UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

AUTOMATICKÉ MĚŘENÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY

Bc. Tomáš Pácal

Diplomová práce

2024

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Bc. Tomáš Pácal**
Osobní číslo:	**I20195**
Studijní program:	**N0714A150005 Automatické řízení**
Téma práce:	**Automatické měření frekvenční charakteristiky**
Zadávající katedra:	**Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cíl: Navrhnout a v prostředí MATLABu realizovat automatické měření amplitudofázové frekvenční charakteristiky do 10 Hz. Pro generování periodického vstupního signálu a měření výstupního signálu bude použito Arduino Due.

Teoretická část:

a) amplitudofázová frekvenční charakteristika (AFFCh) – výpočet z přenosu, měření AFFCh
b) výpočet fázového posunu z měřených hodnot a přesnost jeho určení
c) stanovení požadavků na měřící systém pro danou přesnost určení fázového posunu a frekvenci

Praktická část:

a) návrh a realizace programu pro Arduino Due, který dle zadaných parametrů zajistí změření dat pro vyhodnocení jednoho bodu AFFCh a přenos dat do MATLABu (komunikační protokol sériové komunikační linky bude zadán)
b) návrh a realizace funkcí v MATLABu, které zajistí přenos parametrů měření do Arduina, spuštění měření, příjem a vyhodnocení dat měření
c) návrh a realizaci programu s GUI v MATLABu, který zajistí automatické měření a vykreslení AFFCh ve zvoleném rozsahu frekvencí
d) změření a vykreslení AFFCh zadaného systému

Rozsah pracovní zprávy: **50 – 60 stran**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004, 663 s. ISBN 80-730-0148-9.
DUSEK, Frantisek, Daniel HONC a Michal MRAZEK. RCDue – Laboratory System for Teaching Automation and Control – concept of the system. In: *2021 23rd International Conference on Process Control (PC)* [online]. IEEE, 2021, 2021-6-1, s. 249-254 [cit. 2023-09-08]. ISBN 978-1-6654-0330-6. Dostupné z: doi:10.1109/PC52310.2021.9447492
Dokumentace MATLAB. The MathWorks, Inc. *MATLAB The Language of Technical Computing* [online]. 2021 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html
Arduino – Home [online]. (c)2021 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/
Arduino – ArduinoDue. *Arduino – Home* [online]. (c)2021 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. František Dušek, CSc.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **8. listopadu 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2024**

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

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

V Pardubicích dne 14. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji:

Práci s názvem Automatické měření frekvenční charakteristiky jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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

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

V Pardubicích dne 30. 8. 2024

Bc. Tomáš Pácal v. r.

Poděkování

Na úvod bych rád poděkoval vedoucímu mé práce doc. Ing. Františku Duškovi, CSc., za jeho čas strávený se mnou na konzultacích a za poskytnuté materiály. Děkuji za všechny zkušenosti, vědomosti a přátelé, kterých jsem díky studiu nabyl. Nemohu opomenout mou rodinu a nejbližší přátele, těm děkuji za podporu a zázemí, díky kterému jsem se dostal až sem.

V Pardubicích dne 30. 8. 2024

Bc. Tomáš Pácal

ANOTACE

Práce se zabývá problematikou frekvenčních charakteristik a jejich automatickým měřením pomocí jednoduchých technických prostředků. Pro generování a měření napěťových signálů, je použita vývojová deska Arduino Due. Řízení experimentu, vyhodnocení dat a visualizace výsledků je realizováno v prostředí MATLAB ve formě GUI aplikace vytvořené v MATLAB App designer.

KLÍČOVÁ SLOVA

Frekvenční charakteristika, Fáze, Zesílení, Perioda

TITLE

AUTOMATIC MEASUREMENT OF FREQUENCY CHARACTERISTICS

ANNOTATION

The thesis deals with the issue of frequency frequencies and their automatic measurement using simple technical means. To generate and measure voltage signals, the Arduino Due development board is used. Control of the experiment, data evaluation and visualization of the results is contained in the MATLAB GUI environment of the application created in the MATLAB App designer.

KEYWORDS

Frequency characteristic, Phase, Gain, Period

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK 9
SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ 10
SEZNAM ILUSTRACÍ 11
SEZNAM TABULEK 12
ÚVOD 13
1 TEORETICKÁ ČÁST 14
1.1 SYSTÉM 14
1.2 MODEL SOUSTAVY 15
1.3 MATEMATICKÝ POPIS V ČASOVÉ OBLASTI 17
1.3.1 Vstupně výstupní popis 17
1.3.2 Stavový popis 17
1.4 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA 18
1.5 ČASOVÉ CHARAKTERISTIKY 19
1.5.1 Přechodová charakteristika 19
1.5.2 Impulzní charakteristika 20
1.6 MATEMATICKÝ POPIS V KOMPLEXNÍ OBLASTI 20
1.6.1 Popis MIMO systému přenosem 20
1.6.2 Obrazový přenos stavového popisu 21
1.7 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA 22
1.8 MATEMATICKÝ POPIS DISKRÉTNÍHO SYSTÉMU 25
1.8.1 Vstupně výstupní popis diskrétního systému 25
1.8.2 Stavový popis diskrétního systému 26
1.9 MĚŘENÍ BODU FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY 26
1.9.1 Spojitým měřením 27
1.9.2 Diskrétním měřením 29
1.10 ANALÝZA POŽADAVKŮ NA DISKRÉTNÍ MĚŘÍCÍ SYSTÉM 31
1.10.1 Přesnost určení fázového posunu pro diskrétní měření 31
1.10.2 Požadavek na přesnost určení zesílení pro diskrétní měření 32
2 PRAKTICKÁ ČÁST 34
2.1 ARDUINO 34
2.1.1 Hardwarové vlastnosti Arduino Due 35
2.1.2 Arduino IDE 36

2.2 REALIZACE MĚŘENÍ POMOCÍ ARDUINO DUE 37
2.2.1 Limity určení fázového posunu 37
2.2.2 Limity určení zesílení 38
2.2.3 Omezení dané pamětí 39
2.2.4 Výsledné parametry 39
2.3 REALIZACE AUTOMATICKÉHO MĚŘENÍ AFFCH 40
2.3.1 Měření při dané frekvenci v Arduinu Due 40
2.3.2 Vyhodnocení získaných dat v MATLABu 40
2.4 PROGRAMOVÉ ŘEŠENÍ PRO ARDUINO DUE 41
2.4.1 Popis funkce programu 41
2.5 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL 44
2.6 NÁVRH APLIKACE V MATLAB APP DESIGNER 45
2.6.1 Použité komponenty 45
2.6.2 Obsluha aplikace a její funkce 45
2.6.3 Provedení experimentu 47
2.6.4 Ošetření vstupních hodnot a chybových stavů 48
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 50
3.1 MĚŘENÁ SOUSTAVA 50
3.1.1 Návrh plošného spoje a krytu pro přípravek1 51
3.1.2 Odvození stavového modelu soustavy 55
3.1.3 Vypočtené grafy frekvenční charakteristiky 57
3.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ 58
3.2.1 Vyhodnocení experimentu 58
ZÁVĚR 60
LITERATURA 61
PŘÍLOHY 62

SEZNAM ZKRATEK

AFFCh	amplitudofázová frekvenční charakteristika
A/D převodník	digitálně analogový převodník
APL	arduino programming language
D/A převodník	digitálně analogový převodník
mikroPLC	mikro programmable logic controller
PC	personal computer
SNR	signal to noise ratio
SRAM	static random access
UART	universal asynchronous receiver - transmiter
USB	universal serial bus

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

$\delta(t)$	funkce Diracova impulzu
$\eta(t)$	funkce jednotkového skoku
τ	časová konstanta
ε	přesnost veličiny
ω	úhlová frekvence
A	amplituda signálu
$\boldsymbol{A}$	matice systému
$\boldsymbol{B}$	matice řízení
$\boldsymbol{C}$	matice závislosti stavu na výstupu
$\boldsymbol{D}$	matice závislosti vstupu na výstupu
$F(s)$	obraz přenosu regulačního obvodu
$R(s)$	obraz přenosu regulátoru
s	operátor
$S(s)$	obraz přenosu soustavy
T	perioda
$\boldsymbol{u}$	vstupní vektor
$u(t)$	akční zásah
u	napětí
$V(s)$	přenos vnější poruchy
$\boldsymbol{x}$	stavový vektor
$\dot{\boldsymbol{x}}$	derivace stavového vektoru
$\boldsymbol{y}$	výstupní vektor
$y(t)$	výstupní hodnota
Z	zesílení

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 – Vazby mezi popisy soustavy [Holčík, 2015] 16
Obrázek 1.2 – Statická charakteristika 18
Obrázek 1.3 – Časové charakteristiky 19
Obrázek 1.4 – Amplitudofázová charakteristika 22
Obrázek 1.5 – Popis bodu amplitudofázové charakteristiky 23
Obrázek 1.6 – Amplitudová charakteristika 24
Obrázek 1.7 – Fázová charakteristika 25
Obrázek 1.8 – Průběhy měřených signálu spojité měřením 28
Obrázek 1.9 – Popis vstupního a výstupního signálu soustavy 29
Obrázek 1.10 – Průběhy měřených signálu diskrétním měřením 31
Obrázek 2.1 – Arduino Due 35
Obrázek 2.2 – Prostředí Arduino IDE 37
Obrázek 2.3 – Vývojový diagram identifikace příkazu - Arduino Due 42
Obrázek 2.4 – Vývojový diagram měření - Arduino Due 43
Obrázek 2.5 – Použité komponenty v aplikaci 45
Obrázek 2.6 – Ovládací panel aplikace 46
Obrázek 2.7 – Zobrazovací panel aplikace 47
Obrázek 2.8 – Vývojový diagram průběhu experimentu v App Designeru 49
Obrázek 3.1 – Hardwarová konfigurace 50
Obrázek 3.2 – Schéma zapojení RC soustavy 50
Obrázek 3.3 – Schéma zapojení – EAGLE 52
Obrázek 3.4 – Konečný návrh plošného spoje pro RC soustavu 53
Obrázek 3.5 - Kryt přípravku 54
Obrázek 3.6 - 3D návrh krytu přípravku 54
Obrázek 3.7 – Přípravek pro měření AFFCh 54
Obrázek 3.8 – Vypočtený Nyquistův diagram měřené soustavy 57
Obrázek 3.9 – Vypočtený Bodeův diagram měřené soustavy 57
Obrázek 3.10 – orovnání amplitudových charakteristik experimentů 59
Obrázek 3.11 – Porovnání amplitudofázových charakteristik experimentů 58
Obrázek 3.12 – Porovnání fázových charakteristik experimentů 59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 – Technická specifikace Arduina Due 36
Tabulka 2.2 – Porovnání parametrů vycházejících z omezení Arduina Due 39
Tabulka 2.3 – Seznam použitých funkcí v programu Arduina Due 41
Tabulka 2.4 – Seznam příznaků komunikačního protokolu 44
Tabulka 3.1 – Seznam hodnot součástek 51
Tabulka 3.2 - Seznam součástek EAGLE 52

ÚVOD

Tato diplomová práce se věnuje problematice frekvenčních charakteristik, matematickému popisu soustavy, určení omezení, daného dostupnými prostředky měření a zpracování naměřených dat.

Teoretická část se zabývá významem a určením frekvenčních charakteristik. Dále se je uveden postup určení matematického popisu soustavy a popsán výpočet fázového posunu.

Praktická část práce je věnována sestavení aplikace pro automatické měření frekvenčních charakteristik. V první kapitole budou uvedeny výpočty limit měření, které vychází z vlastností použitých technických prostředků. Dále budou představeny návrhy samotných programů z prostředí softwarů Arduino IDE, MATLAB a MATLAB App Designer.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Tato část práce pojednává o problematice spojené s měřením frekvenční charakteristiky, definici a spojitosti jednotlivých prvků, následně popisuje postupy pro analýzu měřícího systému a požadavky na daný systém.

1.1 SYSTÉM

„Na fyzikálních objektech, popř. soustavách těchto objektů, je možné sledovat různé veličiny. Zvolením souboru veličin, které jsou na objektu významné nebo zajímavé, definujeme tzv. systém. Zbývající část objektivní reality je označována jako okolí systému. Na každém objektu lze zřejmě systém definovat mnoha způsoby. Bez ohledu na rozdílnou fyzikální povahu reálných objektů je možné systémy analyzovat a matematicky s nimi pracovat jednotným způsobem.“ (Cvejn, 2007)

Systémy jsou charakterizovány určitými veličinami, které popisují jejich vstupy, stav a výstupy dle interakce s okolím. **Vstupní veličiny** vstupují do systému z okolního prostředí a ovlivňují jeho chování. **Stavové(vnitřní) veličiny** popisují vnitřní stav systému v daném okamžiku. **Výstupní veličiny** jsou výsledkem zpracování vstupních veličin systémem.

Dynamické systémy popisují vztah mezi aktuálními hodnotami vstupních veličin a hodnotami výstupních veličin, společně s historií vstupních a výstupních hodnot. Čas je vždy jedním z parametrů dynamického systému. Chování **statických systémů** je konstantní, pokud se nezmění vstupní veličiny. Výstupní veličina statických systémů tedy nezávisí na předešlé historii vstupů a výstupů.

Dynamické systémy, které mají alespoň jednu diskrétní veličinu, tedy že daná veličina se mění v daných časových okamžicích nebo může nabývat jen určitého omezeného množství hodnot, jsou **diskrétní systémy**. **Spojitý systém** má všechny své veličiny spojité, všechny se mění plynule v čase a v každém okamžiku mohou nabývat hodnot z daného rozsahu.

1.2 MODEL SOUSTAVY

Matematický popis soustavy je důležitý pro pochopení chování soustavy. Matematický popis lze získat několika způsoby:

- měření hodnot veličin na existujícím zařízení (tzv. identifikace),
- metodami matomaticko-fyzikální analýzy.

„Pro získání matematického modelu je využito matematického popisu fyzikálních jevů, které jsou dostatečně elementární, aby byly respektovány vazby mezi prvky struktury systému. Hloubka a komplexnost uvažovaných jevů záleží na účelu využití modelu. Čím přesnější model, tím obtížnější vytvoření a pracnější využití.“ (Cvejn, 2007)

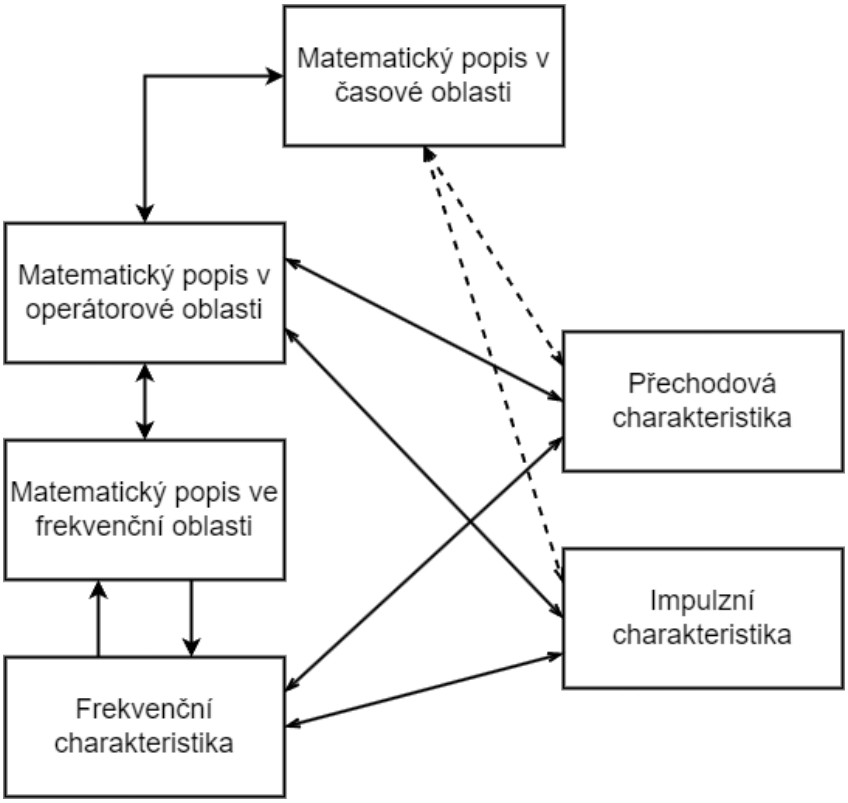
Základní vlastností matematického modelu je jeho linearita. **Lineární modely** splňují princip superpozice. Jsou popsány diferenciálními rovnicemi a umožňují analytické řešení. **Nelineární modely** neumožňují analytické řešení a jsou popsány soustavou nelineárních rovnic.

Vstupní a případně i stavové veličiny **deterministických systémů** jednoznačně určují hodnoty výstupních veličin. Naopak hodnoty výstupních veličin **stochastických systémů** jsou určeny na základě pravděpodobnosti vztažené k předchozím hodnotám vstupních a výstupních hodnot. Na stochastický systém působí náhodná veličina, která působí částečnou nebo úplnou nepředvídatelnost systému.

Podle počtu vstupních a výstupních veličin se modely dělí na modely s jedním vstupem a jedním výstupem, tyto modely se označují zkratkou **SISO**. Modely s více vstupy a výstupy se nazývají **MIMO**.

