struct TRAJECTORY_PARAMETERS_STRUCT typedef struct SCANNING_STRUCT
scanning.cpp	bool InitialiseADC() bool InitialiseDMA_forADC() void ScanPattern() float FloatAbsoluteValue()
galvomotor_driver.h	typedef struct GALVOMOTOR_PARAMETERS_STRUCT
galvomotor_driver.cpp	bool InitialiseDAC() bool InitialisePWM() float CalculateMirrorAngle() void ApplyMotorPower()
angle_filter.h	typedef struct BUTTER_2_PARAMETERS_STRUCT typedef struct BUTTER_2_FILTER_STRUCT
angle_filter.cpp	float Butter2Filter()
angle_regulator.h	typedef struct ANGLE_REGULATOR_PARAMETERS_STRUCT typedef struct ANGLE_REGULATOR_STRUCT
angle_regulator.cpp	void AngleRegulator()
communication_driver.h	enum USART_STATE typedef struct USART_CONTROL_STRUCT typedef struct COMMAND_FLAGS_STRUCT
communication_driver.cpp	bool InitialiseUSART() void SendMessage() void ParseCommand() void ProcessCommunication()

Příloha 5 – Seznam elektronických příloh

Zdrojové soubory skeneru:

- angle_filter.h
- angle_filter.cpp
- angle_regulator.h
- angle_regulator.cpp
- communication_driver.h
- communication_driver.cpp
- galvomotor_driver.h
- galvomotor_driver.cpp
- main.cpp
- patterns.h
- scanning.h
- scanning.cpp

MATLAB & SIMULINK:

- navrh.mlx
- overeni.mlx
- uvodni_simulace.slx
- modifikovana_simulace.slx

Naměřená data:

- experimental_data.csv
- data_regulator.csv
- data_square_pattern.csv
- data_s_pattern.csv
- data_pseudorandom_pattern.csv
- data_galvo_failure.csv