

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

NÁVRH A REALIZACE PRŮMYSLOVÉHO REGULÁTORU

Michal Valášek

Bakalářská práce

2023

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michal Valášek**
Osobní číslo: **I20047**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **Návrh a realizace průmyslového regulátoru**
Zadávací katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a realizace průmyslového regulátoru vhodného pro regulaci teploty, tlaku, hladiny a dalších procesních veličin. Činnost procesního regulátoru bude řízena vybraným typem jednočipového mikropočítače. Procesní regulátor bude umožňovat připojení základních vstupů (univerzální analogový vstup procesní veličiny, vstup externí žádané veličiny, ...) a základních výstupů pro možnosti realizace dvoustavových, třístavových a spojitých regulačních algoritmů. V teoretické části student provede detailní popis funkcí standardních procesních regulátorů. Praktická část se bude zabývat samotným návrhem vlastního procesního regulátoru včetně popisu jeho realizace. V práci budou popsány jednotlivé komponenty a jejich propojení nutné pro správnou funkci regulátoru. Dále budou popsány samotné regulační algoritmy implementované v regulátoru. V závěru práce bude zhodnoceno výsledné řešení. Součástí práce bude kompletní výrobní dokumentace, včetně kompletních zdrojových kódů realizovaného software a přehledně zpracovaného uživatelského návodu.

Rozsah pracovní zprávy: **cca 40 stran**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Bučovice: Martin Stříž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-800-1030-073.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dominik Štursa**
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **16. prosince 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **12. května 2023**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

LS.

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

V Pardubicích dne 9. ledna 2023

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem práci s názvem Návrh a realizace průmyslového regulátoru 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 9. 5. 2023

Michal Valášek v.r.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Dominiku Štursovi za cenné rady a odbornou pomoc, kterých si nesmírně vážím. Dále bych rád poděkoval rodině a přítelkyni za léta podpory při studiu. V neposlední řadě bych také rád poděkoval všem mým spolužákům, především Daliboru Fickovi, za příjemně strávené roky studia.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací průmyslového regulátoru. Práce obsahuje teoretický popis regulátorů a jejich funkcí a zabývá se konstrukčním a algoritmickým řešením průmyslového regulátoru za použití vývojového kitu Arduino Uno.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulace, PID, Arduino, regulační obvod, PWM

TITLE

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN INDUSTRIAL CONTROLLER

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with the design and implementation of an industrial controller. The thesis contains a theoretical description of the controllers and their functions and deals with the design and algorithmic solution of the industrial controller using the Arduino Uno development kit.

KEYWORDS

Regulation, PID, Arduino, control circuit, PWM

OBSAH

Seznam ilustrací a tabulek.....	9
Seznam zkratk	10
Úvod.....	11
1 Regulační obvod.....	12
1.1 Řízení.....	12
1.1.1 Regulace.....	13
1.1.2 Ovládání	14
2 Rozdělení průmyslových regulátorů.....	15
2.1 Rozdělení podle technické realizace.....	15
2.1.1 Mechanické regulátory.....	15
2.1.2 Hydraulické regulátory.....	15
2.1.3 Pneumatické regulátory.....	16
2.1.4 Elektrické regulátory.....	16
2.2 Rozdělení podle potřeby pomocné energie.....	16
2.2.1 Aktivní regulátory	16
2.2.2 Pasivní regulátory.....	17
2.3 Rozdělení podle přenášeného signálu.....	17
2.3.1 Analogové regulátory.....	17
2.3.2 Diskrétní regulátory	17
3 PID regulátor	18
3.1 Spojitý P regulátor	18
3.2 Spojitý I regulátor	18
3.3 Spojitý D regulátor.....	19
3.4 Složené spojité regulátory.....	20
3.4.1 Spojitý PI regulátor	20
3.4.2 Spojitý PD regulátor.....	21

3.4.3	Spojité PID regulátor	21
3.5	Diskrétní PID regulátor	22
4	Základní metody nastavení PID regulátorů	24
4.1	Výpočet parametrů regulátoru pomocí metody Zieglera a Nicholse	24
4.2	Nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení	25
4.3	Nastavení parametrů pomocí metody ručního nastavení	26
5	REALIZACE PRŮMYSLOVÉHO REGULÁTORU	27
5.1	Arduino UNO	27
5.2	Spínací prvky	28
5.2.1	Tlačítka	28
5.2.2	Tranzistory	29
5.2.3	Relé	30
5.3	Displej	31
5.4	LM2596S modul	32
5.5	Komunikace Arduina s počítačem	33
5.6	Chování programu	34
5.7	Regulace	35
5.8	Generování a popis signálu PWM	38
5.9	Schéma zapojení a popis funkce regulátoru	39
5.9.1	Analogový vstup	40
5.9.2	Výstupy regulátoru	41
	ZÁVĚR	42
	Bibliografie	44
	Seznam příloh	46

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - Blokové schéma regulačního obvodu (Vypracované okruhy – Automatizace)....	12
Obrázek 2 - Blokové schéma regulace (Vypracované okruhy – Automatizace).....	13
Obrázek 3 - Blokové schéma ovládání (Vypracované okruhy – Automatizace).....	14
Obrázek 4 - Bloková schémata složených regulátorů (Složené spojitě regulátory)	20
Obrázek 5: Arduino UNO (foto autor)	28
Obrázek 6 - Tlačítko DS-612 (foto autor)	29
Obrázek 7 - XY-MOS modul se spínačem MOSFET (foto autor).....	30
Obrázek 8 - Dvoukanálový relé modul SRD-12VDC-SL-C (foto autor).....	30
Obrázek 9 - SPI OLED displej (foto dratek.cz).....	32
Obrázek 10 - Modul LM2596S (foto laskakit.cz).....	33
Obrázek 11 - Algoritmus chování programu	35
Obrázek 12 - Algoritmus PID regulace	37
Obrázek 13 - Schéma napájení	40
Obrázek 14 - Schéma logického obvodu	40
Tabulka 1 - Metoda kritického zesílení Ziegler-Nichols	25
Tabulka 2 - Metoda vyváženého nastavení (Navrátil, 2007).....	25

SEZNAM ZKRATEK

EEPROM	elektronicky vymazatelná paměť pouze pro čtení (electrically erasable programmable read-only memory)
JFET	polem řízený tranzistor s přechodovým hradlem (junction gate field-effect transistor)
MOSFET	polovodičový tranzistor na bázi oxidu kovů (metal oxide semiconductor field effect transistor)
OCR	výstupní srovnávací registr (output compare register)
PID	proporčně integračně derivační
PLC	programovatelný logický automat (programmable logic controller)
PSD	proporčně sumačně integrační
PWM	pulzně šířková modulace (pulse width modulation)
SPDT	jeden přepínací kontakt (single point, double throw)
SRAM	statická paměť (static random access memor)
UART	univerzální asynchronní přijímač-vysílač (universal asynchronous receiver-transmitter)
USB	univerzální sériová sběrnice (universal serial bus)

ÚVOD

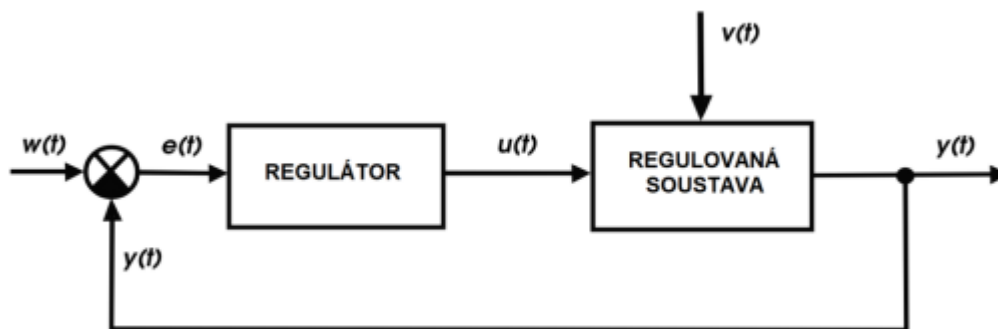
V dnešní době jsou regulátory použity téměř všude. Ať už jde o využití v průmyslu, například v automobilovém, kde slouží k řízení rychlosti motorů a emisí nebo v chemickém, kde se využívají k řízení teploty a tlaku pro výrobu chemikálií, ale regulátory mohou být aplikovány i v domácnostech, například v podobě termostatů nebo regulátorů vodního tlaku pro vodní zavlažování.

První část této práce se zabývá rozdělením regulátorů, jejich využitím, funkcemi a principy. Dochází zde také k rozdělení průmyslově využitých PID regulátorů.