Modely se soustředěnými parametry mají konečný počet stavových veličin a jsou popsány soustavou obyčejných diferenciálních rovnic. Stavové veličiny **modelů s rozprostřenými parametry** jsou rozloženy v prostoru. Jsou popsány soustavou parciálních diferenciálních rovnic.

Způsoby popisu soustavy spolu vzájemně souvisí. Na obrázku 1.1 jsou znázorněny vazby charakteristik na matematický popis.



Obrázek 1.1 – Vazby mezi popisy soustavy

[Holčík, 2015]

Dynamický nelineární systém je popsán nelineární diferenciální rovnicí, která nemusí mít analytické řešení. Pro práci s dynamickými nelineárními systémy se často provádí linearizace systému kolem pracovního bodu.

1.3 MATEMATICKÝ POPIS V ČASOVÉ OBLASTI

Popis soustav v časové oblasti se zabývá chováním dynamických systémů v čase, tedy jak systém reaguje na různé vstupy, jak se mění jeho stavové veličiny a jaké jsou jeho výstupy v závislosti na čase.

1.3.1 Vstupně výstupní popis

Udává dynamiku výstupní veličiny přímo na vstup soustavy. Tento popis nezohledňuje vnitřní stavy soustavy. Diferenciální rovnice popisující soustavu má tvar,

$$y^{(n)} + a_{n-1} \cdot y^{(n-1)} + \ldots + a_1 \cdot \dot{y} + a_0 \cdot y = b_m \cdot u^{(m)} + \ldots + b_1 \cdot \dot{u} + b_0 \cdot u, \tag{1.1}$$

kde y je výstupní veličina,
$y^{(n)}$ je n-tá derivace výstupní veličiny,
a_n jsou konstanty času výstupní veličiny,
u je vstupní veličina,
$u^{(m)}$ je m-tá derivace vstupní veličiny,
b_m jsou konstanty času vstupní veličiny.

V tomto tvaru musí pro reálnou soustavu platit,

$$m \leq n, \tag{1.2}$$

kde m je řád vstupní funkce,
n je řád výstupní funkce.

Diferenciální rovnice jsou složité pro analýzu soustav, a proto se pomocí Laplaceovy transformace převádí diferenciální rovnice z časové oblasti na algebraické rovnice v komplexní oblasti.

1.3.2 Stavový popis

Stavovým popisem lze popsat systémy s více vstupními a výstupními signály. Stavový popis v maticovém tvaru vypadá následovně,

$$\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{u}(t), \tag{1.3}$$

kde $\boldsymbol{A}$ je matice systému,
$\boldsymbol{x}$ je stavový vektor,
$\boldsymbol{B}$ je matice řízení,

$\boldsymbol{u}$ je vstupní vektor,

$$\boldsymbol{y}(t) = \mathbf{c} \times \boldsymbol{x}(t), \tag{1.4}$$

kde $\boldsymbol{y}$ je výstupní vektor,

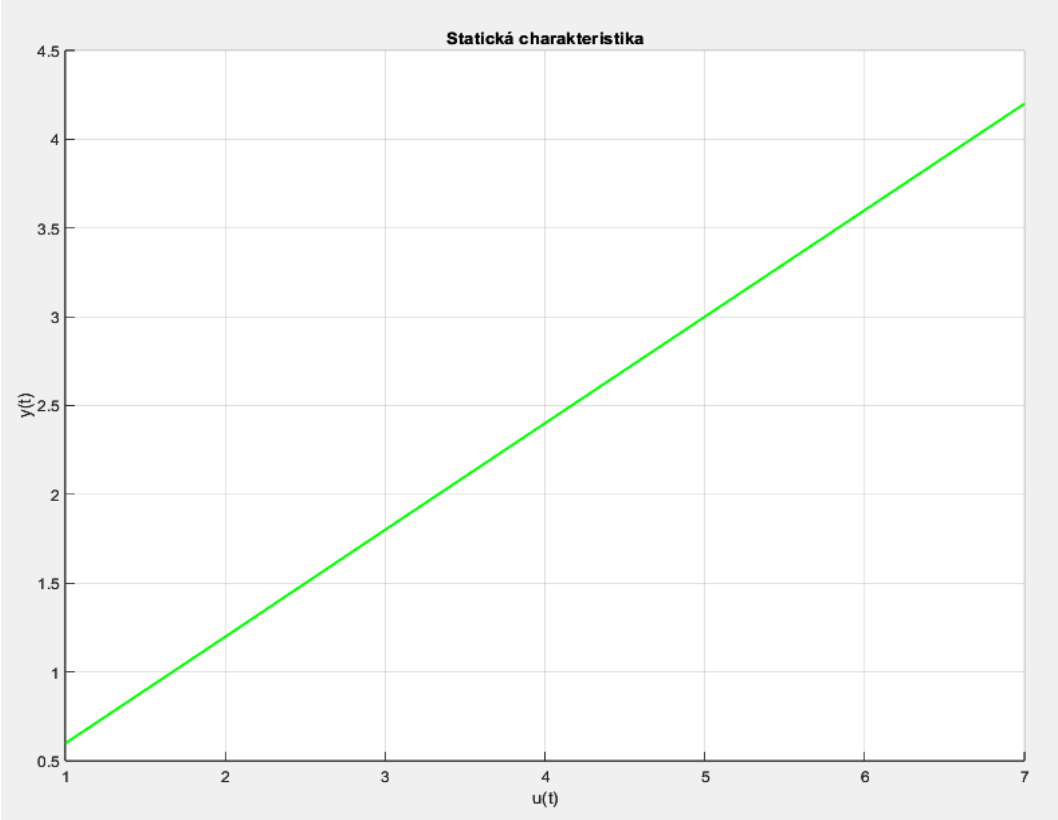
$\boldsymbol{c}$ je matice závislosti stavu na výstupu,

$\boldsymbol{D}$ je matice závislosti vstupu na výstupu.

Stavový popis je výhodné použít pro systémy MIMO. Pro systémy SISO je výhodnější použít vstupně výstupní popis. (Balátě, 2004)

1.4 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA

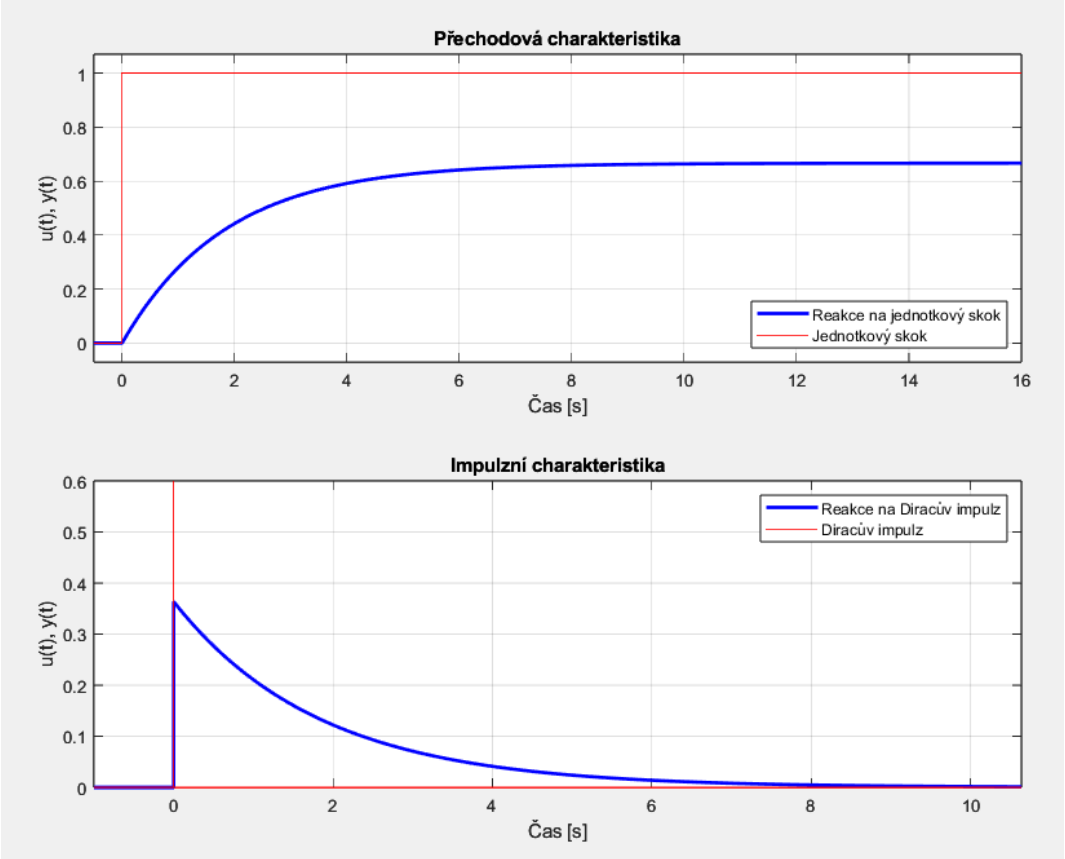
Soustava, pro kterou existuje ustálená výstupní hodnota pro ustálenou vstupní hodnotu je nazývána statickou. Statická charakteristika je závislost mezi vstupem a výstupem v ustáleném stavu. Příklad statické charakteristiky je na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2 – Statická charakteristika

1.5 ČASOVÉ CHARAKTERISTIKY

Časové charakteristiky graficky vyobrazují dynamické chování systému na předem definovaný vstupní signál. Na obrázku 1.3 jsou k vidění časové charakteristiky s vykreslenými vstupními signály.



Obrázek 1.3 – Časové charakteristiky

1.5.1 Přechodová charakteristika

Přechodová charakteristika vyobrazuje reakci soustavy na jednotkový skok vstupního signálu při nulových podmínkách a nulovém čase. Přechodová charakteristika lze snadno realizovat. (Voráček, 2005)

Jednotkový skok je definován následovně,

$$\eta(t) = 0 \text{ pro } t \in (-\infty, 0), \tag{1.5a}$$

$$\eta(t) = 1 \text{ pro } t \in [0, \infty), \tag{1.5b}$$

kde $\eta(t)$ je funkce jednotkového skoku.

1.5.2 Impulzní charakteristika

Impulzní charakteristika je reakcí soustavy na Diracův impulz. Diracův impulz je nekonečně velký signál, který trvá nekonečně krátkou dobu v nulovém čase a je matematicky popsán takto,

$$\delta(t) = 0 \text{ pro } t \neq 0, \tag{1.6a}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1, \tag{1.6b}$$

kde $\delta(t)$ je funkce Diracova impulzu.

Diracův impulz je nerealizovatelný a v praxi se impulzní charakteristika získá jako reakce na pulz za nulových počátečních podmínek jako Diracův pulz, ale s rozdílem konečně velkého pulzu s určitou délkou, jehož integrál je roven jedné.

1.6 MATEMATICKÝ POPIS V KOMPLEXNÍ OBLASTI

Popis komplexní oblasti umožňuje snazší analýzu chování systému. Dynamický lineární systém v časové oblasti lze s využitím Laplaceovy transformace převést do komplexní oblasti. Diferenciální rovnice jsou transformovány do rovnic algebraických.

1.6.1 Popis MIMO systému přenosem

„Vzhledem k vzájemným vazbám nelze tyto obvody řešit jako několik oddělených obvodů, navzájem nezávislých. Řešení systému MIMO pomocí přenosů je složitější než řešení jednoduchých obvodů.“ (Švarc, 2003)

Matematický popis takových soustav je realizován prostřednictvím přenosů, kdy je obrazový přenos vypočítán vzájemně pro každou vstupní a výstupní veličinu. Soustavu rovnic je výhodné zapisovat v maticovém tvaru. Do matematického popisu je možné zahrnout i vnější vlivy, které lze přímo popsat přenosy a podobně jako u vazeb vstupně výstupních se do rovnic zapisují jako přenosy. Popis o n vstupních, m výstupních veličin a i vnějších poruch vypadá takto,

$$Y_1(s) = S_{11}(s) \cdot U_1(s) + S_{12}(s) \cdot U_2(s) + \cdots + S_{1n}(s) \cdot U_n(s) + Z_{11}(s) \cdot V_1(s) + Z_{1i}(s) \cdot V_i(s), \quad (1.7a)$$

až,

$$Y_m(s) = S_{m1}(s) \cdot U_1(s) + S_{m2}(s) \cdot U_2(s) + \cdots + S_{mn}(s) \cdot U_n(s) + Z_{m1}(s) \cdot V_1(s) + Z_{mi}(s) \cdot V_i(s), \quad (1.7b)$$

kde $Y(s)$ je obraz výstupní veličiny,

$U(s)$ je obraz vstupní veličiny,

$V(s)$ je obraz vnější poruchy,

$S_{mn}(s)$ je obraz vazby vstupu na konkrétní výstupní veličinu,

$Z_{mi}(s)$ je obraz vazby vnější poruchy na výstupní veličinu.

Maticovým tvarem je rovnice 1.11 zapsána takto,

$$\boldsymbol{Y}(s) = \boldsymbol{S}(s) \times \boldsymbol{U}(s) + \boldsymbol{Z}(s) \times \mathbf{V}(s), \quad (1.8)$$

kde $\boldsymbol{Y}(s)$ je vektor přenosu výstupních veličin,

$\boldsymbol{U}(s)$ je vektor přenosu vstupních veličin,

$\boldsymbol{V}(s)$ je vektor přenosu vnějších poruch,

$\boldsymbol{S}(s)$ je matice přenosu vnitřních vazeb,

$\boldsymbol{Z}(s)$ je matice přenosů poruch.

1.6.2 Obrazový přenos stavového popisu

Obrazový přenos stavového popisu se využívá k analýze a návrhů stavových systémů.

Po aplikaci Laplaceovy transformace na rovnice 1.3 a 1.4 vypadá stavový model následovně

$$s \cdot \boldsymbol{X}(s) = \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{X}(s) + \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{U}(s), \quad (1.9)$$

kde $\mathrm{s} \cdot \boldsymbol{X}(s)$ je Laplaceova transformace následujícího stavu $\dot{\boldsymbol{x}}$,

$\boldsymbol{X}(s)$ je Laplaceova transformace stavového vektoru $\boldsymbol{x}$,

s je operátor,

$\boldsymbol{U}(s)$ je Laplaceova transformace vstupního vektoru $\boldsymbol{u}$.

$$\boldsymbol{Y}(s) = \mathbf{C} \times \boldsymbol{X}(s) + \boldsymbol{D} \times \boldsymbol{U}(s), \quad (1.10)$$

kde $\boldsymbol{Y}(s)$ je Laplaceova transformace výstupního vektoru $\boldsymbol{y}$.

Z takto transformované rovnice se získá vztah mezi vstupem a výstupem soustavy, který je přenosovou funkcí soustavy

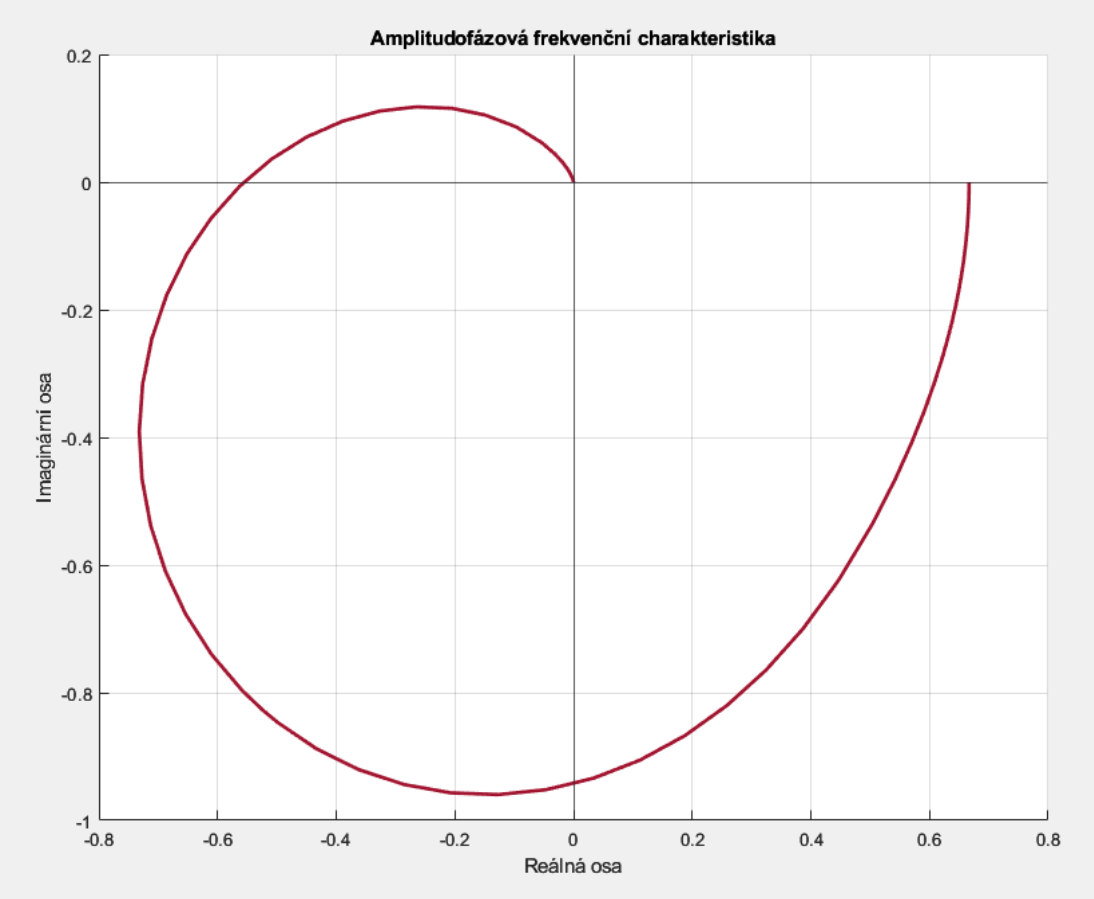
$$\boldsymbol{G}(s) = \boldsymbol{C} \times (s \cdot \boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1} \cdot \boldsymbol{B} + \boldsymbol{D}, \tag{1.11}$$

kde $\boldsymbol{G}(s)$ je přenosová funkce

$\boldsymbol{I}$ je jednotková matice.

1.7 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

Frekvenční charakteristika je grafickým znázorněním frekvenčního přenosu. Lze vyjádřit v komplexní rovině jako amplitudofázovou charakteristiku. Amplitudová charakteristika vyjadřuje průběh reálné složky a fázová charakteristika je vyjádřením imaginární složky frekvenční charakteristiky. Amplitudofázová charakteristika je na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4 – Amplitudofázová charakteristika

Tyto charakteristiky se v minulosti využívaly k určení správných hodnot pro elektrické obvody. V dnešní době je využití z velké části teoretické například k určení zmíněné stability

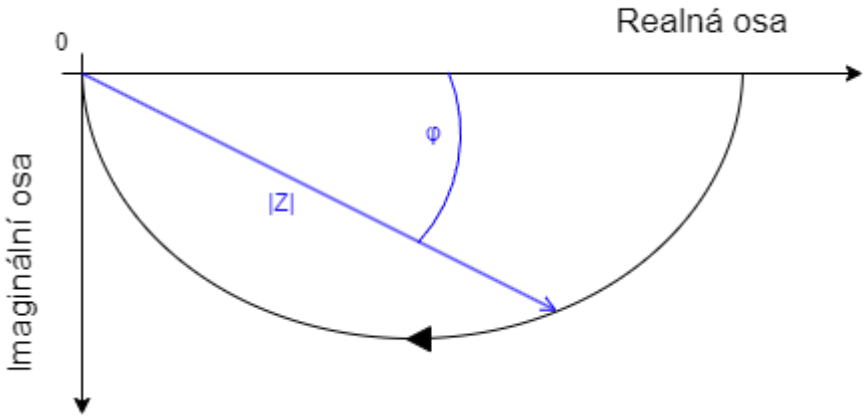
uzavřeného regulačního obvodu s využitím Nyquistova kritéria. V praxi se těchto principů využívá například k určení parametrů řídicích soustav servomotorů.

Frekvenční charakteristiku lze získat výpočtem z přenosu nebo experimentálně. Frekvenční charakteristiku je možné vypočítat z přenosu dosazením parametru $j\omega$ za operátor s,

$$F(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)}, \tag{1.12}$$

kde $F(j\omega)$ je přenosová funkce.

Amplitudofázová charakteristika je vynášena do komplexní roviny. Z každého bodu bude lze určit zesílení a fázi při dané frekvenci. Zesílení soustavy je dáno jako absolutní hodnota bodu od počátku a úhel, který svírá směrnice s reálnou osou je fázový posun. Amplitudofázová charakteristika s vynesenou velikostí zesílení a fázovým posunem je na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5 – Popis bodu amplitudofázové charakteristiky

Z předešlého odstavce vyplývá, že lze amplitudofázová charakteristika získat, pokud je známé zesílení a fázový posun soustavy. Nepřímo tedy vypočítat její body. Vzorec pro výpočet bodu amplitudofázové charakteristiky je tento výraz,

$$F(j\omega) = Z(\omega) \cdot (\cos\varphi(\omega) + j \cdot \sin\varphi(\omega)). \tag{1.13}$$

Z této rovnice jsou zřejmé souřadnice v komplexní rovině,

$$Re(F(j\omega)) = Z(\omega) \cdot \cos\varphi(\omega), \tag{1.14}$$

$$Im(F(j\omega)) = Z(\omega) \cdot (j \cdot \sin\varphi(\omega)). \tag{1.15}$$

Amplitudová charakteristika popisuje změnu amplitud výstupního a vstupního signálu.. Jednotlivé body se vypočtou jako absolutní hodnota komplexního čísla přenosové funkce,

$$Z(\omega) = \left|\frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)}\right|. \tag{1.16}$$

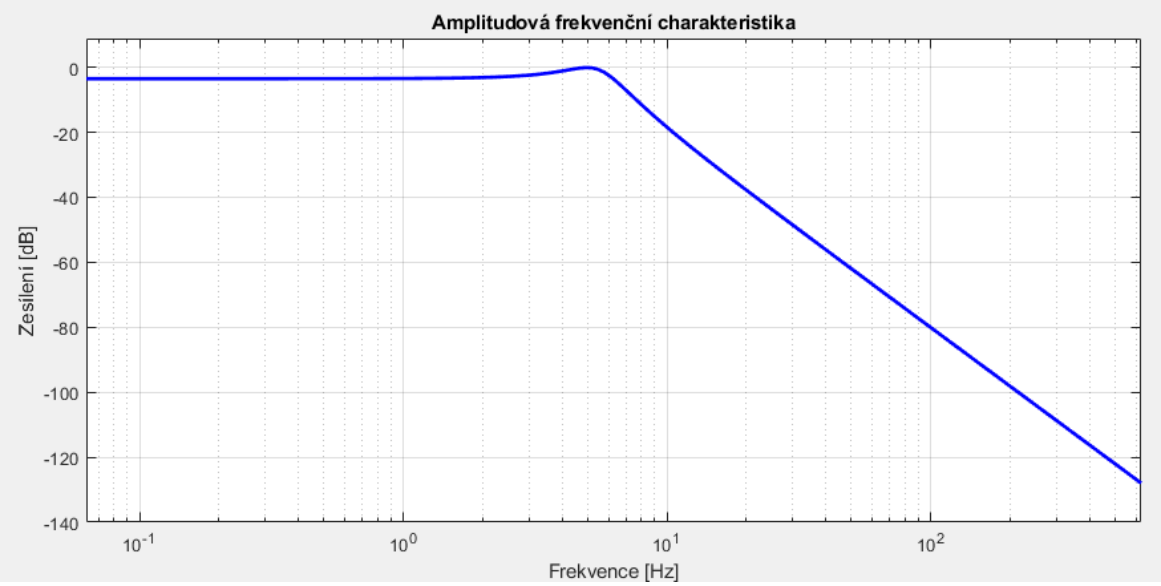
Frekvence se zpravidla vykreslují na logaritmické měřítko. Zesílení se vynáší zpravidla v decibelech,

$$A(\omega) = 20 \cdot \log_{10} Z(\omega), \tag{1.17}$$

kde $A(\omega)$ je zesílení soustavy v decibelech,

$Z(\omega)$ je zesílení soustavy.

Amplitudová charakteristika je na obrázku 1.6.

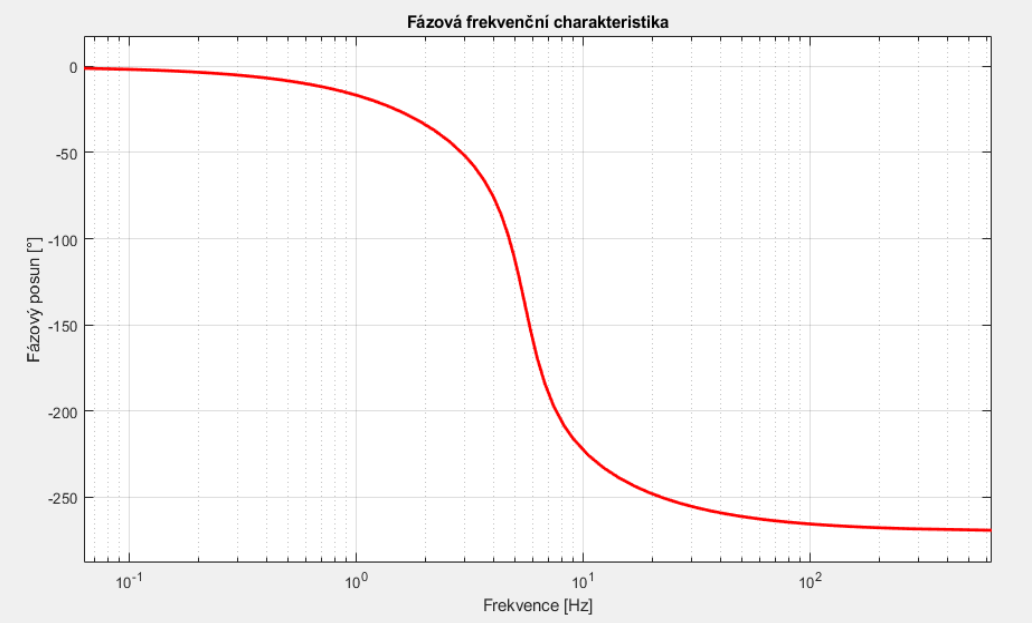


Obrázek 1.6 – Amplitudová charakteristika

Fázová charakteristika popisuje odlišnost fází vstupního a výstupního signálu. Změna při různých frekvencích je zpravidla vyjádřena ve stupních.

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}\left(\frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)}\right), \tag{1.18}$$

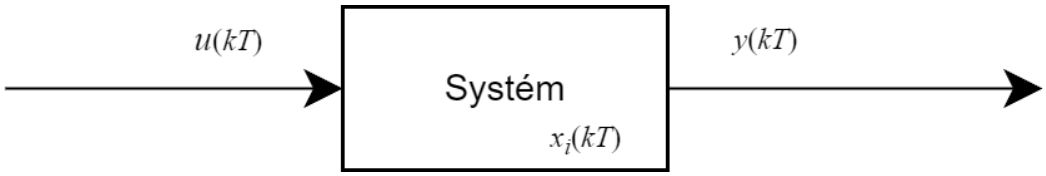
kde $\varphi(\omega)$ je fázový posun.



Obrázek 1.7 – Fázová charakteristika

1.8 MATEMATICKÝ POPIS DISKRÉTNÍHO SYSTÉMU

Podobně jako u spojitých systémů jsou diskrétní lineární systémy popisovány několika způsoby. Na obrázku 1.8 jsou k vidění veličiny diskrétního lineárního systému. (Balátě, 2004)



Obrázek 1.8 - Popis veličin diskrétního systému

1.8.1 Vstupně výstupní popis diskrétního systému

Vstupně výstupní popis vyjadřuje vztah mezi vstupním signálem $u(kT)$ a výstupním signálem $y(kT)$,

$$a_n y[(k+n)T] + \ldots + a_1 y[(k+1)T] + a_0 y(kT) = , \tag{1.19a}$$

$$= b_m u[(k+m)T] + \ldots + b_1 u[(k+1)T] + b_0 u(kT), \tag{1.19b}$$

kde y je výstupní veličina,

a_n je n-tý koeficient vstupní veličiny,

u je vstupní veličina,

b_m je m-tý koeficient výstupní veličiny,

k je index kroku,

T je interval vzorkování,

n je řád vstupní diferenční rovnice,

m je řád výstupní diferenční rovnice.

1.8.2 Stavový popis diskrétního systému

Stavový popis diskrétního lineární systému v maticovém tvaru je,

$$\boldsymbol{x}[(k+n)T] = \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{x}(kT) + \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{u}(kT), \tag{1.20}$$

kde $\boldsymbol{A}$ je matice systému,

$\boldsymbol{x}$ je stavový vektor,

$\boldsymbol{B}$ je matice řízení,

$\boldsymbol{u}$ je vstupní vektor,

$$\boldsymbol{y}(kT) = \mathbf{c} \times \boldsymbol{x}(kT), \tag{1.21}$$

kde $\boldsymbol{y}$ je výstupní vektor,

$\boldsymbol{c}$ je matice závislosti stavu na výstupu,

$\boldsymbol{D}$ je matice závislosti vstupu na výstupu.

1.9 MĚŘENÍ BODU FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY

Měření bodu frekvenční charakteristiky se získá ze vstupního a výstupního signálu soustavy. Do soustavy vstupuje harmonický periodický signál o frekvenci f a amplitudě A. Měření probíhá po ustálení soustavy.

Spojité měření probíhá zpravidla pomocí laboratorních přístrojů. Pro generování vstupního signálu se používá funkční generátor. Měření se provádí dvoukanálových osciloskopem. Rozsah měření je dán rozsahem frekvencí funkčního generátoru a rozlišovací schopností osciloskopu.

K určení bodu frekvenční charakteristiky pomocí diskrétního měření se zpravidla používá méně sofistikovaných zařízení. Vstupní signál může být generovaný D/A převodníkem a hodnota skutečného vstupního signálu a výstupní signál je měřený pomocí A/D převodníků.

Oblast diskrétního měření je vychází z omezení použitých zařízení. Zpravidla bývá oblast diskrétního měření menší než oblast spojitého měření.

1.9.1 Spojitým měřením

Na obrázku 1.9 je popsáno blokové schéma spojitého měření.

Obrázek 1.9 - Signály pro spojité měření frekvenční charakteristiky

Vstupní signál $u(t)$ je popsán rovnicí,

$$u(t) = A_u \cdot \sin(\omega \cdot t), \tag{1.22}$$

kde $u(t)$ je vstupní diskrétní signál,

A_u je amplituda vstupního signálu,

ω je úhlová frekvence vstupního signálu.

Výstupní signál je popsán rovnicí,

$$y_i(t) = A_y \cdot \sin(\omega \cdot t + \omega \cdot \Delta t), \tag{1.23}$$

kde A_y je amplituda výstupního signálu,

Δt je časový posun signálu.

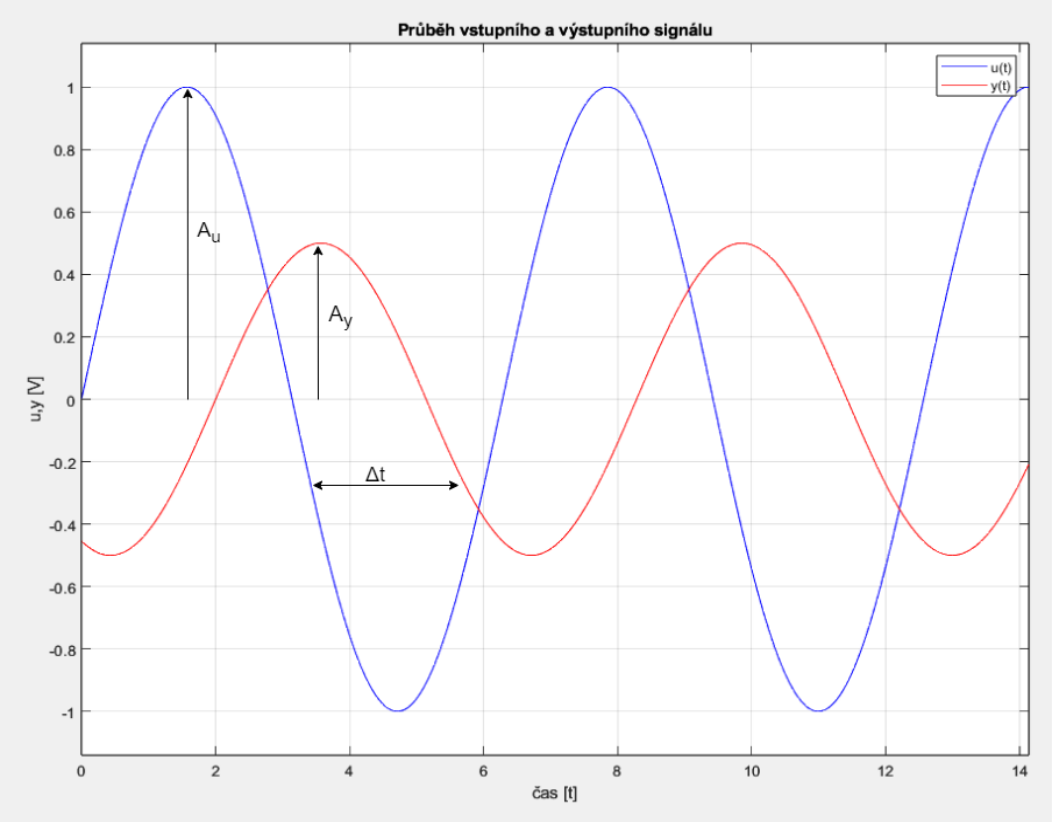
Z této rovnice vyplývá vyjádření fázového posunu,

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t, \tag{1.24}$$

kde φ je fázový posun.

Po úpravě vypadá rovnice výstupního signálu následovně,

$$y(t) = A_y \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi). \tag{1.25}$$



Obrázek 1.10 – Průběhy měřených signálu spojité měřením

Po ustálení soustavy jsou z osciloskopu odečteny hodnoty amplitud obou signálů. Zesílení se vypočte jako poměr výstupního signálu vůči vstupnímu signálu. Tento poměr se pro vynesení do amplitudové charakteristiky převede na decibely,

$$A = 20 \cdot \log\left(\frac{A_y}{A_u}\right), \tag{1.28}$$

Pomocí osciloskopu se využitím kurzorů odečte hodnota časového posunu Δt a fázový posun se vypočte dosazením do vzorce 1.24.