Druhá část se zabývá návrhem a konstrukcí PID regulátoru s analogovým vstupem a třemi druhy regulace. Jádrem všech výpočtů je vývojový kit Arduino Uno, jehož kód je popsán. Dále se blíže popisuje kód pro regulaci a generování PWM signálu. Součástí této části je také detailní popis všech použitých součástek. V neposlední řadě je zmíněno schéma zapojení, které je poměrně jednoduché díky převážnému použití modulů a návod na použití regulátoru s vysvětlivkami.

1 REGULAČNÍ OBVOD

Regulační obvod je klíčovou součástí automatizačního systému a slouží k řízení průmyslového procesu. Jeho hlavním úkolem je udržovat požadovanou hodnotu nějaké fyzikální veličiny, jako například teploty, tlaku nebo průtoku, na konstantní úrovni nebo v určitém rozmezí. Regulační obvod sestává z několika základních prvků, z nichž každý plní specifickou roli (obrázek č. 1).



Obrázek 1 - Blokové schéma regulačního obvodu (Vypracované okruhy – Automatizace)

Do regulátoru vstupuje žádaná hodnota $w(t)$ a přes zpětnou vazbu regulovaná veličina $y(t)$. Pokud je rozdíl mezi výstupem a žádanou hodnotou, vznikne regulační odchylka $e(t)$, která se dá vyjádřit jako $e(t) = w(t) - y(t)$, tedy rozdíl žádané hodnoty a regulované veličiny. Regulační odchylka tedy bude nenulová, pokud na regulovanou soustavu působí nežádoucí vliv, který způsobí neočekávanou změnu funkce reulované soustavy, tyto vlivy nazýváme poruchové veličiny $v(t)$. Odchýlení mezi žádanou hodnotou a aktuálním stavem regulované soustavy (výstup regulátoru) je akční veličina $u(t)$. Akční veličina slouží k redukci odchýlení regulované soustavy od požadovaného stavu. (Šulc a Vítečková, 2004)

1.1 Řízení

Řízení v automatizaci je proces, kdy se pomocí řídicích prvků a regulačních obvodů řídí chování systému nebo procesu tak, aby byly dosaženy požadované výsledky. V automatizaci se používá řada různých typů řízení, včetně otevřeného řízení, uzavřeného řízení a adaptivního řízení. (Astrom, K.J.; Haggglund, T., 1995)

Otevřené řízení se používá v situacích, kdy je požadováno jednorázové nastavení systému nebo procesu a jeho následné spuštění. Řídicí prvky jsou nastaveny na požadovanou hodnotu, ale nejsou kontrolovány a upravovány na základě aktuálního stavu systému.

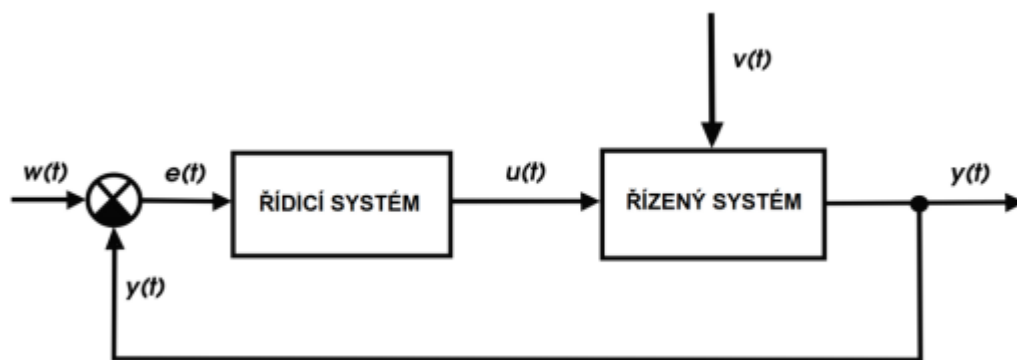
Uzavřené řízení je proces, kdy jsou senzory umístěny v systému nebo procesu, aby mohly být sledovány výstupy a porovnány s požadovanými hodnotami. Pokud jsou senzory detekovány odchylky od požadovaných hodnot, řídicí prvky jsou upraveny tak, aby minimalizovaly odchylku a udržely systém v optimálním stavu.

Adaptivní řízení je pokročilejší typ řízení, který se mění v závislosti na aktuálním stavu systému. Tento typ řízení využívá algoritmy učení a adaptivních systémů, aby se systém mohl přizpůsobit a optimalizovat v reálném čase. (Astrom, K.J.; Haggund, T., 1995)

Všechny tyto metody řízení v automatizaci mají společný cíl, a to optimalizovat chování systému nebo procesu pro dosažení požadovaných výsledků. Díky automatizaci se minimalizují chyby a zvyšuje se efektivita systému. (Vypracované okruhy – Automatizace, 2023; Astrom, K.J.; Haggund, T., 1995)

1.1.1 Regulace

Regulace je proces udržování určité veličiny (např. teploty, tlaku, rychlosti, polohy apod.) na konstantní úrovni. Cílem regulace je minimalizovat chybu mezi požadovanou hodnotou a skutečnou hodnotou veličiny a udržovat ji na požadované úrovni. Regulace se obvykle provádí pomocí regulačního obvodu (obrázek č. 2), který zahrnuje senzor, který měří

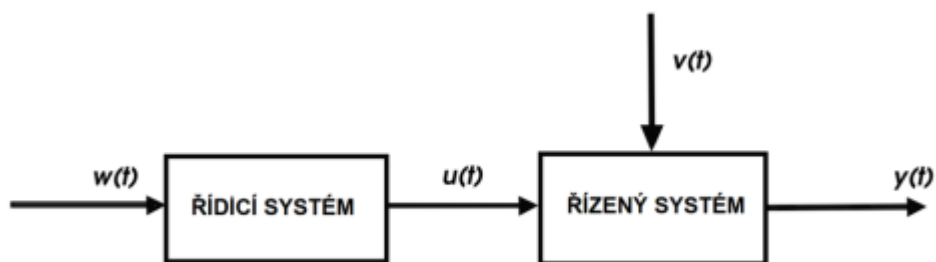


skutečnou hodnotu veličiny, a řídicí algoritmus, který porovnává skutečnou hodnotu se žádanou hodnotou a upravuje výstupní signál tak, aby se minimalizovala chyba. Informaci o regulační odchylce lze získat díky záporné zpětné vazbě. (Tůma, Wagnerová, Farana a Landryová, 2007)

Obrázek 2 - Blokové schéma regulace (Vypracované okruhy – Automatizace)

1.1.2 Ovládání

Ovládání se zabývá přímým řízením systému (obrázek č. 3). Ovládání obvykle zahrnuje příkazy, které řídí stav systému a umožňují mu vykonávat určité operace. Ovládání nevyžaduje porovnání skutečné hodnoty s požadovanou hodnotou a narozdíl od regulace nevyužívá zpětné vazby. Hlavním rozdílem mezi regulací a ovládáním je tedy to, že regulace používá zpětnovazební smyčku k udržování proměnné na konstantní úrovni nebo v určitém rozsahu hodnot, zatímco ovládání se zabývá přímým řízením systému bez zpětné vazby. (Tůma,



Wagnerová, Farana a Landryová, 2007)

Obrázek 5 - Blokové schéma ovládání (Vypracované okruhy – Automatizace)

2 ROZDĚLENÍ PRŮMYSLOVÝCH REGULÁTORŮ

Kvůli různorodosti a způsobu využití se regulátory rozdělují podle různých hledisek. V této kapitole je čerpáno z těchto zdrojů: Astrom, K.J. a Haggund, T, 1995; Kupka, 2023; Regulované soustavy, 2023.

2.1 Rozdělení podle technické realizace

2.1.1 Mechanické regulátory

Mechanické regulátory slouží k udržování určitého parametru (teplota, rychlost, tlak či poloha) na požadované úrovni. Tyto regulátory fungují na základě mechanických principů a využívají se v prostředích, kde jsou elektronické regulátory neefektivní či nepoužitelné.

Mechanické regulátory mohou být velmi jednoduché, jako například termostat používaný k regulaci teploty v domácích topeništích nebo naopak složité, například automatizované systémy pro řízení průmyslových procesů. Všechny mechanické regulátory však mají společnou vlastnost, a to že pracují na základě přímého mechanického působení na ventil, klapku, páku, nebo jiný prvek, který ovládá regulovanou veličinu.

2.1.2 Hydraulické regulátory

Hydraulické generátory regulují tlak, průtok či polohu za využití hydraulických principů. Využívají vlastností kapalin, jako je například nestlačitelnost.

Hydraulické regulátory se často používají v průmyslových aplikacích, jako jsou hydraulické systémy pro řízení a stabilizaci letadel, nebo hydraulické zvedáky a jeřáby v průmyslových prostředích. Jednoduché regulátory najdou uplatnění například jako regulátory tlaku v hydraulickém vedení, ty složitější mohou sloužit automatizovaným systémům, využívajícím složitou síť ventilů a pístů.

Výhodou hydraulických regulátorů je jejich robustnost, odolnost vibracím a extrémním podmínkám, jako jsou vysoké teploty a tlaky.

2.1.3 Pneumatické regulátory

Pneumatické regulátory slouží k regulaci pneumatických systémů a řízení toku plynu, obvykle stlačeného vzduchu. K regulaci toku plynu slouží různé typy ventilů, jako například membránové, magnetické či pákové.

Tyto regulátory lze využít v mnoha průmyslových aplikacích, jako jsou výrobní linky, robotické systémy nebo automatizované stroje. Další využití je v zařízeních určených pro zdravotnictví, chemickém průmyslu a měřicích a kontrolních přístrojích. Pneumatické regulátory jsou velmi spolehlivé, rychlé a přesné. Vzhledem k tomu, že pneumatické regulátory používají stlačený vzduch jako zdroj energie, jsou na chod ekomonicky výhodné a snadno se instalují a udržují.

2.1.4 Elektrické regulátory

Elektrické regulátory jsou zařízení, která slouží k regulaci různých parametrů v elektrických a elektronických systémech. Dělí se dále na analogové a digitální. Tyto regulátory jsou obvykle navrženy tak, aby pracovaly s napětím, proudem nebo výkonem. Existuje více druhů elektrických regulátorů, například napěťové, frekvenční, výkonové, PWM, teplotní apod.

Výhodou takových regulátorů je jednoduchost konstrukce, cena, rozměry a u analogových náročnost na energii. Velkou nevýhodou je v případě analogových citlivost na rušení z vnějších zdrojů, jako jsou elektromagnetické záření a šumy v napájení. Digitální jsou obecně dražší a složitější.

2.2 Rozdělení podle potřeby pomocné energie

Pomocná energie je energie, která je potřebná k provozu regulátoru. Regulátor může potřebovat pomocnou energii pro různé účely, například pro napájení elektronických obvodů, pohon ventilů nebo motorků, pro generování signálů nebo pro jiné činnosti.

2.2.1 Aktivní regulátory

U aktivních regulátorů je pomocná energie obvykle zajištěna zdrojem napájení, který dodává potřebné napětí a proud pro provoz regulátoru. Například PID regulátor potřebuje napájení pro napájení vnitřních obvodů, jako jsou zesilovače a procesory, které vypočítávají výstupní signál na základě vstupního signálu.

2.2.2 Pasivní regulátory

U pasivních regulátorů může pomocná energie pocházet z různých zdrojů, v závislosti na typu regulátoru. Například termostaty mohou využívat tepelnou energii k regulaci teploty, kde je změna teploty přeměněna na mechanickou energii pomocí tepelné roztažnosti materiálů. Regulátory tlaku mohou využívat hydraulickou nebo pneumatickou energii pro svou činnost.

2.3 Rozdělení podle přenášeného signálu

Signál je jakákoliv fyzikální veličina, kterou je třeba regulovat, a jejíž hodnota se mění v průběhu času nebo v reakci na jiné vstupní podněty.

2.3.1 Analogové regulátory

Analogové regulátory pracují s kontinuálními signály, které mají spojitou hodnotu v daném rozsahu a jsou obvykle vyjádřeny jako napětí nebo proud. Analogové regulátory mohou být použity pro regulaci procesů s různými veličinami, jako jsou teplota, tlak, otáčky, světlo a další. Analogové regulátory jsou poměrně jednoduché na použití, mají rychlou odezvu a jsou běžně používány v průmyslových aplikacích.

2.3.2 Diskrétní regulátory

Digitální regulátory pracují s digitálními signály, které mají pouze určité diskrétní hodnoty. Využívají digitální technologie pro řízení procesů a generování výstupních signálů. Digitální regulátory jsou obvykle vybaveny mikroprocesorem nebo jiným digitálním obvodem, který zpracovává vstupní signály a generuje výstupní signály pro řízení procesu. Digitální regulátory mají větší přesnost, stabilitu a možnost vzdáleného řízení pomocí počítačů a dalších digitálních zařízení.

3 PID REGULÁTOR

Spojité PID regulátor je jeden z nejrozšířenějších typů průmyslových regulátorů, který se používá v mnoha aplikacích. Jeho název je zkratka pro Proporcional-Integral-Derivative (proporcionálně integračně diferencní), což jsou tři základní složky tohoto regulátoru.

3.1 Spojitý P regulátor

Spojité P regulátor je základním prvkem průmyslové regulace, který slouží ke stabilizaci procesu. Jedná se o lineární regulátor s jedním vstupem a jedním výstupem, kde výstupní signál je přímo úměrný vstupnímu signálu. Písmeno "P" označuje proporcionalitu (poměrnost/přiměřenost) mezi vstupem a výstupem.

P regulátor pracuje tak, že srovnává skutečnou hodnotu výstupu s požadovanou hodnotou a vyhodnocuje rozdíl mezi nimi. Tento rozdíl je nazýván chybou. Poté se koriguje výstupní signál tak, aby byla chyba minimalizována. To se provádí násobením chyby konstantou r_0 , která se nazývá koeficient zesílení. (Tůma, Wagnerová, Farana a Landryová, 2007)

Tento regulátor se popisuje vztahem 3.1.

$$u(t) = r_0 e(t), \quad (3.1)$$

kde r je zesílení.

3.2 Spojitý I regulátor

Samostatný I regulátor (také nazývaný integrátor či integrační regulátor) je typ regulátoru, který se používá k řízení dynamických systémů. Jde o druhou ze základních složek PID regulátoru, která integruje chybu v čase a vytváří výstup, který je úměrný celkové integraci chyby.

Samostatný I regulátor lze použít k odstranění trvalé chyby v řízeném systému. Pokud má řízený systém trvalou chybu, znamená to, že výstup systému se nikdy nedostane na požadovanou hodnotu, i když je chyba mezi požadovanou a skutečnou hodnotou nulová. Zároveň prodlužuje regulační děj.

I regulátor může být náchylný na integrální efekt, což znamená, že pokud integrujeme chybu, která se mění v čase, může být výsledek nežádoucí. Například pokud se řízený systém setká s rušením, může samostatný I regulátor přenášet rušení do výstupu. (Tůma, Wagnerová, Farana, Landryová, 2007)

Integrační regulátor lze popsat vztahem 3.2

$$u(t) = r_{-1} \int e(t) dt, \quad (3.2)$$

případně vztahem 3.3

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int e(t) dt, \quad (3.3)$$

kde T_I je integrační časová konstanta.

3.3 Spojitý D regulátor

Spojitý D regulátor (jinak taky derivační regulátor) je posledním ze základních typů regulátorů používaných v průmyslové automatizaci. Jeho úkolem je upravovat výstupní signál tak, aby minimalizoval chybu systému a zajistil jeho stabilní chování.

Principem tohoto regulátoru je, že výstupní signál závisí na změně vstupního signálu v čase. Konkrétně se jedná o změnu rychlosti růstu vstupního signálu. Regulátor sleduje rychlost změny vstupu a upravuje výstupní signál tak, aby minimalizoval vliv této změny na výstup systému. Jinými slovy umožňuje zpětné vazbě reagovat s předstihem, nicméně samostatný D regulátor nejde realizovat, protože je vstupním signálem derivace regulační odchylky, ne její velikost. (Tůma, Wagnerová, Farana, Landryová, 2007; Stefan F. Grabe a spol.)

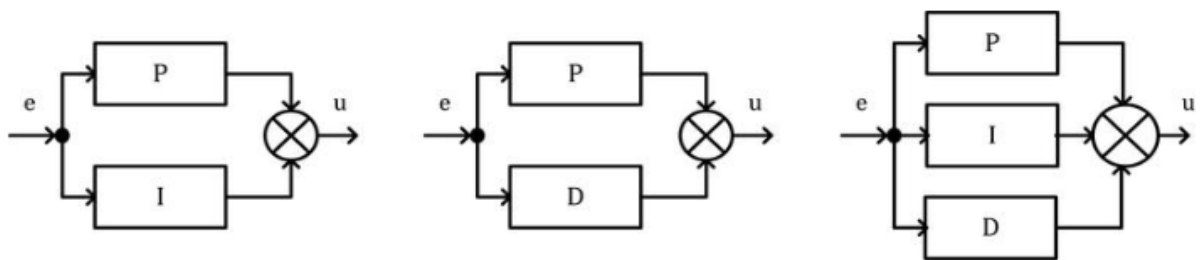
Derivační regulátor lze popsat vztahem 3.4

$$u(t) = r_1 \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.4)$$

případně vztahem 3.5

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.5)$$

kde T_D je derivační časová konstanta.