Výsledné hodnoty pro amplitudofázovou charakteristiku v komplexní rovině se jsou získány dosazením do rovnic 1.29 a1.30. Je nutné převézt fázový posun z ze stupňové na obloukovou míru,

$$Re(F) = \frac{A_y}{A_u} \cdot \cos\frac{\pi \cdot \varphi}{180}, \tag{1.29}$$

$$Im(F) = \frac{A_y}{A_u} \cdot \left(j \cdot \sin\frac{\pi \cdot \varphi}{180}\right). \tag{1.30}$$

1.9.2 Diskrétním měřením

Diskretizace měřeného signálu způsobuje ztrátu informace o amplitudě o maximální velikosti kvantizačního kroku a dle vzorkovací periody je dána přesnost měření fázového posunu.

Obrázek 1.11 – Popis vstupního a výstupního signálu soustavy

Při diskrétním měření do soustavy vstupuje vzorkovaný periodický signál $u_i(kT)$. Vstupní signál $u(kT_{VZ})$ je popsán rovnicí,

$$u(kT_{VZ}) = A_u \cdot \sin(\omega \cdot kT_{VZ}), \tag{1.31}$$

kde $u(kT_{VZ})$ je vstupní diskrétní signál,
A_u je amplituda vstupního signálu,
ω je úhlová frekvence vstupního signálu,
k je index vzorku periody,
T_{VZ} je vzorkovací perioda.

Výstupní signál $y(kT_{VZ})$ je poté vyjádřen takto,

$$y(kT_{VZ}) = A_y \cdot \sin(\omega \cdot kT_{VZ} + \omega \cdot \Delta kT_{VZ}), \tag{1.32}$$

kde $y(kT_{VZ})$ je výstupní signál,
A_y je amplituda výstupního signálu,
ΔkT_{VZ} je časový posun výstupního signálu,
φ je fázový posun výstupního signálu,
k je index vzorku periody,
T_{VZ} je vzorkovací perioda.

Podobně jako u spojitého měření je fázový posun roven,

$$\varphi = \omega \cdot \Delta kT_{VZ} \,. \tag{1.33}$$

Výstupní signál je po dosazení popsán rovnicí,

$$y(kT_{VZ}) = A_y \cdot \sin(\omega \cdot kT_{VZ} + \varphi). \tag{1.34}$$

Po ustálení výstupního signálu je podílem amplitudy výstupního a vstupního signálu vypočteno zesílení pro amplitudovou charakteristiku,

$$A_i = 20 \cdot \log\left(\frac{A_{y,i}}{A_u}\right), \tag{1.35}$$

kde A je zesílení soustavy v decibelech.

Časový posun lze získat pomocí autokorelace. Při autokorelaci je vypočtena soběpodobnost dvou signálů, z které vyplývá o kolik je výstupní signál časově posunut od vstupního signálu.

Fázový posun pro fázovou charakteristiku se následně vypočítá z časového posunu výstupního od vstupního signálu,

$$\varphi = 360 \cdot f \cdot \Delta kT_{VZ}, \tag{1.36}$$

kde f je frekvence vstupního signálu,

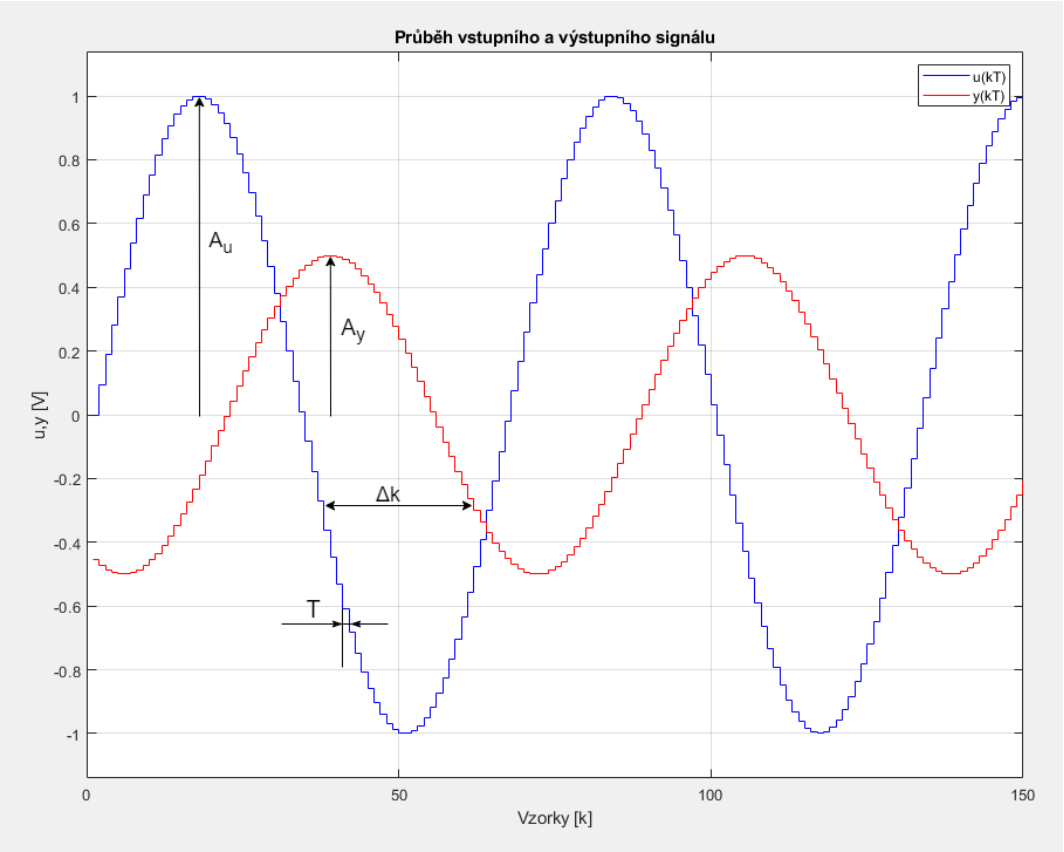
ΔkT_{VZ} je časový posun.

Hodnoty pro amplitudofázovou charakteristiku se získají dosazením do výrazů 1.37 a 1.38. Zesílení musí být v tomto výpočtu dáno poměrem signálů. Fázové zesílení musí být v radiánech za sekundu,

$$Re(F) = \frac{A_y}{A_u} \cdot \cos\frac{\pi \cdot \varphi}{180}, \tag{1.37}$$

$$Im(F) = \frac{A_y}{A_u} \cdot \left(j \cdot \sin\frac{\pi \cdot \varphi}{180}\right). \tag{1.38}$$

Na obrázku 1.12 jsou vykresleny vstupní a výstupní signály v ustáleném stavu s vyznačenými hodnotami pro výpočet bodu frekvenční charakteristiky.



Obrázek 1.12 – Průběhy měřených signálu diskrétním měřením

1.10 ANALÝZA POŽADAVKŮ NA DISKRÉTNÍ MĚŘÍCÍ SYSTÉM

Na počátku analýzy je potřeba identifikovat cíle měření a s nimi spojené vlastnosti. V případě měření frekvenční charakteristiky je kladen důraz, aby byla dodržena minimální vzorkovací perioda, a musí být zajištěn dostatečný počet vzorků na periodu. Tyto dvě vlastnosti souvisí se správným určením fázového posunu. Dále je vhodné mít dostatečné rozlišení vstupního a výstupního signálu pro korektní zjištění zesílení měřené soustavy a dostatečnou velikost operační paměti.

1.10.1 Přesnost určení fázového posunu pro diskrétní měření

Přesnost fázového posunu je závislá na počtu vzorků na periodu a intervalu vzorkování. Pro určení fázového posunu je vzorec pro výpočet minimální vzorkovací periody odvodí z následující rovnice,

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t, \tag{1.39}$$

kde φ je fázový posun,

Δt je časový posun,

ω je úhlová frekvence,

f je frekvence signálu-

Převedením z obloukové na stupňovou míru je získáno,

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t = 360 \cdot f \cdot \Delta t, \tag{1.40}$$

Při určení fázového posunu je počítáno s nepřesností vyplývající ze vzorkovací periody. Přesnost určení fázového posunu je značena ε_φ. Minimální vzorkovací perioda je ε_t,

$$\varphi + \varepsilon_\varphi = 360 \cdot f \cdot (\Delta t + \varepsilon_t)\,, \tag{1.41}$$

kde ε_φ je přesnost určení fázového posunu

ε_t je minimální vzorkovací perioda.

Úpravou této rovnice je získán vztah pro určení přesnosti fázového posunu při minimální periodě vzorkování ε_t,

$$\varepsilon_\varphi = 360 \cdot f \cdot \varepsilon_t\,. \tag{1.42}$$

1.10.2 Požadavek na přesnost určení zesílení pro diskrétní měření

Získání zesílení soustavy závisí na rozlišení A/D převodníku a rozsahu vstupního signálu do soustavy. Měřená hodnota A/D převodníkem je rozlišen kvantizačními kroky V_{KV}, které udávají přesnost rozlišení měřené hodnoty. Pokud je tedy požadavek na určení zesílení ε_Z procent z rozsahu, je nutné použít n-bitový A/D převodník. Počet potřebných bitů je definován vzorcem,

$$n = \log_2\left(\frac{U_{max} - U_{min}}{U_{KV}}\right), \tag{1.43}$$

kde n jsou bity rozlišení A/D převodníku,

U_{max} je maximální hodnota signálu,

U_{min} je minimální hodnota signálu,

U_{KV} je velikost kvantizačního kroku.

Minimální kvantizační krok je dán vztahem,

$$U_{KV} = U_{max} \cdot \frac{\varepsilon_Z}{100}, \tag{1.44}$$

kde ε_Z je přesnost určení zesílení v procentech.

Minimální zesílení Z_{min} je dáno vzorcem,

$$Z_{min} = \frac{U_{KV}}{U_{max} - U_{min}}. \tag{1.45}$$

Výsledný signál musí být rozlišitelný od šumu. Na signál vždy působí minimálně kvantizační šum, který je roven velikosti jednoho kvantizačního kroku. Pro určení rozlišitelnosti signálu se využívá poměr šumu k signálu (SNR). Minimální poměr pro zajištění rozlišení signálu od šumu je 10:1,

$$Z_{min} = \frac{SNR \cdot U_{KV}}{U_{max} - U_{min}}, \tag{1.46}$$

kde SNR je poměr šumu k signálu.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsou řešené konkrétní vlastnosti navrhovaného přípravku a použité principy k dosažení uspokojujícímu výsledku automatického měření frekvenčních charakteristik.

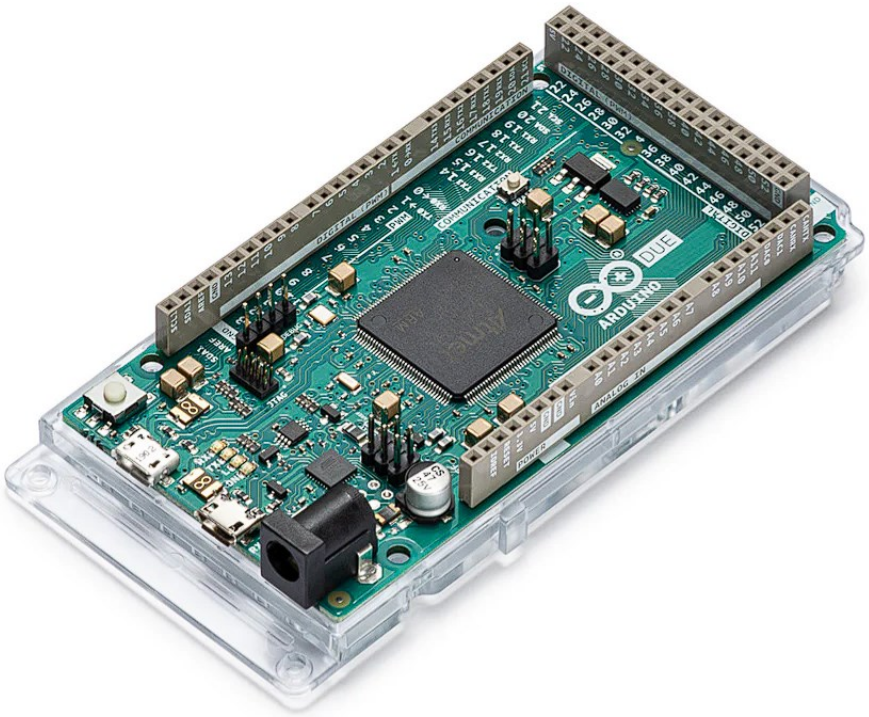
Dále jsem definovány limity měření a popsán program pro Arduino Due a aplikace v MATLAB App Designeru.

2.1 ARDUINO

Arduino je otevřená platforma, která má silnou stránku ve své jednoduchosti. Veškeré knihovny a dokumentace k vývojovým deskám jsou plně dostupné a lze je nalézt na stránkách výrobce. Arduino je populární mezi širokou škálou uživatelů. Arduino je používáno od úplných začátečníků a hobby tvůrců přes studenty až po profesionály. Se svou jednoduchostí je excelentním nástrojem pro úvod do programování a elektroniky jako takové. Jednoduchost Arduina využívají také pokročilý uživatelé například k testování nebo vývoji prototypů.

Arduino nabízí grafické uživatelské prostředí pro programování. Programovací jazyk Arduino Programming Language (dále jen APL) je podobný jazyku C nebo C++. Protože je Arduino používáno výhradně k programování, jsou v APL obsaženy knihovny, které jsou výhradně zaměřeny na řešení těchto aplikací.

Arduino nabízí výběr z velkého množství desek. Méně výkonné desky jsou určeny hlavně pro nenáročné aplikace, mezi tuto skupinu desek lze zařadit například desky Arduino UNO nebo Arduino Nano. Tyto desky nabízejí menší taktovací frekvenci 16 MHz a operační paměť 2 KB. Omezený počet analogových vstupů a absence analogových výstupů je další nevýhodou. Výkonnějšími deskami jsou Arduino Zero a Arduino Due. Tyto desky nabízejí vyšší taktovací frekvenci 48 MHz (Zero) a 84 MHz (Due). Operační paměť je navýšena na 32 KB. Obě desky nabízejí možnost využití analogového výstupu. Arduino Zero je vybaveno jedním 10-ti bitovým DAC výstupem a Arduino Due nabízí dva 12-ti bitové DAC výstupy. Nejvýkonnější co Arduino nabízí, je vývojová deska Arduino GIGA a mikroPLC Arduino Opta. Obě zařízení jsou osazeny procesory s taktovací frekvencí 240 MHz (Cortex M4) nebo 480 MHz (Cortex M7). Arduino Opta je možné využít i v průmyslových aplikací.



Obrázek 2.1 – Arduino Due

2.1.1 Hardwarové vlastnosti Arduino Due

Pro tuto aplikaci byla zvolena deska Arduino Due. Díky svým slušným hardwarovým vlastnostem je jednou z více výkonných desek, které Arduino nabízí. Tato deska, která nabízí velké množstvím aplikací je dostupná za poměrně nízkou cenu 50 €.

Výkon Arduina Due je dostatečný pro aplikaci měření frekvenční charakteristiky nižších frekvencí. Zásadní vlastností jsou kromě výpočetního výkonu také dva 12-ti bitový DAC výstupy a operační paměť 96 KB SRAM. Další důležité specifikace jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 2.1 – Technická specifikace Arduina Due

Procesor	AT91SAM3X8E
Doporučené napájecí napětí	7-12V
Digitální vstupy a výstupy	54 (12 z nich lze nakonfigurovat jako PWM výstup)
Analogové vstupy	12
Analogové výstupy	2 (DAC) 12-bit
Paměť Flash	512 KB (pro uživatelskou aplikaci)
Operační paměť SRAM	96 KB
Taktovací frekvence	84 MHz

Arduino Due nabízí tyto způsoby komunikace:

- Serial (UART),
- I2C,
- SPI,
- CAN,
- USB,
- JTAG.