Obrázek 8 - Bloková schémata složených regulátorů (Složené spojitě regulátory)

3.4 Složené spojitě regulátory

Složené spojitě regulátory jsou regulátory, které kombinují v sobě různé typy regulátorů pro dosažení lepších výkonů v určitých aplikacích. Při použití kombinovaných regulátorů se může dosáhnout rychlejší odezvy, lepší stability a větší přesnosti regulace. Tyto regulátory jsou často používány v průmyslových aplikacích, kde je potřeba regulovat velké množství procesů.

3.4.1 Spojitý PI regulátor

PI (proporcionálně integrační) regulátor je typ regulátoru, který kombinuje P a I zásah. Jeho účelem je minimalizovat chybu výstupu tím, že řídí akční člen (např. ventil, motor) na základě měřené chyby a integrovaného průběhu této chyby v čase. Je to nejčastěji používaná kombinace pro pomaleji probíhající regulační pochody.

Proporcionální zásah určuje výstupní hodnotu regulátoru na základě aktuální chyby. Čím větší chyba, tím vyšší výstupní hodnota. Tato akce pomáhá minimalizovat chybu v průběhu času.

Integrační zásah integruje chybový signál v čase, což umožňuje regulátoru reagovat na systematické chyby. Tato akce může být užitečná v situacích, kdy se chyba postupně zvyšuje nebo kdy se chyba nemůže vyrovnat pouze pomocí zásahu P složky.

PI regulátory jsou často používány v průmyslové automatizaci pro řízení teploty, tlaku, průtoku a dalších procesních proměnných. Jejich nastavení může být kritické pro dosažení stabilního a spolehlivého řízení.

Chování spojitěho PI regulátoru lze popsat vztahem 3.6

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt, \quad (3.6)$$

případně vztahem 3.7

$$u(t) = r_0 e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt. \quad (3.7)$$

3.4.2 Spojitý PD regulátor

PD (proporcionálně derivační) regulátor využívá změny rychlosti změny chyby mezi měřenou hodnotou a požadovanou hodnotou pro výpočet výstupního signálu pro aktuátory nebo jiné řídicí prvky. Výstupní signál PD regulátoru je úměrný rychlosti změny chyby, což znamená, že pokud je chyba významnější, výstupní signál bude vyšší.

PD regulátory jsou obvykle využívány pro řízení procesů, kde rychlost změny je kritickým faktorem, jako například pro řízení rychlosti motoru, vedení polohy nebo teploty. PD regulátor umožňuje rychlou reakci na změny v procesu a minimalizaci překmitů.

PD regulátor má však také své nevýhody, jako například citlivost na šum, který může vést k oscilacím a zhoršení výkonu. Navíc PD regulátor nemá integrační člen, což může vést k přetrvávající chybě v dlouhodobém horizontu.

Chování spojitého PD regulátoru lze popsat vztahem 3.8

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.8)$$

případně vztahem 3.9

$$u(t) = r_0 e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt}. \quad (3.9)$$

3.4.3 Spojitý PID regulátor

Spojité PID regulátor kombinuje výhody P, I a D regulátorů. Jedná se o nejrozšířenější typ regulátoru v průmyslu. PID regulátor umožňuje rychlé a přesné řízení systémů s různými dynamickými charakteristikami.

PID regulátor využívá kombinace tří vstupů: současné chyby (P), integrované chyby (I) a diferenciální změny chyby (D). Při použití PID regulátoru se snažíme minimalizovat rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou proměnné, kterou regulujeme, tedy tzv. chybu.

Při použití P regulátoru se mění akční zásah v závislosti na velikosti chyby, I regulátor integruje chybu v čase a D regulátor se snaží předvídat budoucí změny chyby. PID regulátor využívá kombinaci těchto tří vstupů k zajištění stabilního a přesného řízení systému.

Nastavení parametrů PID regulátoru může být složité a závisí na konkrétní aplikaci. (Spojité regulátory, 2023; Kmínek, 2023)

Chování spojitého PID regulátoru lze popsat jako součet jednotlivých složek P, I a D, tedy vztahem 3.9

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt + r_1 \frac{de(t)}{d(t)}, \quad (3.9)$$

případně vztahem 3.10

$$u(t) = r_0 e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{d(t)}. \quad (3.10)$$

3.5 Diskrétní PID regulátor

Diskrétní PID regulátor, také nazývaný jako diskrétní PI regulátor nebo PSD regulátor, je regulátor, který se skládá z proporcionální, integrační a diferenční složky. Oproti klasickému PID regulátoru, který má integrační složku, je u diskrétního PID regulátoru použita namísto integrační složky složka sumační.

Sumační složka ukládá a sčítá odchylky všech předchozích vzorků, což umožňuje diskrétnímu PID regulátoru reagovat na dlouhodobé odchylky a zlepšit tím celkovou přesnost řízení. K převodu PID regulátoru do diskrétního tvaru se využívá lichoběžníková metoda numerické integrace. (Ščevík, 2023; Balátě, 2003)

Diskrétní PID regulátor lze popsat matematicky následujícím vzorcem (3.11):

$$u(k) = r_0 \left\{ e(k) + \frac{\Delta}{T_I} \left[\frac{e(0) + e(k-1)}{2} + \sum_{j=1}^{k-1} e(j) \right] + \frac{T_D}{\Delta} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (3.11)$$

kde Δ je perioda vzorkování.

Vztah 3.11 je takzvaný polohový tvar PSD regulátoru. Velkou nevýhodou polohového tvaru je obsažení sumy všech předcházejících odchylek. Je tedy výhodnější psát PSD regulátor ve tvaru přírůstkovém s posunutím o jeden interval vzorkování (3.12):

$$u(k-1) = r_0 \left\{ e(k-1) + \frac{\Delta}{T_I} \left[\frac{e(0) + e(k-1)}{2} + \sum_{j=1}^{k-1} e(j) \right] + \frac{T_D}{\Delta} [e(k-1) - e(k-2)] \right\} \quad (3.12)$$

Po odečtení těchto dvou rovnic dostaneme rovnici 3.13

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k-1) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2). \quad (3.13)$$

kde q_0, q_1 , a q_2 jsou parametry rovnice.

Výpočet parametrů q_0, q_1, q_2 provedeme vztahy 3.14, 3.15 a 3.16

$$q_0 = r_0 \left(1 + \frac{\Delta}{2T_I} + \frac{T_D}{\Delta} \right) \quad (3.14)$$

$$q_1 = -r_0 \left(1 - \frac{\Delta}{2T_I} + \frac{2T_D}{\Delta} \right) \quad (3.15)$$

$$q_2 = r_0 \frac{T_D}{\Delta} \quad (3.16)$$

Diskrétní PID regulátor může být nastaven stejnými metodami jako analogový PID regulátor, o těchto metodách bude zmínka v následující kapitole.

4 ZÁKLADNÍ METODY NASTAVENÍ PID REGULÁTORŮ

Metody nastavení PID regulátorů slouží k určení optimálních hodnot parametrů (tj. proporčního zesílení, integrálního a diferenciálního členu) PID regulátoru, aby byla dosažena co nejlepší regulace dané veličiny.

Optimální nastavení PID regulátoru závisí na vlastnostech řízeného systému a na požadované odezvě. Pokud jsou parametry regulátoru nastaveny příliš nízko, systém bude regulovat pomalu a bude citlivý na rušení. Pokud jsou parametry nastaveny příliš vysoko, systém může být nestabilní a docházet k oscilacím. (Meshram, Kanojiya, 2012)

Metody nastavení PID regulátorů určují optimální hodnoty parametrů na základě experimentálních dat, matematických modelů nebo předpokladů o vlastnostech systému. Použití správné metody nastavení PID regulátoru může zlepšit regulaci systému, snížit náklady na údržbu a zvýšit životnost zařízení. (Meshram, Kanojiya, 2012)

4.1 Výpočet parametrů regulátoru pomocí metody Zieglera a Nicholse

Experimentální metoda Ziegler-Nichols je jednou z metod, které se používají pro nastavení PID regulátorů. Tato metoda se vyznačuje tím, že nevyžaduje znalost matematického modelu řízeného systému a umožňuje rychle určit optimální hodnoty parametrů regulátoru jak analyticky, tak pomocí praktických experimentů.

Metoda Ziegler-Nichols je relativně jednoduchá a rychlá metoda pro nastavení PID regulátorů, avšak její použití může vést k nestabilitě a nevhodné regulaci v některých specifických aplikacích. Proto je důležité vždy zvážit vhodnost použití této metody v závislosti na konkrétní aplikaci a vlastnostech systému.

K využití metody Ziegler-Nichols je třeba zjistit kritické parametry soustavy (parametry, při kterých se soustava dostává na mez stability, jinak také kritický stav), které se dají zjistit z modelu soustavy nebo měřením na reálném objektu. (Meshram, Kanojiya, 2012)

Postup při užití metody Ziegler-Nicholse lze popsat ve třech krocích:

1. Je zapotřebí vyřadit integrační a derivační složku; v regulátoru je třeba tyto hodnoty nastavit jako rovny nule.

2. Postupným zvyšováním zesílení se docílí meze stability (na výstupu netlumené kmity s konstantní amplitudou a periodou), toto zesílení nazýváme kritickým zesílením r_k a periodu kmitů nazýváme kritickou periodou T_k .
3. Z kritického zesílení a kritické periody lze dopočítat hodnoty pro nastavení jednotlivých složek regulátoru (tab. 1).

Regulátor	r_0	T_I	T_D
P	$0,5r_k$	-	-
PI	$0,45r_k$	$0,85T_k$	-
PD	$0,4r_k$	-	$0,05T_k$
PID	$0,6r_k$	$0,5T_k$	$0,125T_k$

Tabulka 1 - Metoda kritického zesílení Ziegler-Nichols

4.2 Nastavení parametrů regulátoru metodou vyváženého nastavení

Metoda vyváženého nastavení (anglicky "balanced tuning") je další z metod pro nastavení PID regulátorů. Tato metoda využívá kompromisu mezi rychlostí odezvy a stabilitou regulace tak, aby se dosáhlo optimálního nastavení parametrů PID regulátoru.

Při použití metody vyváženého nastavení se nejprve určí kritické zesílení a kritická perioda systému pomocí křivky odezvy na skokovou změnu vstupu. Na základě těchto hodnot se určí hodnota proporčního zesílení, která zajišťuje stabilní regulaci systému. Následně se vypočítají optimální hodnoty integrálního a diferenciálního členu PID regulátoru pomocí předem daných vztahů. (Navrátil, 2007)

	k_p	T_I	T_D
PI	$\frac{1}{k} \left[1 - \frac{2\tau}{1 + \sqrt{1 + \tau^2}} \right]$	$\left[\frac{1 + \sqrt{1 + \tau^2}}{1 + \sqrt{1 + \tau^2}} \tau \right] T_{ar}$	-
PID	$\frac{1}{k} \left[1 - \frac{2\tau}{1 + \sqrt{1 + \tau^2}} \right]$	$\left[\frac{1 + \sqrt{1 + \tau^2}}{1 + \sqrt{1 + \tau^2}} \tau \right] T_{ar}$	$\leq \frac{T_I}{4}$

Tabulka 2 - Metoda vyváženého nastavení (Navrátil, 2007)

4.3 Nastavení parametrů pomocí metody ručního nastavení

Metoda ručního nastavení (též nazývána jako metoda pokus-omyl) PID regulátoru spočívá v postupném ručním nastavování jednotlivých parametrů (proporčního, integrálního a diferenciálního) regulátoru a pozorování výsledného chování systému. Přesnost této metody závisí na zkušenostech obsluhy.

Metoda ručního nastavení se používá zejména pro regulaci menších a jednodušších systémů, kdy je možné jednoduše pozorovat výsledné chování systému a upravovat jednotlivé parametry regulátoru podle potřeby. Tato metoda může být velmi časově náročná, zejména pokud je systém složitější nebo pokud se jedná o systém s neustále se měnícími podmínkami. (Klán, 2000)

Při použití metody ručního nastavení se obvykle postupuje následujícím způsobem:

1. Nastaví se pouze proporcionální zesílení a sleduje se odezva systému.
2. Pokud je odezva příliš pomalá, zvýší se proporcionální zesílení. Pokud je odezva příliš rychlá a systém kmitá, sníží se proporcionální zesílení.
3. Nastaví se integrální člen tak, aby se minimalizovala chyba, která zůstala po stabilizaci systému.
4. Nastaví se diferenciální člen tak, aby se minimalizovala překmit a systém se stabilizoval rychleji.

5 REALIZACE PRŮMYSLOVÉHO REGULÁTORU

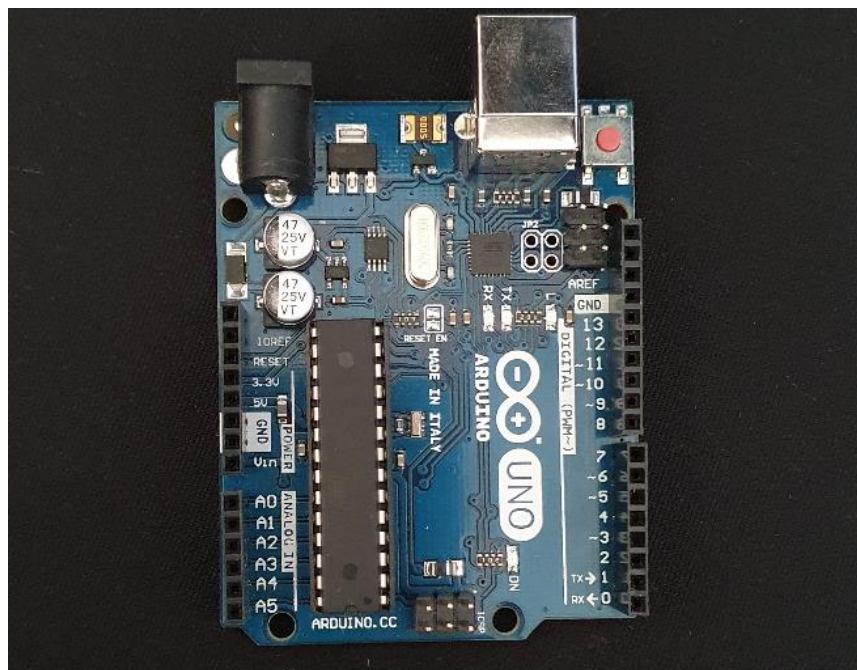
5.1 Arduino UNO

Arduino je open-source platforma pro prototypování a vývoj elektronických projektů, kterou vytvořili Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino a David Mellis v roce 2005. Cílem bylo vytvořit jednoduché a dostupné prostředí pro začínající i pokročilé uživatele, kteří chtějí vytvářet interaktivní elektronické projekty.

Desky Arduino jsou navrženy tak, aby byly co nejjednodušší na použití a dostupné pro širokou veřejnost. To znamená, že mají přehledné propojení pinů, intuitivní programovací jazyk a rozmanité možnosti komunikace s dalšími zařízeními. Arduino Uno je jedna z nejpobulárnějších a nejrozšířenějších vývojových desek z rodiny Arduino. Jedná se o desku s mikrokontrolérem Atmel AVR ATmega328P, která poskytuje jednoduché a dostupné prostředí pro vývoj elektronických projektů. Vývojové prostředí desky Arduino Uno se nazývá Arduino IDE, je založeno na jazyku WIRING, který je velmi podobný jazyku C++ a obsahuje vylepšené knihovny. Precizní klon tohoto vývojového kitu byl použit jako mozek realizovaného průmyslového regulátoru. (Arduino, 2023)

Deska Arduino Uno má tyto vlastnosti:

1. Napájení: Arduino Uno může být napájeno z USB portu nebo z externího zdroje napětí 7-12 V.
2. Procesor: Arduino Uno používá mikrokontrolér Atmel AVR ATmega328P, který má 32 kB flash paměti, 2 kB SRAM a 1 kB EEPROM.
3. Digitální piny: Deska má 14 digitálních vstupně/výstupních pinů, z toho 6 mohou být použity jako PWM výstupy a 6 jako vstupy pro čtení analogových hodnot.
4. Analogové piny: Arduino Uno má 6 analogových vstupních pinů pro čtení napětí nebo hodnoty od senzorů.
5. Komunikace: Deska podporuje sériovou komunikaci (UART), SPI a I2C pro komunikaci s dalšími zařízeními.
6. USB: Arduino Uno obsahuje USB port pro připojení k počítači a zároveň k napájení.
7. Napěťové regulační obvody: Arduino Uno má napěťové regulační obvody pro přeměnu vstupního napětí na správné napětí pro mikrokontrolér a další komponenty. (Arduino, 2023)



Obrázek 9: Arduino UNO (foto autor)

5.2 Spínací prvky

Spínací prvky jsou klíčovými součástmi v elektronických obvodech a umožňují řízení proudu a napětí v různých aplikacích. Je důležité vybrat správný typ spínacího prvku pro konkrétní aplikaci, aby se zajistila spolehlivost a bezpečnost v provozu. Existuje několik typů spínacích prvků, které se liší v závislosti na jejich vlastnostech a použití.