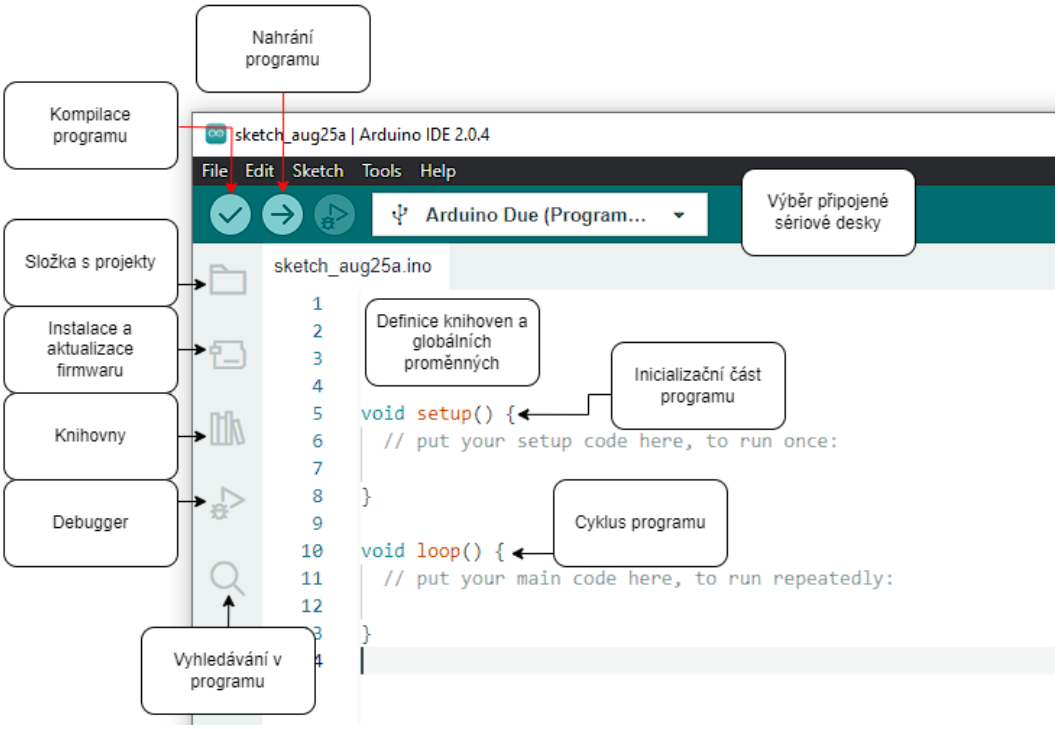
2.1.2 Arduino IDE

Arduino nabízí vlastní grafické prostředí pro psaní programu. Arduino IDE je open-source software vyvinut přímo pro desky Arduino. Grafické prostředí je konfigurovatelné a nabízí uživatelsky přehledné prostředí.

Základní knihovny jsou pro desky Arduino podobné, pro jednotlivé desky jsou rozdílné například možné rozlišení A/D a D/A převodníků, které jsou dány hardwarovými vlastnostmi. Standartním rozlišením A/D a D/A převodníků je 8 bit. Pro využití maximálního rozlišení Arduina Due je nutné nastavit rozlišení převodníků funkcemi `AnalogWriteResolution(bity)` a `AnalogReadResolution(bity)`.

Importování knihoven je možné přímo v programovém prostředí Arduino IDE v jedné ze čtyř dostupných záložek podobně jako veškerý firmware k vývojovým deskám.

Arduino IDE komunikuje s vývojovou deskou přes USB port nebo přes programátor. Po připojení desky k PC je deska zpravidla rozpoznána softwarem a lze navolit v rozbalovacím okně. Základní záložky a funkce jsou vyznačeny na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 – Prostředí Arduino IDE

2.2 REALIZACE MĚŘENÍ POMOCÍ ARDUINO DUE

Arduino Due má jako každý hardware svá omezení a limity, kterých může dosáhnout. V této kapitole jsou definovány limity měření touto vývojovou deskou.

2.2.1 Limity určení fázového posunu

Využitím knihovny DueTimer lze dosáhnout přesnosti časovače až 1 µs. Instrukce nastavení hodnoty D/A převodníku a vyčtení hodnoty A/D převodníkem trvá zpravidla 5 µs. Instrukce čtení a zápisu se provádí při zaznamenávání měření soustavy celkem třikrát. Celková doba čten a zápisu hodnot je tedy 15 µs. S rezervou pro ostatní operace 5 µs je minimální vzorkovací perioda 20 µs.

S tímto omezením lze určit nutný počet vzorků na periodu pro danou požadovanou přesnost určení fázového posunu. Pro požadovanou přesnost určení fázového posunu minimálně 0.1 °při frekvenci 1 Hz je po dosazení do vzorce 1.42 získána tato hodnota vzorkovací periody,

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_\varphi}{360 \cdot f} = \frac{0{,}1}{360 \cdot 1} \cong 277{,}7 \cdot \mu s. \tag{2.1}$$

kde ε_φ je přesnost určení fázového posunu

ε_t je minimální vzorkovací perioda.

Ze známé vzorkovací periody lze získat minimální počet vzorků na periodu signálu,

$$N = \frac{T}{T_s} = \frac{1}{277{,}7 * 10^{-6}} \cong 3600\ vzorků. \tag{2.2}$$

Z těchto vztahů tedy plyne, že pro dosažení přesnosti fázového posunu 0,1 ° je nutné zajistit periodu o minimálním počtu 3600 vzorků.

2.2.2 Limity určení zesílení

Arduino Due disponuje dvěma A/D a D/A převodníky s rozlišením 12 bit. A/D převodník rozlišuje napětí v rozmezí 0 až 3,3 V. Rozsah výstupu D/A převodníku je uveden od 0,55 do 2,75 V. Maximální zesílení při využité celého rozsahu D/A převodníku je tedy,

$$Z_{max} = \frac{U_{ADCmax} - U_{ADCmin}}{U_{DACmax} - U_{DACmin}} = \frac{3{,}3 - 0}{2{,}75 - 0{,}55} = \frac{3{,}3}{2{,}2} = 1{,}5, \tag{2.2}$$

kde Z_{max} je maximální zesílení,

U_{ADCmax} je maximální měřitelné napětí A/D převodníku,

U_{ADCmin} je minimální měřitelné napětí A/D převodníku,

U_{DACmax} je maximální výstupní napětí D/A převodníku,

U_{DACmin} je minimální výstupní napětí D/A převodníku.

Minimální kvantizační krok A/D převodníku je vypočten z výrazu,

$$U_{KV} = \frac{U_{ADCmax} - U_{ADCmin}}{2^N} = \frac{3{,}3 - 0}{4096} = \frac{3{,}3}{4096} \cong 0{,}8\,mV, \tag{2.3}$$

Využitím vzorců z kapitoly 1.10.2 lze se vypočítá minimální zesílení. Pro výpočet je použit poměr signálu k šumu 20:1,

$$Z_{min} = \frac{SNR \cdot U_{KV}}{U_{DACmax} - U_{DACmin}} = \frac{20 \cdot 8 \cdot 10^{-4}}{2{,}75 - 0{,}55} = 0{,}0073, \tag{2.4}$$

kde Z_{min} je minimální rozlišitelné zesílení.

2.2.3 Omezení dané pamětí

Během měření je nutné uložit v operační paměti vývojové desky Arduino celkem 5 period signálu. Měřená hodnota A/D převodníku se ukládá do datového typu short int a pro její uložení se musí alokovat 2 byte paměti. Arduino disponuje 96 kB SRAM. S těmito parametry lze určit maximální počet vzorků na periodu signálu,

$$N_{VZ} = \frac{M_{Ard}}{M_{int} \cdot N_T} = \frac{96 \cdot 1024}{2 \cdot 5} = 9830\ vzorků, \tag{2.5}$$

kde N_{VZ} je počet vzorků na periodu,

N_T je počet period,

M_{Ard} je dostupná paměť v Arduino Due,

M_{int} je velikost datového typu short int.

Tímto výpočtem je zjištěn maximální počet vzorků na periodu signálu.

2.2.4 Výsledné parametry

Meze parametrů pro měření frekvenční charakteristiky pomocí Arduina Due vyplývají z jeho vlastností. Tyto meze jsou vyobrazeny v tabulce 2.3.

Tabulka 2.2 – Porovnání parametrů vycházejících z omezení Arduina Due

Minimální interval vzorkování 20 μs			
Počet vzorků na periodu	Maximální měřitelná frekvence [Hz]	Přesnost určení fázového posunu [°]	Alokovaná paměť pro měřená experiment [%]
3600	13,89	0,1	36,62
5000	10	0,072	50,82
6500	7,69	0,0554	66,12
8000	6,25	0,045	81,38
9830	5,2	0,0375	100

Z této tabulky je zřejmé, že není možné použít maximální počet vzorků na periodu z důvodu nedostačující zbývající operační paměti pro zbylé proměnné programu. Pro návrh programu je zvolen 5 000 vzorků na periodu. Při tomto počtu vzorků je splněn požadavek na přesnost určení fázového posunu, dostatek operační paměti pro program a uspokojující maximální frekvence 10 Hz.

2.3 REALIZACE AUTOMATICKÉHO MĚŘENÍ AFFCH

Měření frekvenční charakteristiky probíhá v oblasti ohraničené frekvencemi. V této oblasti se určí měřené frekvence. Dle frekvencí se vypočítají jednotlivé vzorkovací periody a za předpokladu známé časové konstanty τ přepočítá přibližný počet period do ustálení,

$$T_{ust} \approx 4 \cdot \tau \cdot f, \tag{2.6}$$

kde T_{ust} je počet period do ustálení,

τ je časová konstanta soustavy,

f je frekvence měřeného bodu.

Tyto parametry se odesílají do Arduina společně s pokynem na start měření.

2.3.1 Měření při dané frekvenci v Arduinu Due

Arduino generuje vstupní periodický sinusový signál do soustavy pomocí D/A převodníku až do ustálení soustavy, které proběhne za parametr předaný z MATLABu.

Po ustálení soustavy se provede měření dvou period výstupu soustavy a skutečných vstupních hodnot. Následně se naměřená data předají do výpočetního softwaru MATLAB.

2.3.2 Vyhodnocení získaných dat v MATLABu

Ze změřených dat je získáno zesílení soustavy a pomocí funkce xcorr v MATLABU je korelací určen časový posun výstupního signálu. Časový posun se jednoduše přepočítá na fázový posun. Ze získaných hodnot zesílení a fázového posunu jsou vypočítány souřadnice amplitudofázové charakteristiky a posledním krokem měření bodu frekvenční charakteristiky je samotné vynesení dat do grafů. Po ukončení měření bodu je proces opakován až do poslední frekvence ve zvolené oblasti měření.

2.4 PROGRAMOVÉ ŘEŠENÍ PRO ARDUINO DUE

Zadání pro program v Arduinu je rozděleno na dvě části. První žádanou funkcí programu je vyčítání a identifikace informace přijaté ze sériové linky. Druhou je samotné měření AFFCh, u kterého je kladen důraz na efektivitu programu.

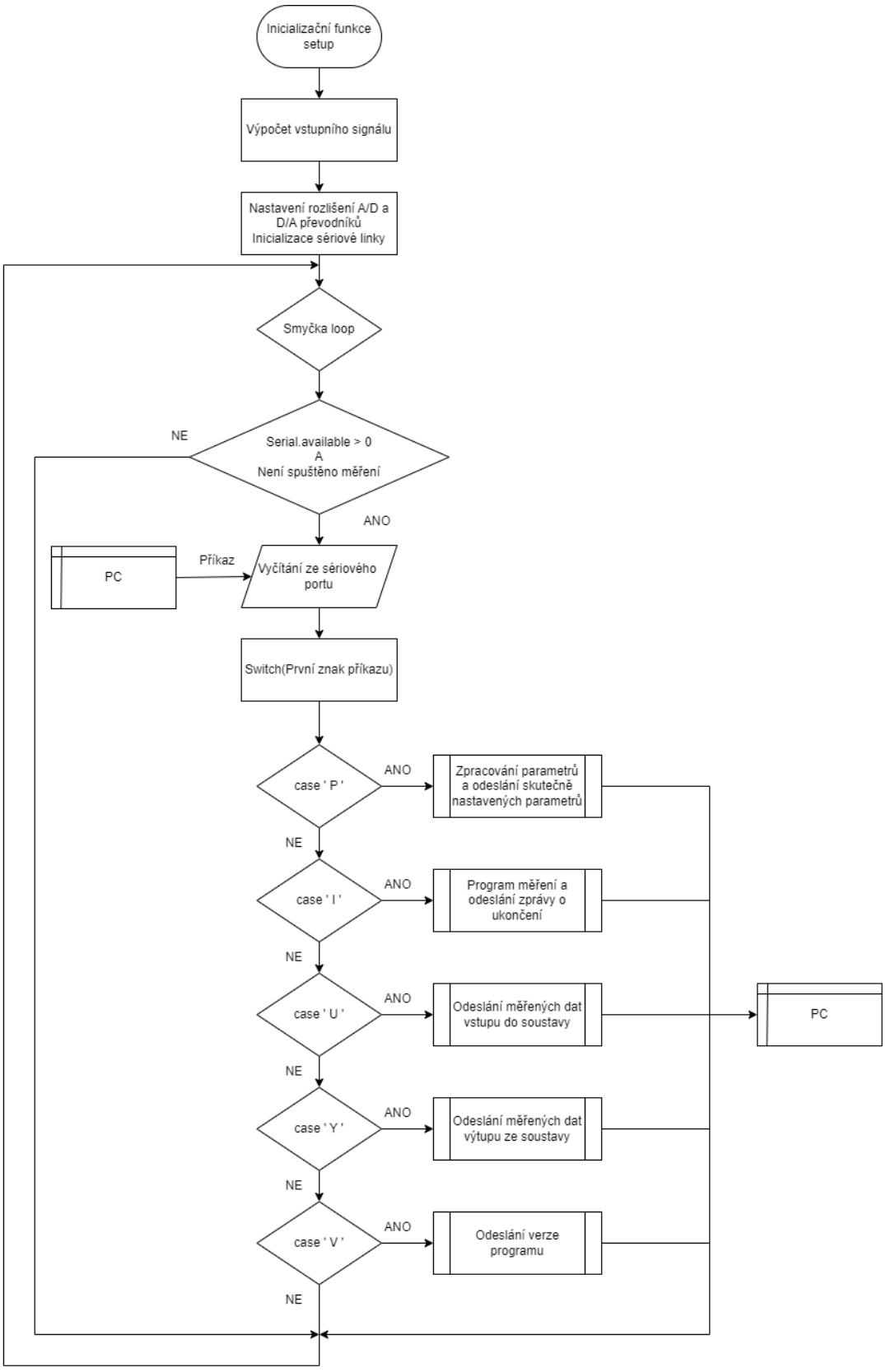
Tabulka 2.3 – Seznam použitých funkcí v programu Arduina Due

Funkce	Popis
`TimerX.start(Ts);`	Zapne časovač TimerX s periodou Ts
`TimerX.stop();`	Vypne časovač TimerX
`funkce.attachInterrupt (TimerX);`	Definuje funkci přerušení při dosažení periody časovače
`Serial.readString();`	Vrátí znaky ze zásobníku sériového portu jako datový typ String
`String.charAt(index);`	Vrátí znak na indexu
`String.indexOf(znak);`	Vrátí indexy znaků
`String.substring(index_1, index_2);`	Vrátí znaky mezi indexy index_1 a index_2
`String.toInt();`	Převede datový typ String na Int

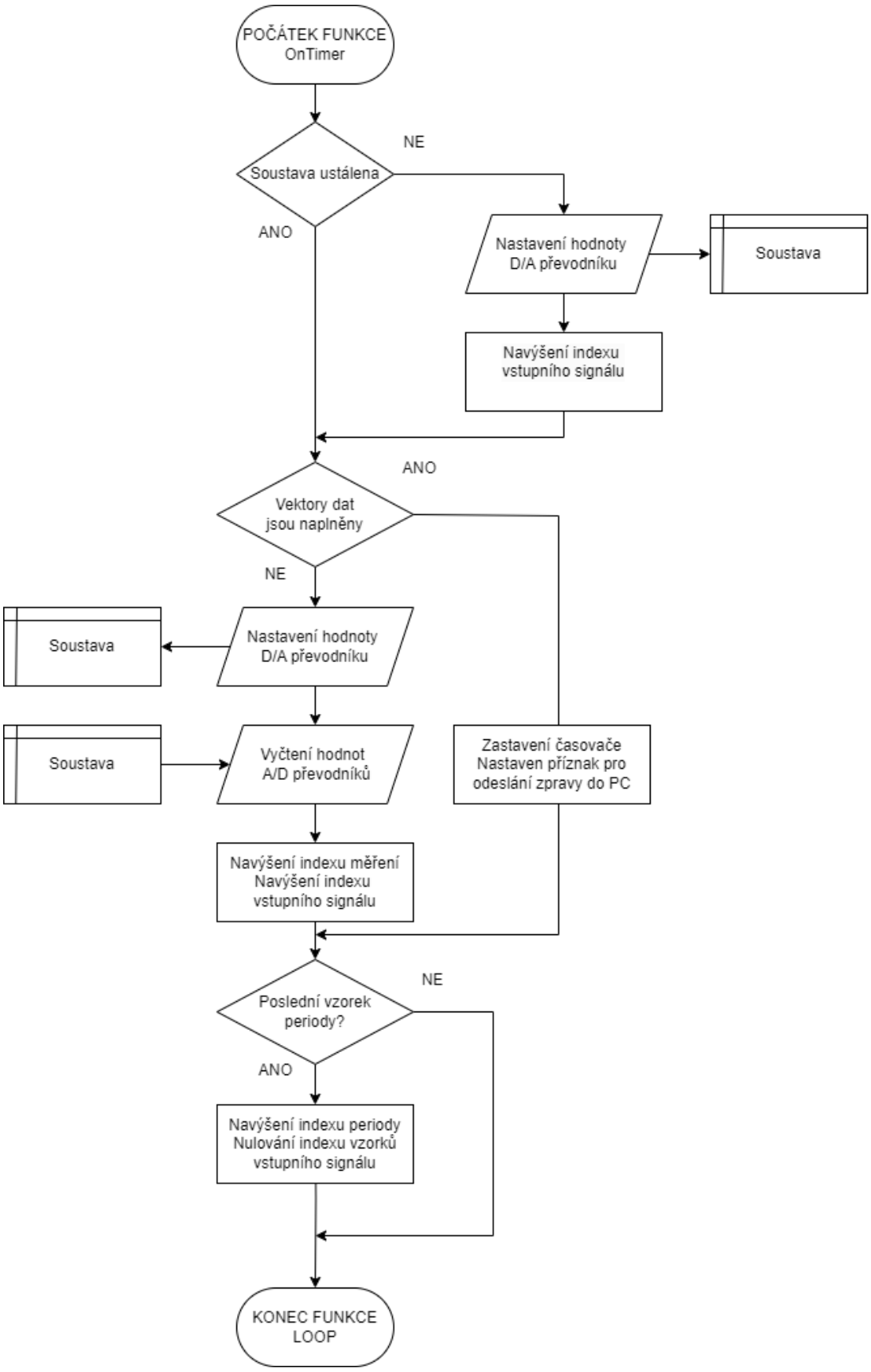
2.4.1 Popis funkce programu

Po spuštění Arduino Due se nakonfiguruje sériová komunikace a vygeneruje se vstupní signál pro soustavu do předem alokované paměti, dále se periodicky zjišťuje přítomnost dat na sériové lince. Pokud jsou přítomná data, Arduino vyčte obsah zprávy a identifikuje ji podle prvního znaku řetězce. Podle identifikovaného příkazu se provede příslušná operace a odpověď se odešle zpět do PC. Vývojový diagram je k vidění na obrázku 2.3.