5.2.1 Tlačítka

Tlačítka jsou jednoduché spínací prvky v elektrotechnice, které umožňují ovládání elektrických obvodů pomocí manuálního stisknutí. Tlačítko se skládá ze dvou kontaktů, které jsou odděleny od sebe a spojeny pružinou. Když je tlačítko stisknuto, kontakt na horní straně tlačítka se uzavře s kontaktem na spodní straně, což umožní průchod elektrického proudu. V této práci byla vybrána tlačítka DS-612 s rozhraním 3Pin, maximálním spínacím napětím 250 VAC a proudem 2A. Tlačítka jsou s možností montáže do panelu a slouží k ovládání menu realizovaného průmyslového regulátoru.

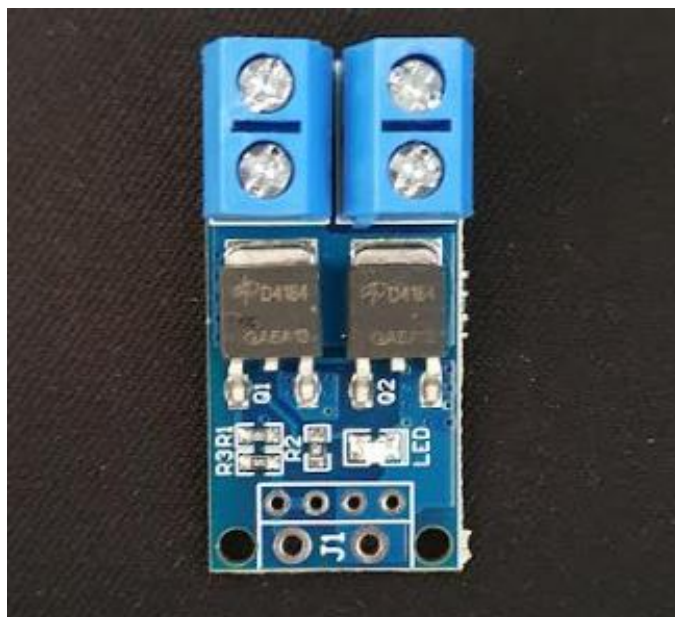


Obrázek 10 - Tlačítko DS-612 (foto autor)

5.2.2 Tranzistory

Hlavní funkcí tranzistorů je zesílení nebo přepínání signálu. Tranzistory mohou být použity jako spínací prvky nebo jako zesilovače, a to jak v analogových, tak v digitálních obvodech. Tranzistory se skládají z tří základních vrstev - emitující vrstvy, báze a kolektoru. V obvodu je tranzistor obvykle zapojen jako spínač nebo zesilovač. Při použití jako spínač se tranzistor používá k řízení proudu mezi dvěma body v obvodu. Při použití jako zesilovač se tranzistor používá k zesílení slabého signálu nebo k zesílení výkonu signálu.

Existují dva základní druhy tranzistorů - bipolární a unipolární tranzistory. Bipolární tranzistory jsou složeny ze tří vrstev - emitoru, báze a kolektoru. Existují dva typy bipolárních tranzistorů - NPN a PNP. V NPN tranzistoru je emitor negativní a kolektor pozitivní, zatímco v PNP tranzistoru je emitor pozitivní a kolektor negativní. Unipolární tranzistory jsou složeny ze dvou vrstev - kanálu a hradla. Existují dva základní typy unipolárních tranzistorů - MOSFET a JFET. MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) tranzistory mají vysoký vstupní odpor a nízkou ztrátovou energii. JFET (Junction Field Effect Transistor) tranzistory mají malý vstupní odpor a vysoké zesílení. K realizaci průmyslového regulátoru byl zvolen modul XY-MOS se spínačem MOSFET, který funguje jako výstup pro spojitou regulaci (dále viz. kapitola PWM). (dratek.cz, 2023)



Obrázek 11 - XY-MOS modul se spínačem MOSFET

5.2.3 Relé

Relé je elektromechanické zařízení, které slouží k přepínání elektrických obvodů. Skládá se z cívky, spínacích kontaktů a mechanické části. Když protéká cívkou elektrický proud, vytváří se magnetické pole, které přitahuje spínací kontakty. Ty se pak přepnou z jedné polohy do druhé a tím se uzavře nebo otevře elektrický obvod. V této práci byl použit modul dvoukanálového relé SRD-12VDC-SL-C. Toto relé je SPDT – Single Pole Double Throw, tedy relé s jedním přepínacím kontaktem, jednou vstupní linkou a dvěma výstupními. V tomto modulu jsou dvě relé, tudíž může tento modul sloužit jako výstup pro dvoustavovou i třístavovou regulaci. (dratek.cz, 2023)

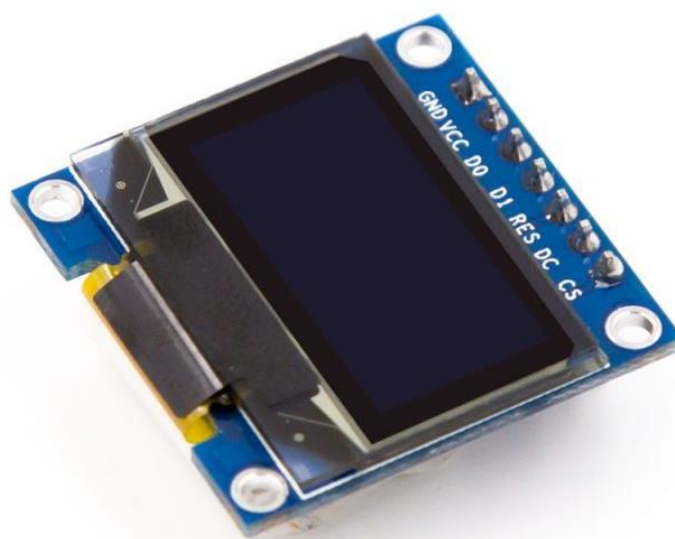


Obrázek 12 - Dvoukanálový relé modul SRD-12VDC-SL-C (foto autor)

5.3 Displej

Displeje slouží k zobrazování informací. Displeje lze rozdělit do několika kategorií v závislosti na způsobu zobrazování, technologii použité pro výrobu a dalších faktorech. Displeje je možné dělit podle způsobu rozdělování na textové, které zobrazují pouze textové informace bez možnosti zobrazení grafických prvků a grafické, které dokážou zobrazovat jak text, tak grafiku, jako například ikony, obrázky či videa. Další způsob dělení je podle technologie, kterou používají. Jako příklad lze uvést LCD displeje, které využívají tekutých krystalů pro zobrazování informací, LED displeje, využívající diody, které vydávají světlo a nebo OLED displeje, které se skládají z organických LED diod. Právě OLED displej byl použit k realizaci průmyslové regulátoru, a to SPI OLED 1,3" 128 x 64 displej. Z názvu vyplývá jeho rozlišení 128 x 64 pixelů a velikost 1,3" dostatečnou pro čitelnost menu. Ke komunikaci s mikropočítačem slouží rozhraní SPI. (dratek.cz, 2023)

Protokol SPI umožňuje přenos dat mezi zařízeními pomocí 4 drátů: MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCLK (Serial Clock) a SS (Slave Select). Jednou z výhod SPI protokolu oproti I2C je rychlost přenosu dat. SPI dokáže dosáhnout vysokých rychlostí přenosu, zatímco I2C je spíše určen pro nižší rychlosti. Další výhodou SPI je, že není závislý na adresách, což znamená, že lze snadno řídit více zařízení pomocí jediného mikrokontroléru. Na druhou stranu je však potřeba vynaložit více hardwarových prostředků pro každé zařízení, které chcete připojit k SPI sběrnici. (Arduino, 2023)



Obrázek 13 - SPI OLED displej (foto dratek.cz)

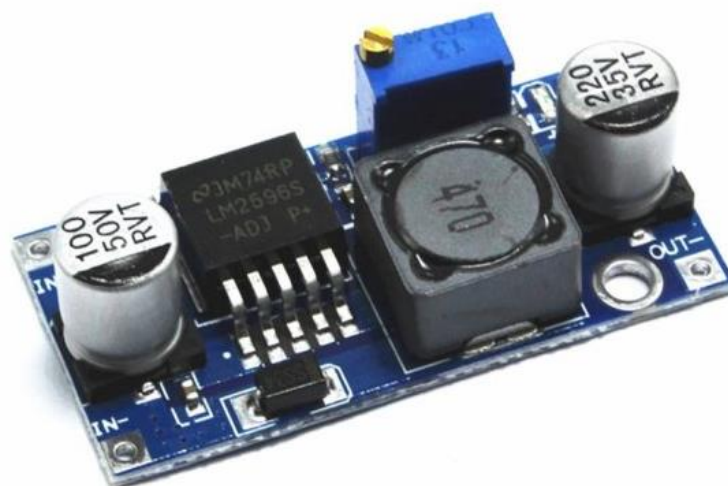
5.4 LM2596S modul

LM2596S je integrovaný step-down měnič (DC-DC) pro stabilizaci napětí v elektronických aplikacích. Jedná se o velmi populární a hojně používaný měnič, který nabízí vysokou účinnost a spolehlivost za nízkou cenu.

Měnič LM2596S umožňuje snížit vstupní napětí na nižší stabilizované výstupní napětí. Vstupní napětí může být v rozmezí 4,5V až 40V, zatímco výstupní napětí lze nastavit v rozmezí 1,23V až 37V. Maximální proud, který může být přeměněn, závisí na použitých součástkách a designu zapojení.

Jednou z výhod LM2596S je jeho účinnost. V provozu dosahuje až 92%, což znamená, že zdroj napětí nebude zbytečně ztrácet energii a ušetříte tím baterie nebo energii z napájecího zdroje. Měnič také obsahuje různé bezpečnostní prvky, jako jsou ochrany proti přetížení, přehřátí a zkratu, což zvyšuje jeho spolehlivost.

LM2596S je snadno dostupný a relativně levný, což z něj činí oblíbenou volbu pro mnoho elektronických aplikací. Tento step-down měnič byl zvolen kvůli potřebě vedení napětí 10 V na modul MOSFET. (dratek.cz, 2023)



Obrázek 14 - Modul LM2596S (foto laskakit.cz)

5.5 Komunikace Arduina s počítačem

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) je integrovaný obvod, který slouží k asynchronní sériové komunikaci mezi zařízeními. UART vysílá data bit po bitu s jedním startovním bitem a jedním nebo dvěma stopovými bity pro označení začátku a konce každého bajtu dat. Arduino uno má na desce k dispozici dva piny pro UART komunikaci, Rx a Tx. Rx pin slouží k přijímání dat do kontroleru a Tx pin k odesílání dat. Při použití hardwarového UARTu není nutné využívat žádné další periferie ani software, což zjednodušuje použití UART komunikace na vývojovém kitu Arduino UNO.

Pakliže je UART potřebný k běhu programu, musí být nejdříve inicializován pomocí funkce `Seriál.begin()`. Jako hodnota se poté píše rychlost komunikace (baudy), paritu a počet bytů na přenos dat.

Funkce `Serial.print()` umožňuje posílání dat do bufferu přenosu, kde je použit UART k odeslání těchto dat po sériové lince. Ta se přijímají z Rx pin, pak jsou ukládána do bufferu příjmu. `Seriál.available()` kontroluje existenci přijatých dat, `Seriál.read()` umožňuje načíst data ze vstupního bufferu.

Arduino UNO má obvod UART připojen přes konvertor USB, který umožňuje přenos dat mezi Arduinem a PC pomocí rozhraní USB. Po připojení Arduina k počítači pomocí kabelu USB převádí USB konvertor signály UARTu na protokol USB a posílá je do počítače. Komunikace pomocí USB konvertoru je možná díky virtuálnímu sériovému portu. Po připojení

USB konvertoru k počítači ho systém rozpozná jako sériový port a umožní komunikaci pomocí sériového protokolu. V tomto výrobku je použit virtuální sériový port s přenosovou rychlostí 9600 baudů. (Arduino, 2023)

5.6 Chování programu

Program má několik funkcí, každá funkce má jiný účel. První částí programu je inicializace, která se provede pouze jednou. Jde o nastavení pinů, nastavení proměnných, zobrazovače, načtení knihovny a spínacích prvků. Poté následuje přechod do hlavní smyčky, kde se provádějí všechny dále zmíněné funkce.

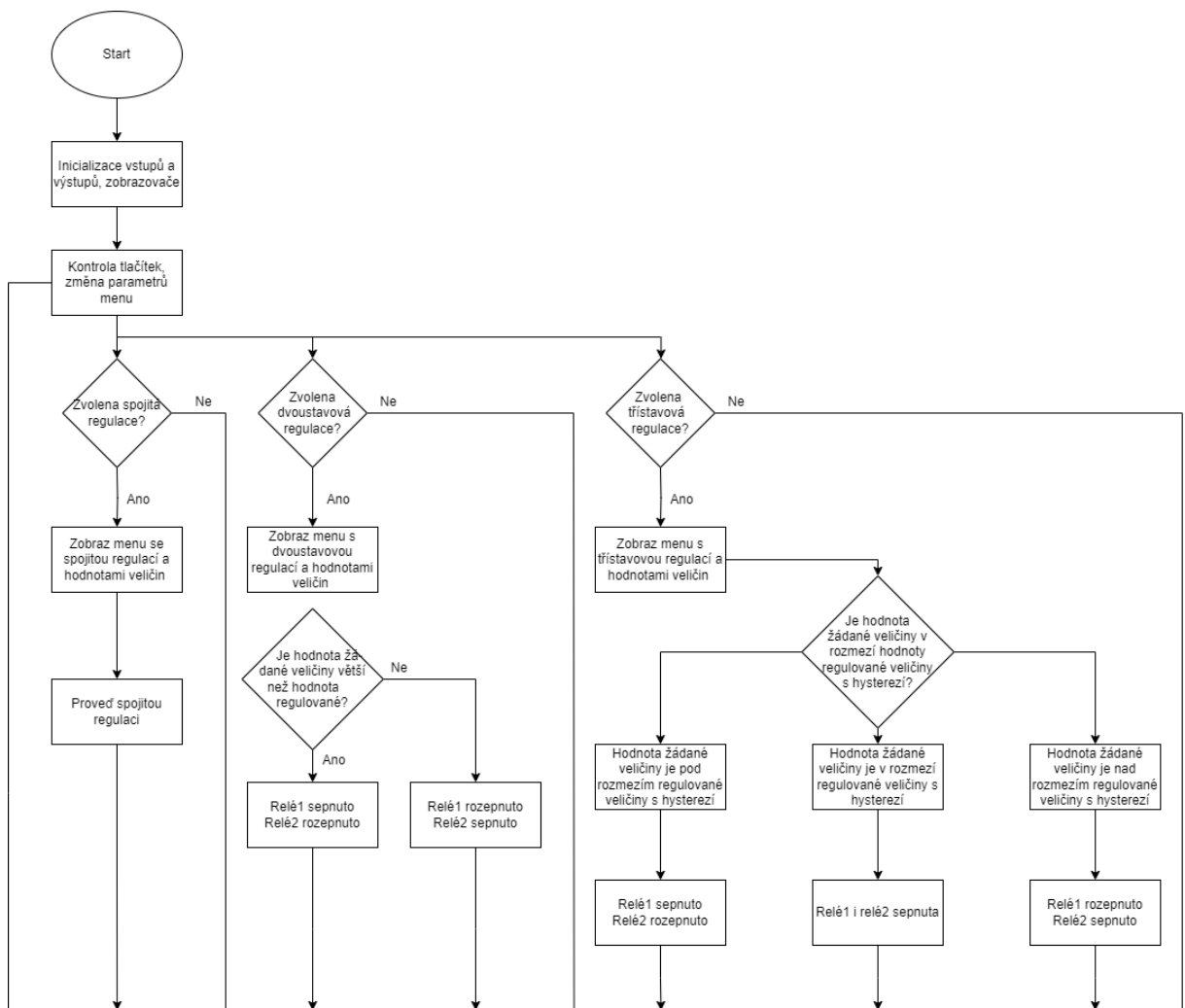
Funkce `readInput()`, která spočívá v použití příkazu `analogRead()`. Funkce "`analogRead()`" v Arduino IDE slouží k čtení analogového vstupního signálu z jednoho z analogových pinů na desce. Tato funkce vrací hodnotu v rozsahu 0 až 1023, což odpovídá rozsahu analogového vstupního signálu, který je převáděn pomocí 10bitového analog-to-digital převodníku. Například při použití napěťového děliče, který snižuje napětí na vstupu na desce do rozsahu 0 až 5 V, bude analogová hodnota, kterou vrátí `analogRead()` odpovídat poměru mezi naměřeným napětím a maximálním možným napětím, v tomto případě $1023 (2^{10} - 1)$.

Funkce `settings()` slouží ke kontrole tlačítek a nastavování zařízení. Dochází zde ke kontrole stisku tlačítek, která se provádí tím, že se zjišťuje připojení nějakého z tlačítek k zemi. Při stisku tlačítek dojde ke změnám proměnných viditelných na zobrazovači.