Při identifikaci příkazu pro spuštění experimentu jsou inicializovány proměnné, spuštěn časovač s parametrem vzorkovací periody a blokováno další vyčítání ze sériové linky. Časovač vyvolává přerušení při dosažení vzorkovací periody. V obsluze přerušení je řešeno ustálení soustavy, porovnáním aktuální periody s žádanou. Po ustálení soustavy jsou zaznamenány dvě měřené periody vstupního a výstupního signálu soustavy. Po dokončení měření bodu frekvenční charakteristiky je časovač zastaven, Arduino odesílá příkaz do PC o ukončení měření a je odblokována sériová komunikace. Funkce měření je detailněji popsána ve vývojovém diagramu na obrázku 2.4.



Obrázek 2.3 – Vývojový diagram identifikace příkazu - Arduino Due



Obrázek 2.4 – Vývojový diagram měření - Arduino Due

2.5 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL

Arduino Due komunikuje s nadřazenou aplikací v PC pomocí předem definovaných příkazů. První znak je v programu Arduina Due porovnán se známými příkazy a na jeho základě se provede odpovídající část programu a odešle se odpověď.

Zpráva předaná po sériové lince je řetězec ASCII znaků, tedy znaky o velikosti 1 bajt. Příkaz je vždy na první pozici a je ukončen dvojtečkou. Veškeré znaky jsou po tomto znaku brány jako data. Pokud zpráva obsahuje více jak jedno číslo, je nutné použít oddělovač. Zpráva je odeslání terminátoru, který je standartně v prostředí Arduino IDE nastaven jako dva znaky <CR><LF>, tedy znaky hodnoty 13_{10} a 10_{10},

$$\mathrm{U{:}\,xxxx,\,xxxx,\,\ldots,\,xxxx,} < \mathrm{CR} >< \mathrm{LF} >, \tag{2.7}$$

kde U je příkaz,
, je oddělovač,
<CR><LF> je ukončovač.

Tabulka 2.4 – Seznam příkazů komunikačního protokolu

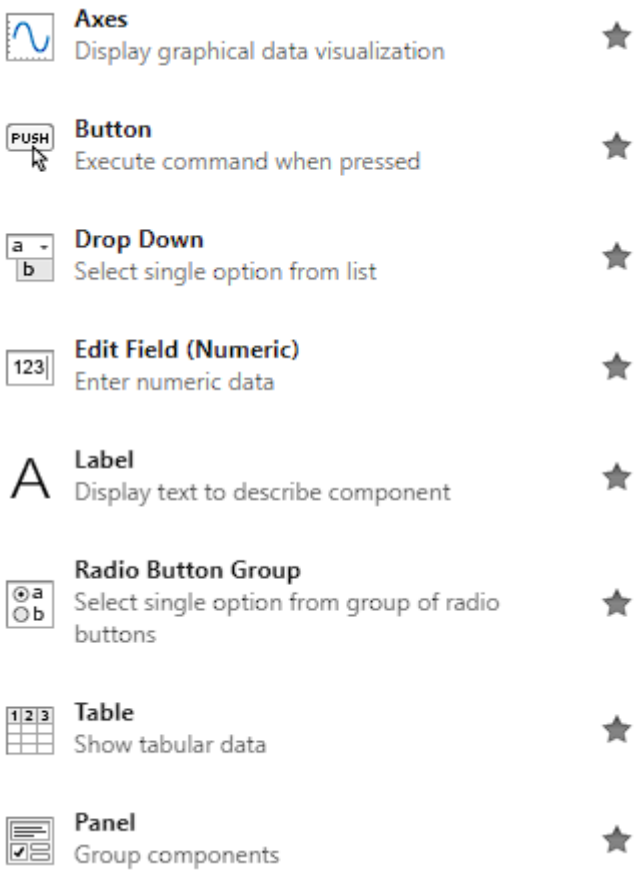
Příkaz (PC)	Odpověď (Aduino Due)	Popis příkazu
I:<CR><LF>	K:<CR><LF>	Zahájí měření a po dokončení vrací příkaz
P:Ts,nT,<CR><LF>	P:Ts,nT, <CR><LF>	Nastaví parametry vzorkovací periody Ts a počet period do ustálení nT a vrátí skutečně nastavené parametry
T: <CR><LF>	T:Ts <CR><LF>	Vrátí aktuálně nastavenou periodu vzorkování Ts
N: <CR><LF>	N: nT<CR><LF>	Vrátí aktuální nastavený počet period nT
V: <CR><LF>	V: Název<CR><LF>	Vrátí aktuální verzi programu
U: <CR><LF>	U:xx,…,xx<CR><LF>	Vrátí naměřená vstupní data
Y: <CR><LF>	Y:xx,…,xx <CR><LF>	Vrátí naměřená výstupní data

2.6 NÁVRH APLIKACE V MATLAB APP DESIGNER

Aplikace vytvořená v MATLAB App Designeru je navržena pro měření a zobrazení dané oblasti frekvenční charakteristiky. Oblast měření je omezena odvozenou frekvencí 10 Hz.

2.6.1 Použité komponenty

Uživatelské rozhraní je sestaveno s pomocí osmi komponentů. K zadávání parametrů je využit Edit Field (Numeric). Seznam dostupných sériových portů je zobrazen v tabulce Table. Programové funkce jsou prováděny po stisknutí tlačítka Button. Měřená a vypočtená data jsou vyneseny do grafů Axes. Pro dodatečné popisky se využívá Label.



Obrázek 2.5 – Použité komponenty v aplikaci

2.6.2 Obsluha aplikace a její funkce

Aplikace vychází z dvou panelové šablony. Levý panel aplikace je řídící. Z řídícího panelu se spravuje sériový port. Pod správou sériového portu lze nalézt informační text, který

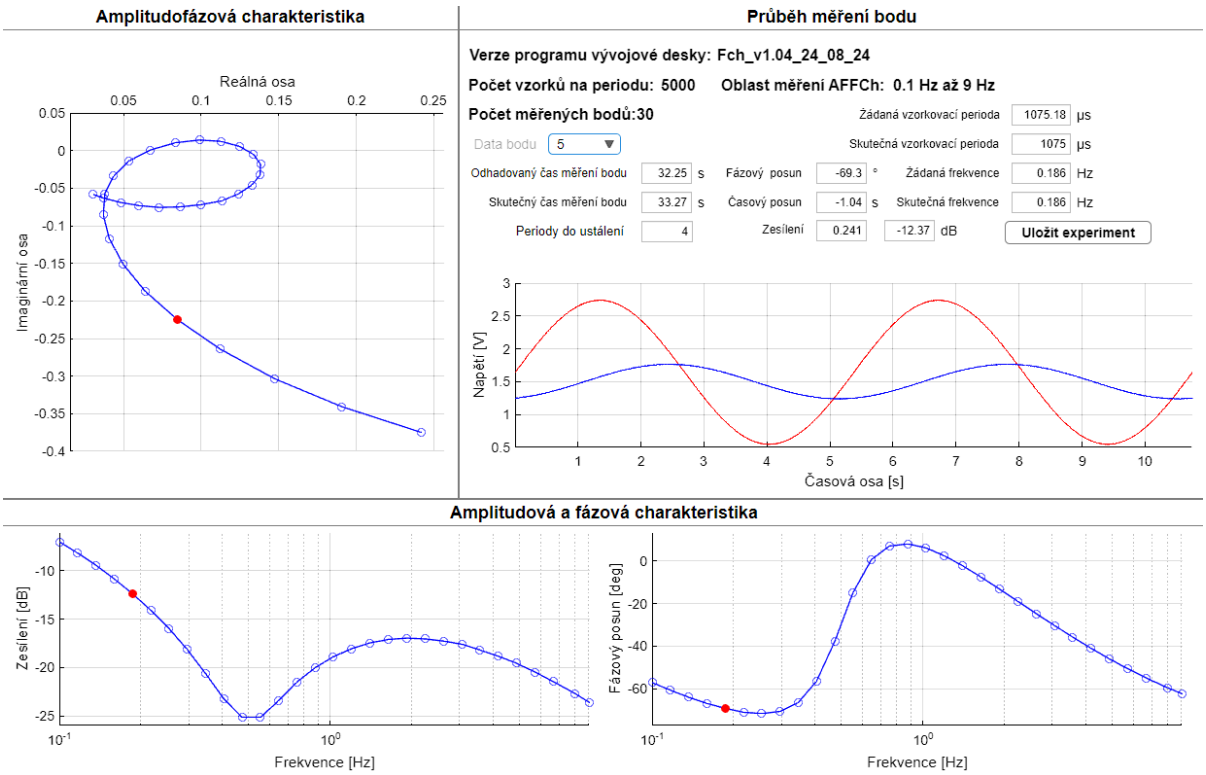
popisuje aktuální stav experimentu. Hned pod ním je odhadovaný čas experimentu nebo čas do jeho dokončení. Uživatel si před spuštěním experimentu navolí, zda chce využít konstantního

Obrázek 2.6 – Ovládací panel aplikace

počtu period ustálení nebo výpočet period ustálení dle časové konstanty soustavy. Dalšími parametry jsou frekvence, které vymezí oblast měření a počet měřených bodů v této oblasti. Tlačítky se ovládá spuštění experimentu a dokončení experimentu je možné přeměření bodu frekvenční charakteristiky. Případné uvedení aplikace do výchozího stavu a vymazání hodnot experimentu se provede tlačítkem reinicializace.

Na pravém panelu jsou zobrazeny grafy frekvenční charakteristiky společně s měřeným průběhem vstupní a výstupní veličiny. Detail získaných a vypočtených hodnot je umístěn nad grafem průběhu měření. V průběhu experimentu se získané hodnoty společně s grafy aktualizují po dokončení výpočtu. Zobrazené parametry měření jsou vyznačeny na grafech

červenou tečkou. Po dokončení experimentu je možné v rozbalovacím seznamu vybrat bod měření a prohlížet získané hodnoty. Tlačítko pro uložení experimentu uloží soubor ve formátu .mat do požadovaného adresáře. V názvu souboru je počáteční a konečná frekvence, počet bodů měření a zda byl pro ustálení soustavy použit výpočet nebo konstantní parametr.



Obrázek 2.7 – Zobrazovací panel aplikace

2.6.3 Provedení experimentu

Měření bodu probíhá ve dvou režimech. První režim uskuteční změření celé oblasti zvolené uživatelem. Po dokončení experimentu je možné využít druhého režimu, který provede měření pouze jeden bod frekvenční charakteristiky a přepíše data pro daný bod z původního experimentu.

Celý experiment probíhá jako opakování sekvence měření jednoho bodu frekvenční charakteristiky. Sekvence měření je:

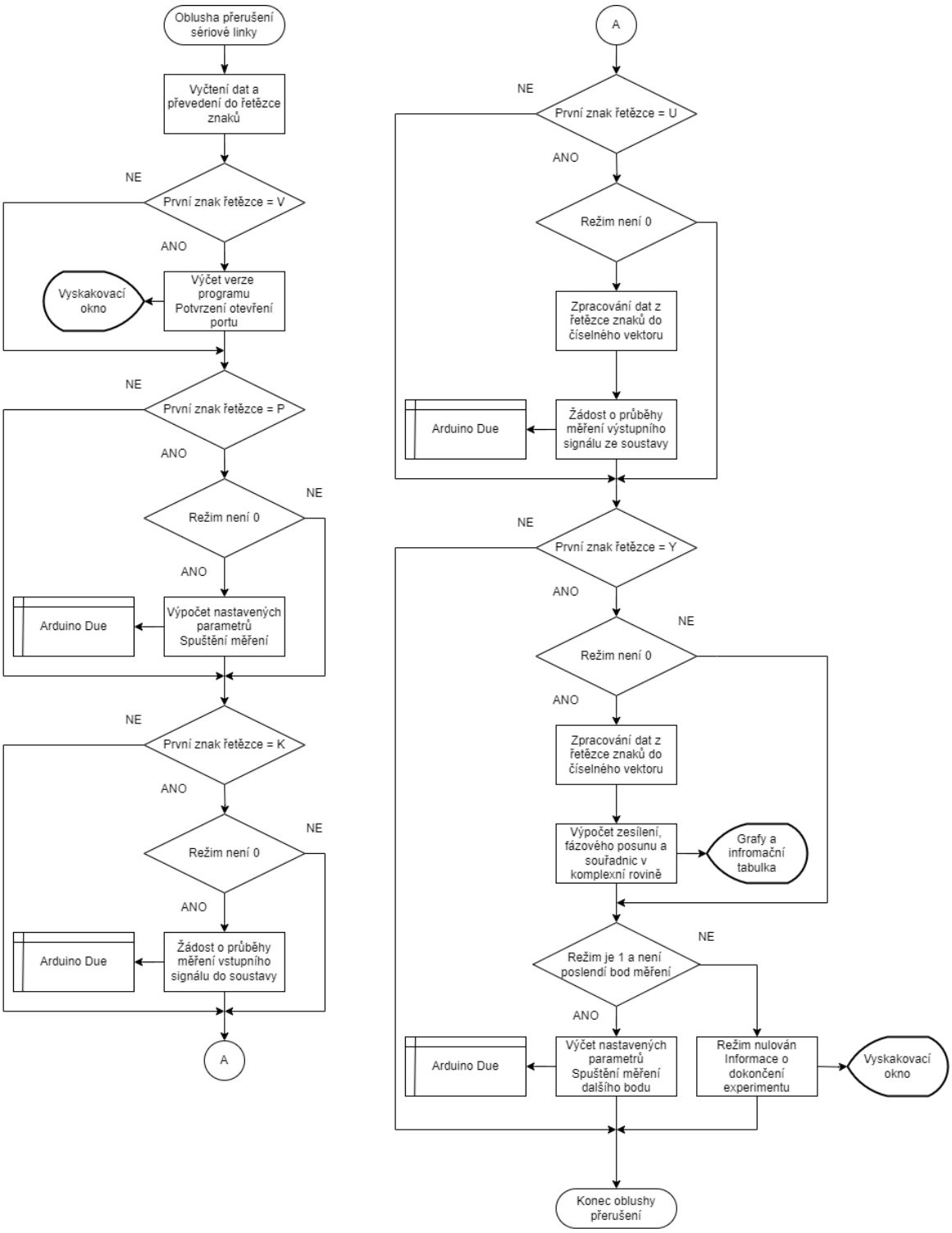
- stisk tlačítka zahájení experimentu,
- nastavení parametrů,
- pokyn k měření,
- žádost o data vstupního signálu do soustavy,

- žádost o data výstupního signálu ze soustavy,
- výpočet a zobrazení výsledných hodnot.

Po ukončení experimentu je vyvolané vyskakovací okno s informací o ukončení experimentu. Vývojový diagram je na obrázku 2.8.

2.6.4 Ošetření vstupních hodnot a chybových stavů

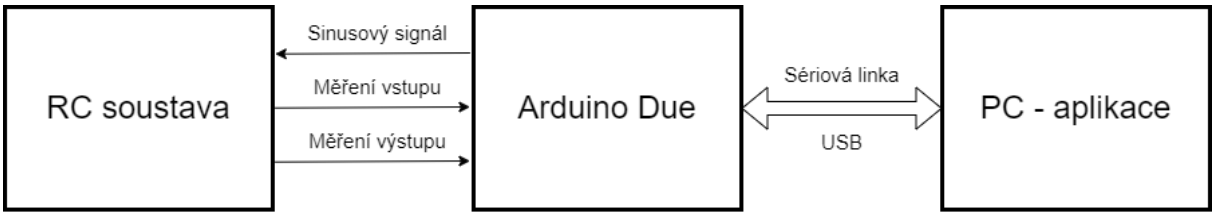
Chyba komunikace mezi Arduinem a aplikací v PC je řešena pomocí přerušení časovače. Časovač je spuštěn při odeslání zprávy. Pokud Arduino neodpoví za určitý čas, je vyhlášena chyba a aplikace se reinicializuje.



Obrázek 2.8 – Vývojový diagram průběhu experimentu v App Designeru

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této kapitole je popsána měřená soustava a jsou uvedeny vlastnosti. Hardwarová konfigurace se skládá z měřené RC soustavy, vývojové desky Arduino Due a aplikace realizované v PC a je k vidění na obrázku 3.1.

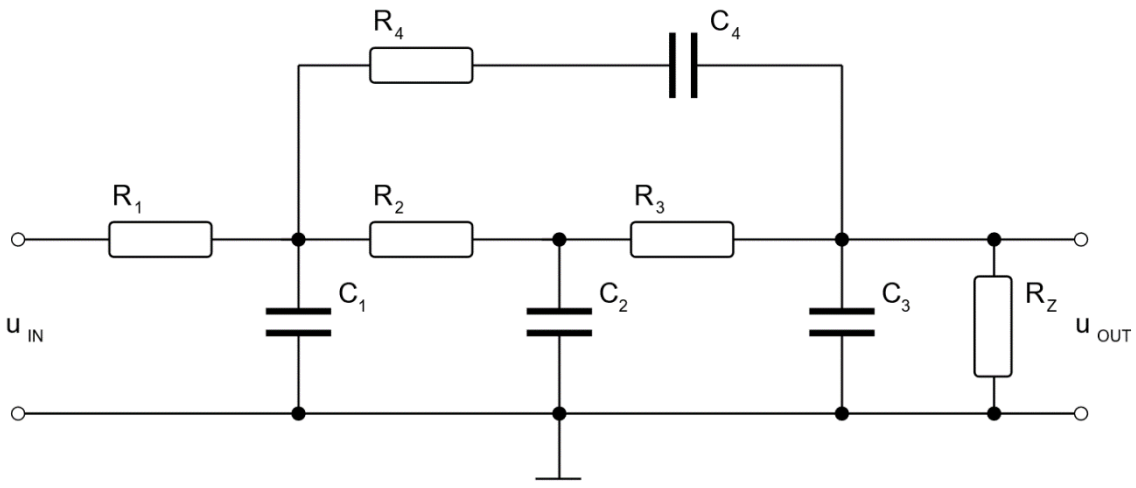


Obrázek 3.1 – Hardwarová konfigurace

Komunikace mezi deskou Arduino Due a aplikací v PC je zajištěna pomocí virtuální sériové linky přes USB. Vývojová deska využívá USB port kromě komunikace s PC i k napájení a případnému přeprogramování.

3.1 MĚŘENÁ SOUSTAVA

Pro tuto diplomovou práci byla vytipována RC soustava R5C4 se zajímavou oblastí okolo 1 Hz. Je tedy ideální pro názornou ukázku měření frekvenční charakteristiky pro tuto aplikaci. Vypracováním plošného spoje a krytu na přípravek je sníženo riziko poruchy. Schéma zapojení je na obrázku 3.2 a hodnoty součástek jsou k vidění v tabulce 3.1.



Obrázek 3.2 – Schéma zapojení RC soustavy

Tabulka 3.1 – Seznam hodnot součástek

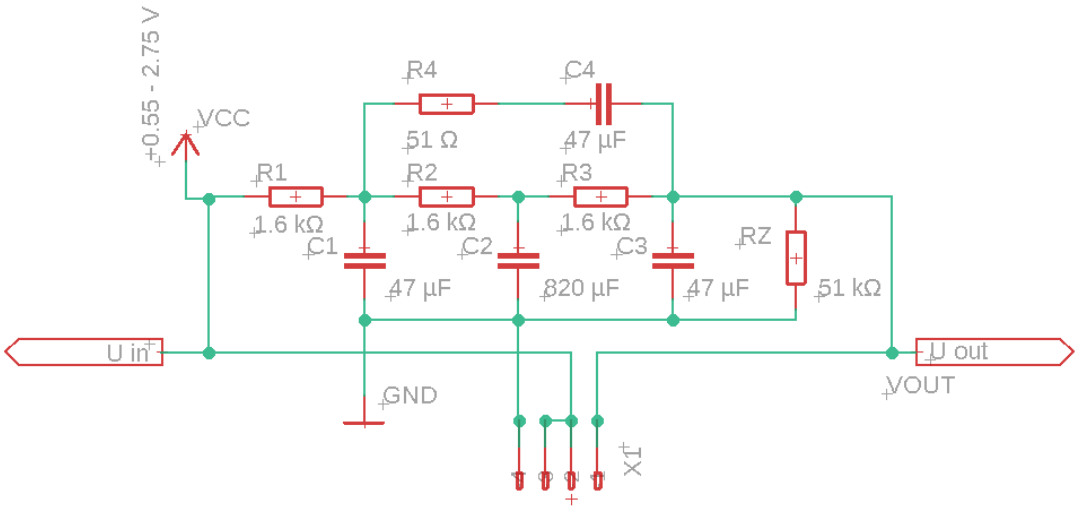
Součástka	Hodnota
R_1, R_2, R_3	1,6 kΩ
R_4	51Ω
R_Z	51 kΩ
C_1, C_3, C_4	47 μF
C_2	820 μF

3.1.1 Návrh plošného spoje a krytu pro přípravek1

Návrh plošného spoje pro RC soustavu je proveden v programu EAGLE. EAGLE je program používaný pro návrh plošných spojů. Uživatelské prostředí je velmi uživatelsky přívětivé a intuitivní. Knihovny nabízí velké množství elektronických součástek, které lze dle potřeby upravit.

Pro návrh plošného spoje je nutné prvně vytvořit schéma zapojení. Z dostupných knihoven se zvolí součástky, tak aby rozměry souhlasily s reálnými rozměry. Pro usnadnění pájení plošného spoje jsou v knihovně kondenzátorů a rezistorů upraveny pájecí plochy na kruhový tvar s poloměrem 2,032 milimetru.

Kompletní schéma je na obrázku 3.3 a seznam použitých součástek s rozměry a názvy v knihovnách jsou uvedeny v tabulce 3.2.

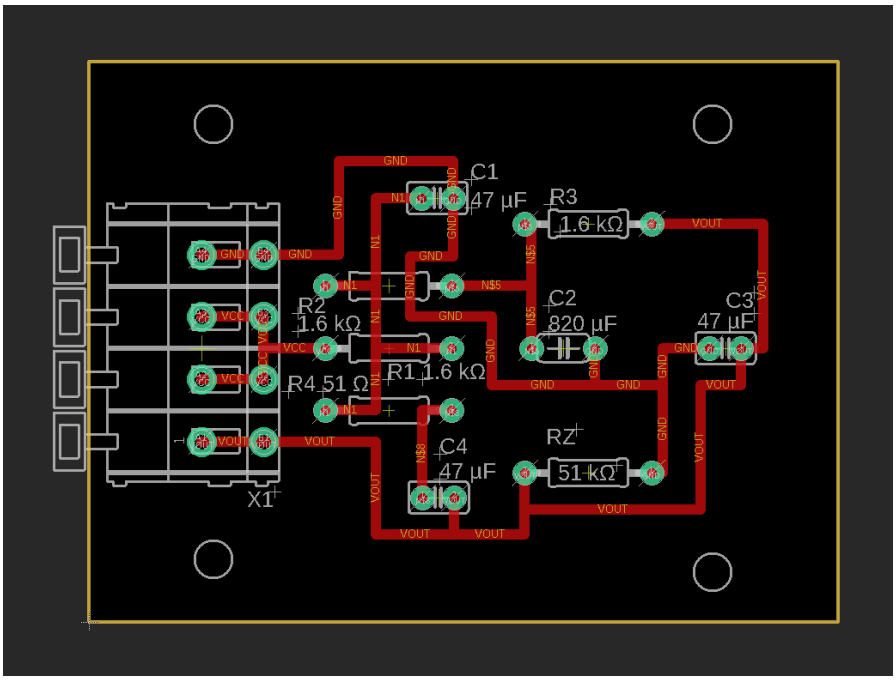


Obrázek 3.3 – Schéma zapojení – EAGLE

Tabulka 3.2 - Seznam součástek EAGLE

Součástka	Název knihovny	Rozteč vývodů
C1, C3, C4	C-EU025-024X044	2,5 mm
C2	C-EU050-024X044	5 mm
R1, R2, R3, R4, RZ	R-EU_0207/10	10 mm
X1	255-404-5	5 mm

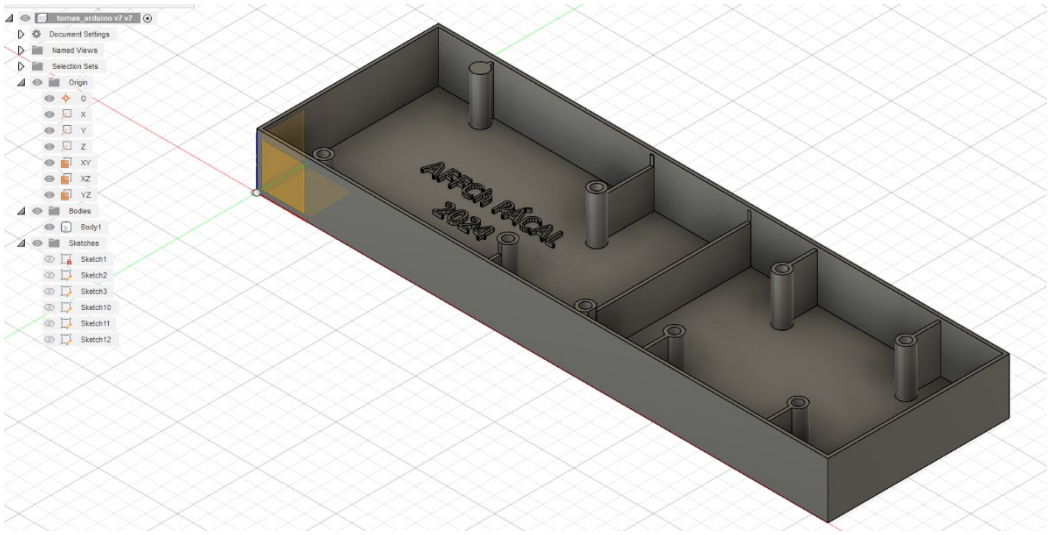
Postupně jsou upraveny rozměry desky plošného spoje a součástky jsou následně rozmístěny na plochu desky. Po rozmístění součástek jsou spojeny cestami, v případě tohoto plošného spoje jsou cesty široké 0,8128 mm. Posledním krokem je umístění montážních otvorů o poloměru 1,5 mm, které jsou pro rozměry desky naprosto dostačující.



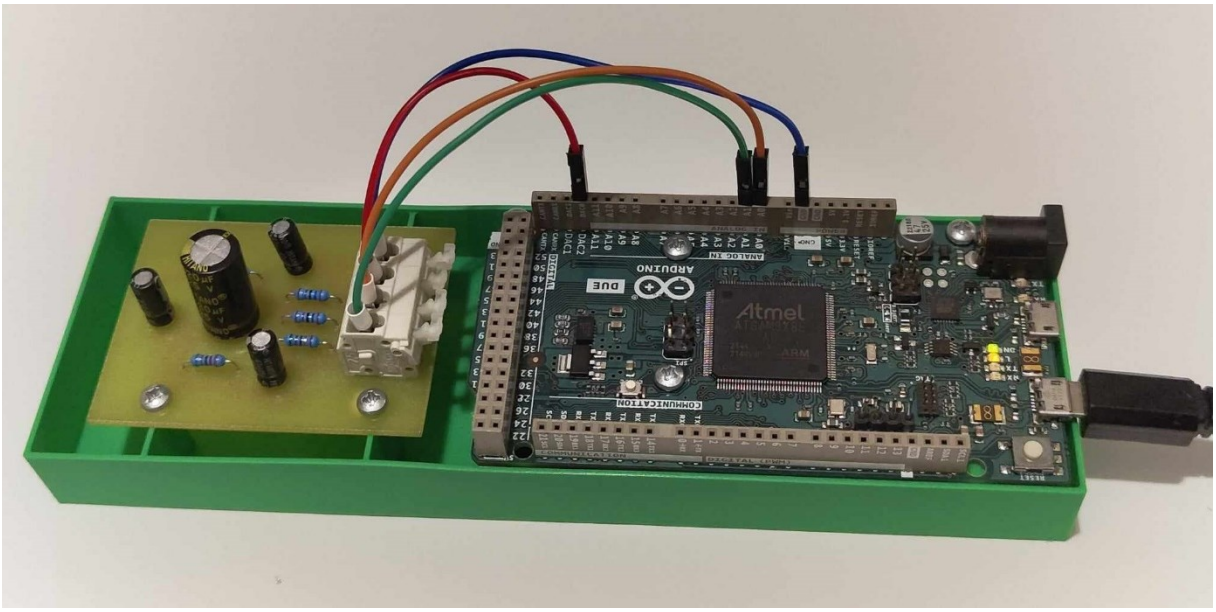
Obrázek 3.4 – Konečný návrh plošného spoje pro RC soustavu

Návrh krytu pro přípravek je zhotoven v softwaru Autodesk Fusion. Kreslení je uskutečněno pomocí geometrických tvarů a jejich vynesením do prostoru funkcí „Extrude“. Výsledný 3D model je na obrázku 3.5.

Obrázek 3.7 - Kryt přípravku



Obrázek 3.6 - 3D návrh krytu přípravku



Obrázek 3.5 – Přípravek pro měření AFFCh

3.1.2 Odvození stavového modelu soustavy

Matematický model soustavy lze odvodit pomocí metody smyčkových proudů. S předpokladem ideálního chování součástek je po aplikaci Kirhoffových zákonů získán lineární dynamický model. Tato metoda získání modelu se nazývá matematicko-fyzikální analýza. Vyjádření stavovým modelem se definují fyzikálně významné stavy.

Napětí na kondenzátorech je označeno $u_1 - u_4$ a proudy, které protékají kondenzátory jsou označeny jako $i_1 - i_4$. Následně s využitím druhého Kirhoffova zákona a vzorců 4.1, pro napětí na kondenzátoru a rezistoru je sestaveno pět základních rovnic.

$$u = \frac{1}{\mathrm{C}} \cdot \int_0^t i \, dt, \tag{2.8a}$$

$$u = \mathrm{R} \cdot i, \tag{2.8b}$$

kde u je napětí,

i je proud,

t je čas,

R je hodnota odporu,

C je hodnota kondenzátoru.

Rovnice pro jednotlivé smyčky vypadají takto,

$$u_0 = R_1 + \frac{1}{C_1} \cdot \int_0^t (i_A - i_B)dt, \tag{2.9a}$$

$$0 = R_2 \cdot (i_B - i_D) + \frac{1}{C_2} \cdot \int_0^t (i_B - i_C)dt + \frac{1}{C_1} \cdot \int_0^t (i_B - i_A)dt, \tag{2.9b}$$

$$0 = R_3 \cdot (i_C - i_D) + \frac{1}{C_3} \cdot \int_0^t (i_C - i_Z)dt + \frac{1}{C_2} \cdot \int_0^t (i_C - i_B)dt, \tag{2.9c}$$

$$0 = R_4 \cdot i_D + \frac{1}{C_4} \cdot \int_0^t i_D dt + R_2 \cdot (i_D - i_B) + R_3 \cdot (i_D - i_C), \tag{2.9d}$$

$$0 = R_Z + \frac{1}{C_3} \cdot \int_0^t (i_Z - i_C)dt, \tag{2.9e}$$

Smyčkové proudy $i_{\mathrm{A\text{-}D}}$ jsou vyjádřeny proudy na kondenzátorech $i_{1\text{-}4}$ a i_Z,

$$i_1 = i_A - i_B, \qquad i_A = i_1 + i_2 + i_3 + i_Z, \tag{2.10a}$$

$$i_2 = i_B - i_C, \qquad i_B = i_2 + i_3 + i_Z, \tag{2.10b}$$

$$i_3 = i_C - i_Z, \qquad i_C = i_3 + i_Z, \tag{2.10c}$$

$$i_4 = i_D, \qquad i_D = i_4, \tag{2.10d}$$

$$i_z = \frac{1}{R_Z} \cdot u_3, \tag{2.10e}$$

kde $i_{A\text{-}D}$ jsou smyčkové proudy,

$i_{1\text{-}4}$ i_Z jsou proudy na součástkách.

Přímočarým vyloučením proudů z rovnic 4.4 je získán standartní stavový model. Výsledný stavový model vypadá následovně,

$$\frac{d\boldsymbol{u}}{dt} = \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{u} + \boldsymbol{B} \times u_0, \tag{2.11a}$$

$$u_3 = \boldsymbol{C} \times \boldsymbol{u}, \tag{2.11b}$$

kde $\boldsymbol{A}$ je matice systému,

$\boldsymbol{u}$ je stavový vektor,

$\boldsymbol{B}$ je matice řízení,

u_0 je vstupní napětí,

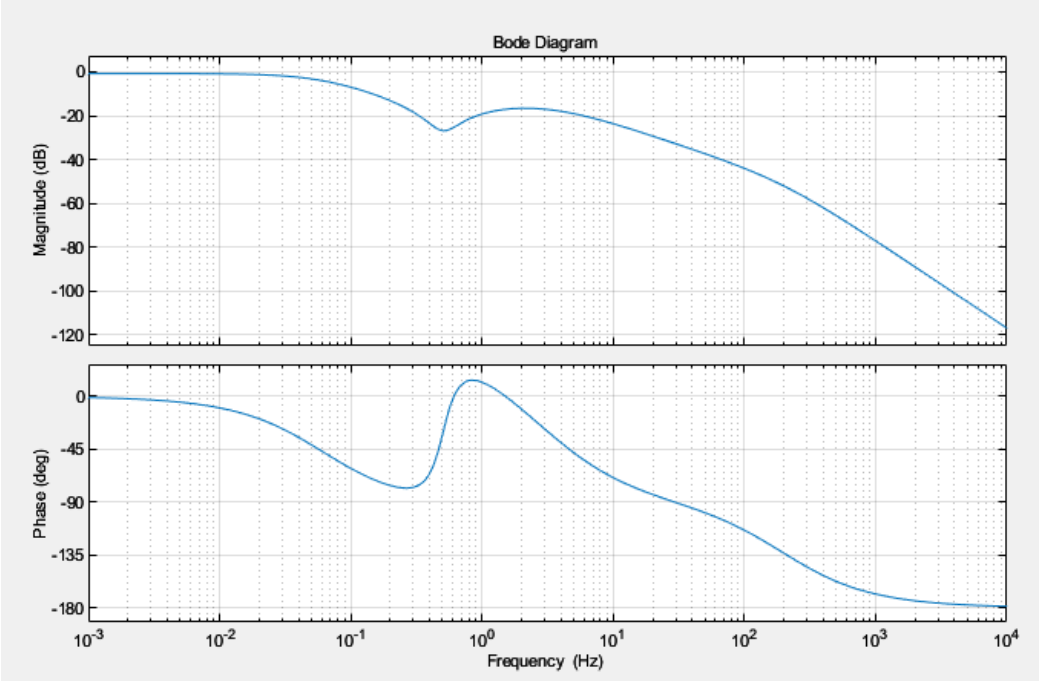
u_3 je výstupní napětí,

$\boldsymbol{C}$ je matice závislosti stavu na výstupu.

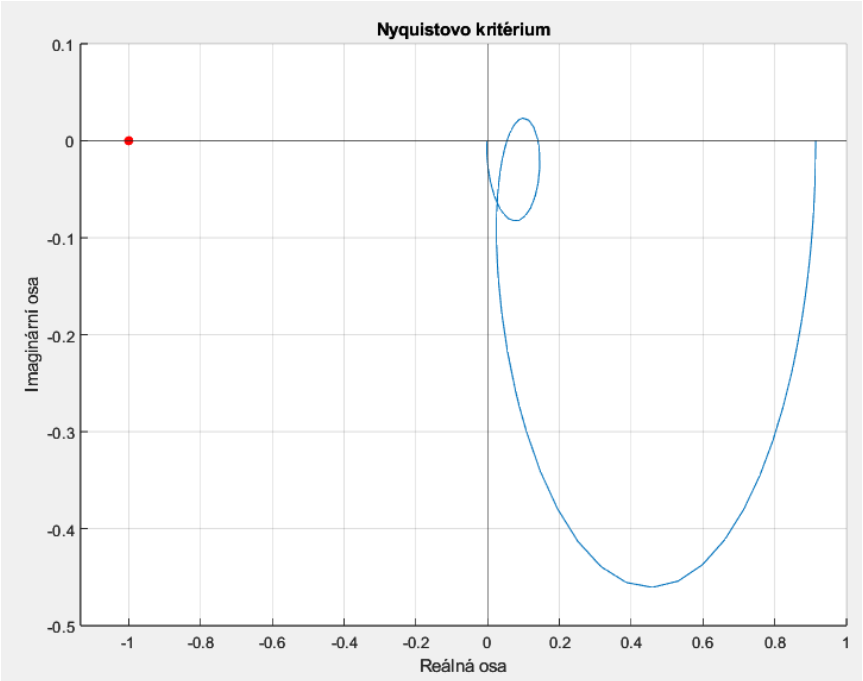
Získáním stavového modelu se nabízí možnost simulace v prostředí MATLAB. Ve skriptu v prostředí MATLAB je zadána soustava a pomocí funkce `G = ss(A,B,C,0)` se do proměnné G nahraje struktura stavového popisu. Voláním funkcí `bode(G)` a `nyquist(G)`, MATLAB vytvoří Bodeův a Nyquistův diagram. (Jelínek, 2023)

3.1.3 Vypočtené grafy frekvenční charakteristiky

Získáním stavového modelu se nabízí možnost simulace v prostředí MATLAB. Ve skriptu v prostředí MATLAB je zadána soustava a pomocí funkce `G = ss(A,B,C,0)` se do proměnné G nahraje struktura stavového popisu. Voláním funkcí `bode(G)` a `nyquist(G)`, MATLAB vytvoří Bodeův a Nyquistův diagram.



Obrázek 3.9 – Vypočtený Bodeův diagram měřené soustavy



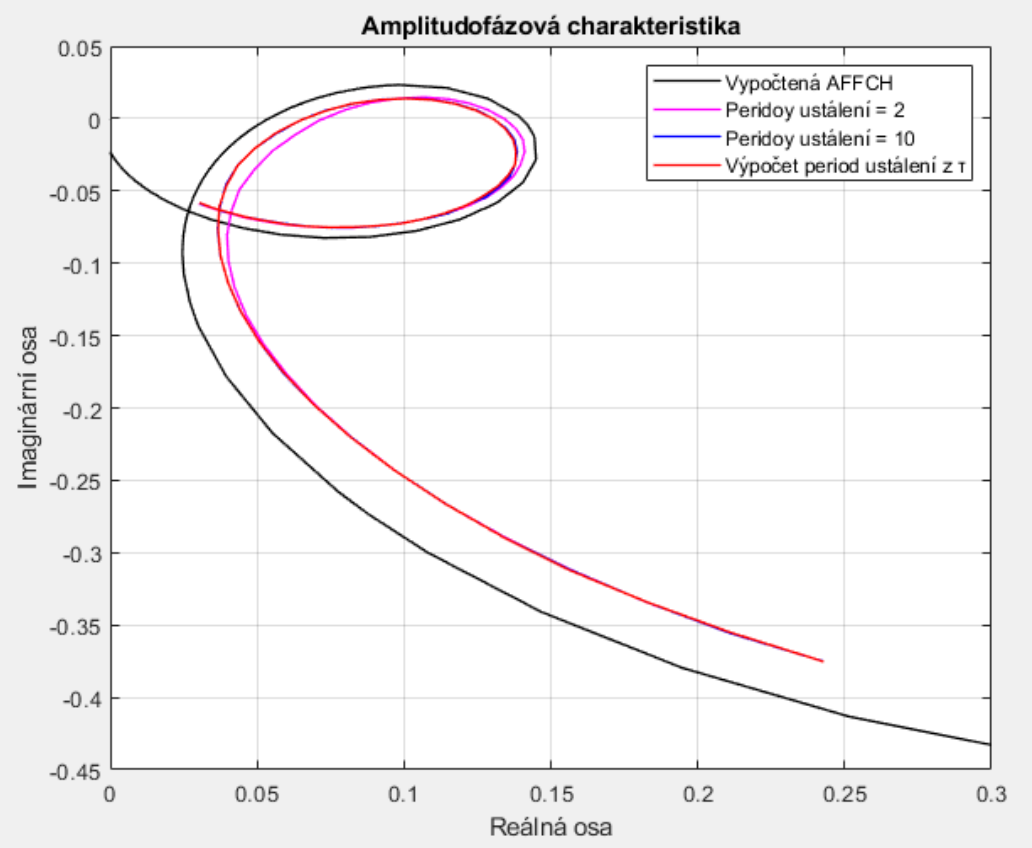
Obrázek 3.8 – Vypočtený Nyquistův diagram měřené

3.2 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

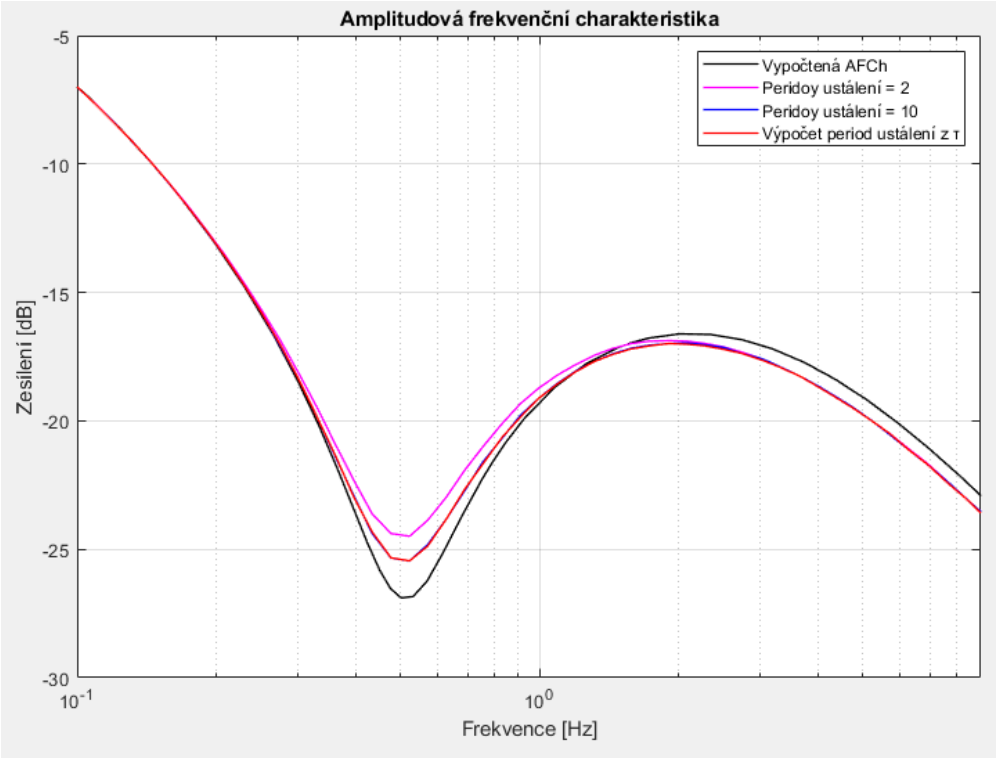
Experiment probíhá ve frekvencích do 10 Hz. Rozsah hodnot D/A převodníku jsou v dokumentaci od 0,55 V do 2,55 V. Při výstupním signálu je zjištěno s pomocí maxima a minima sinusoidy. Po převodu hodnot z A/D převodníku je získán rozsah 0,5462 V do 2,7417 V. Skutečný rozsah je tedy menší o 0,2 %.

3.2.1 Vyhodnocení experimentu

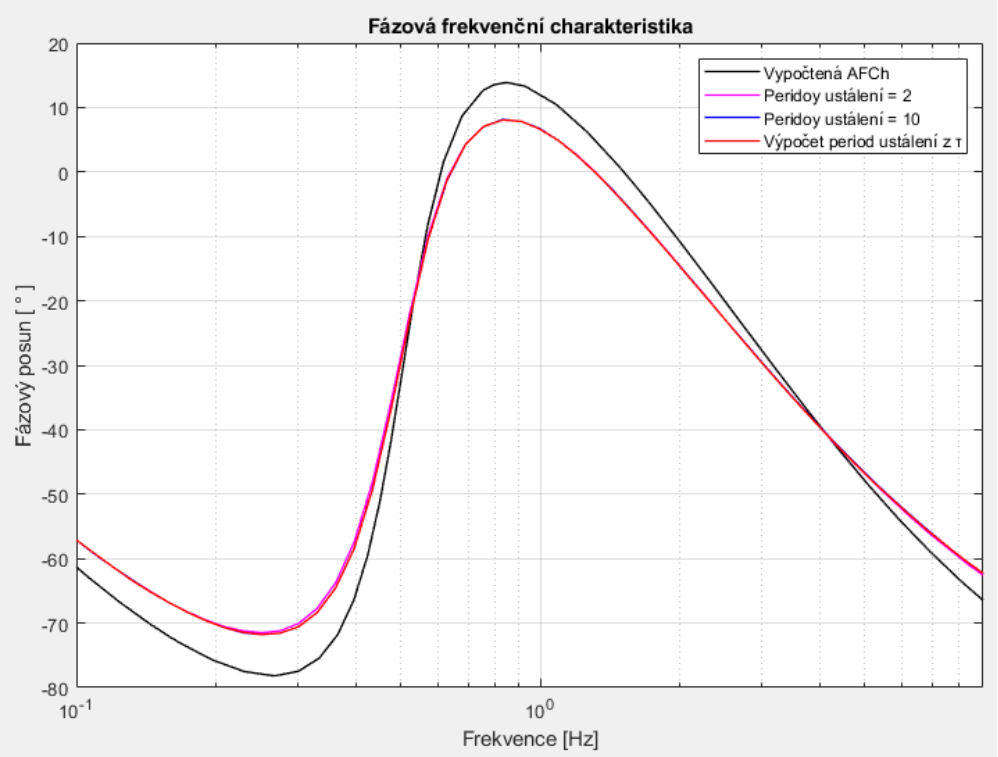
Pro vyhodnocení je změřena frekvenční charakteristika v oblasti od 0.1 Hz do 9 Hz. Je proveden experiment s proměnným parametrem periody ustálení. V prvních dvou experimentech jsou periody ustálení konstantní a ve třetím je perioda ustálení vypočítána z časové konstanty soustavy. Výsledné grafy jsou porovnány s výpočtem ze stavového modelu.



Obrázek 3.10 – Porovnání amplitudofázových charakteristik experimentů



Obrázek 3.11 – Porovnání amplitudových charakteristik experimentů



Obrázek 3.11 – Porovnání fázových charakteristik experimentů

ZÁVĚR

V této práci je popsáno řešení automatického měření frekvenční charakteristiky. Pro získání měřených průběhů je využita vývojová deska Arduino Due. Experimenty jsou prováděny na RC soustavě. Cílem práce byl návrh aplikace pro měření automatického měření frekvenční charakteristiky s libovolnou soustavou.

V teoretické části je přiblížena problematika regulační soustavy. Dále jsou definovány frekvenční charakteristiky a analýza soustavy pro měření těchto charakteristik.

V praktické části jsou řešeny pojmy a definovány limity měření a určení hodnot charakteristik. Jsou uvedeny specifikace vývojové desky. Je zde popsán princip měření frekvenční charakteristiky a návrh programu pro Arduino Due. Stejným způsobem je popsán princip pro zautomatizování měření v aplikaci řešenou MATLAB App Designerem.

Experimentální část obsahuje podrobný popis měřené soustavy. Je zde uveden postup na zhotovení plošného spoje a návrh 3D modelu ke zhotovení krytu 3D tiskárnou. Dále je odvozen model soustavy pomocí Kirhoffových zákonů. Nakonec jsou získané průběhy frekvenční charakteristiky z experimentů porovnány s vypočteným průběhem frekvenční charakteristiky z ideálního modelu.

LITERATURA

BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení. 2*., přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004, 663 s. ISBN 80-730-0148-9.

DUSEK, Frantisek, Daniel HONC a Michal MRAZEK. *RCDue – Laboratory System for Teaching Automation and Control – concept of the system*. In: 2021 23rd International Conference on Process Control (PC) [online]. IEEE, 2021, 2021-6-1, s. 249-254 [cit. 2023-09-08]. ISBN 978-1-6654-0330-6. Dostupné z: doi:10.1109/PC52310.2021.9447492

Dokumentace MATLAB. The MathWorks, Inc. MATLAB The Language of Technical Computing [online]. 2021 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html

Arduino - Home [online]. (c)2021 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/

Arduino - ArduinoDue. Arduino - Home [online]. (c)2021 [cit. 2021-10-20]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue

CVEJN J. 2007. *Řízení procesů*. [on line] Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Dostupné z: http://matlab.fei.tuke.sk/ons/doc/Cvejn_rizeni_procesu.pdf

ŠVARC, I. 2003 *TEORIE AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ*. [online] Dostupné z: https://www.fsiforum.cz/upload/soubory/knihy/Automatizace/Teorie.automatickeho.rizeni_Svarc_2003.pdf

HOLČÍK, Jiří, KOMENDA, Martin. *Matematická biologie: e-learningová učebnice* [online]. 1. vydání. Brno: Masarykova univerzita, 2015. ISBN 978-80-210-8095-9. https://portal.matematickabiologie.cz/

VORÁČEK, Rudolf. Automatizace a automatizační technika. II, Automatické řízení. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0796-5.

JELÍNEK, Josef. 2023. *Experimentální identifikace diskrétního stavového modelu*. Pardubice: Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. 58 s.

PŘÍLOHY

A-CD

Příloha A

Příloha k diplomové práci

AUTOMATICKÉ MĚŘENÍ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY

Bc. Tomáš Pácal

CD

Obsah

1 Text diplomové práce ve formátu PDF

2 Úplné zdrojové kódy pro Arduino Due

3 Úplné zdrojové kódy pro aplikaci v MATLAB App Designer

4 Aplikace pro měření frekvenční charakteristiky

5 Soubory pro vytvoření plošného spoje pro aplikaci EAGLE

6 3D model krytu přípravku aplikaci FUSIONs