Funkce `data()` slouží pro zpracování dat, odesílání dat po sériové lince a jejich promítnutí na displeji. K správnému grafickému promítnutí dat se používá v inicializační části zmíněná knihovna `u8glib.h` a její grafický ovladač SH1106. Funkce `data()` kontroluje všechny proměnné ve funkci `settings()`, které určují, ve kterém režimu se právě zařízení nachází a co se má na displeji zobrazovat. V každém cyklu se displej překresluje a provádí se kontrola toho, aby se ukazovalo to, co je nastaveno v proměnných.

Funkce `TwoState()` a `ThreeState()`, které určují spínání spínacích prvků a jsou později volány ve funkci `settings()`.

Funkce `PWMcalc()`, která slouží k výpočtu PID zásahu bude podrobněji popsána v následující kapitole.



Obrázek 15 - Algoritmus chování programu

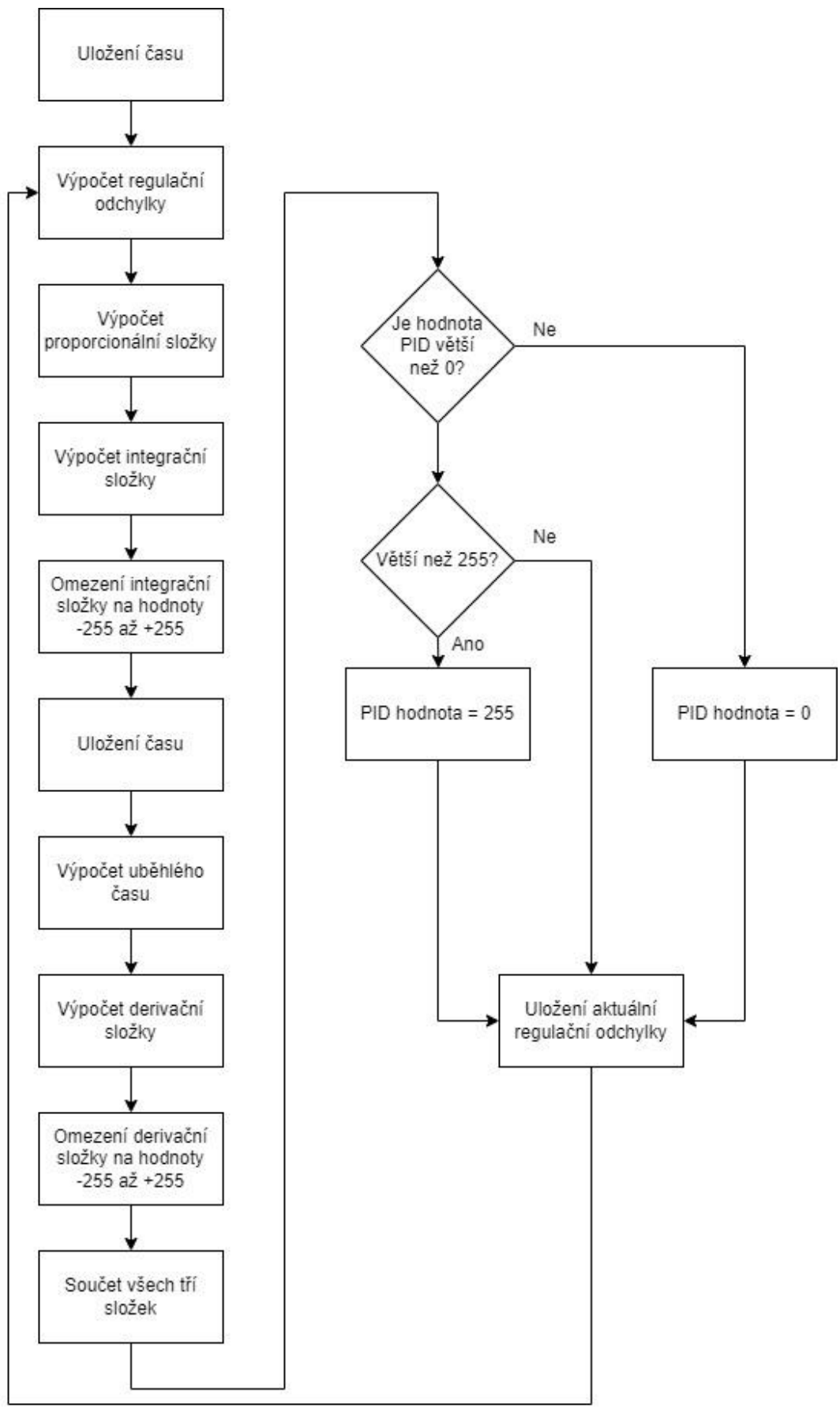
5.7 Regulace

Výpočet PID regulace funguje na principu přírůstkové regulace. To je způsob regulace, při kterém se regulátor snaží udržovat požadovanou hodnotu tím, že upravuje výstupní signál o malé inkrementální změny. Tento přístup je obvykle používán u rychlých regulací, kdy jsou vstupy a výstupy regulovaného systému měřeny v reálném čase a regulátor upravuje své výstupy na základě aktuálních vstupních signálů.

Přírůstková regulace je založena na rozdílu mezi skutečnou a požadovanou hodnotou výstupu. Regulátor nejprve vypočítá tento rozdíl a poté použije přírůstek, který je závislý na rychlosti změny výstupu, k tomu, aby vypočítal novou hodnotu výstupu.

V použitém kódu dojde nejprve (pouze jednou) k uložení času. Poté dojde k výpočtu regulační odchylky, která vyjde jako výsledek rozdílu požadované hodnoty a změřené hodnoty. Dalším krokem je výpočet proporcionální složky – součin proporcionální konstanty a regulační odchylky. Poté se vypočítá integrační složka – integrační konstanta krát součet integrační složky s regulační odchylkou. Integrační složka se pak omezuje na hodnoty -255 až +255, což částečně slouží jako anti wind-up. Následně se vypočte a uloží čas od posledního cyklu regulace a přechází se k výpočtu derivační složky – regulační odchylka krát podíl rozdílu regulační odchylky a předchozí regulační odchylky s uběhlým časem. Derivační složka se poté omezí také na hodnoty -255 až 255. Nakonec se sečtou složky P, I a D.

Pokud je hodnota PID větší než 0 a zároveň větší než 255, hodnota PID se nastaví na 255 a dojde k uložení regulační odchylky. Pokud je PID hodnota v intervalu 0 – 255 tak pouze dojde k uložení regulační odchylky a v případě hodnoty PID menší než 0 se nastaví PID hodnota na 0.



Obrázek 16 - Algoritmus PID regulace

5.8 Generování a popis signálu PWM

PWM (Pulse-Width Modulation) je metoda pro řízení výkonu v elektronických systémech, přičemž se mění střídavý signál tak, aby výsledný průměrný výkon odpovídal požadované úrovni. PWM signál se skládá z periodického signálu, který se nazývá nosný signál, a z jednoho nebo více signálů, které jsou nazývány modulační signály.

V rámci PWM řízení se nosný signál obvykle generuje s konstantní frekvencí a konstantní amplitudou, zatímco modulační signál určuje, jak dlouho bude nosný signál v každém cyklu vysoký nebo nízký. Střední hodnota PWM signálu určuje výkon, který se přivádí do zátěže, přičemž vyšší střední hodnota znamená větší výkon.

PWM v Arduino UNO je generován pomocí 8-bitového časovače/čítače (Timer/Counter). Konkrétně se jedná o Timer/Counter 0 a Timer/Counter 1. Oba čítače mohou generovat PWM signál na několika výstupech mikrokontroléru. (Arduino, 2023)

Pro generování PWM signálu se používá tzv. Fast PWM mód, který je k dispozici u obou čítačů. V tomto módu čítač porovnává aktuální čítačovou hodnotu s nastavenou hodnotou v registru OCR (Output Compare Register). Pokud jsou oba hodnoty shodné, tak se na výstupu vydává jedna logická úroveň a pokud se liší, tak druhá logická úroveň.

Pro konfiguraci PWM v Arduino UNO se obvykle používají knihovny, které umožňují jednoduše nastavit frekvenci a dobu trvání pulzu v závislosti na požadované úrovni napětí na výstupu. Například knihovna "analogWrite()" umožňuje generovat PWM signál na některých digitálních pinech s rozlišením 8 bitů (tj. 256 úrovní). Frekvence PWM signálu je obvykle 490 Hz pro piny 5 a 6 a 976 Hz pro piny 3, 9, 10 a 11. (Arduino, 2023)

V případě potřeby vysoké frekvence PWM signálu nebo využití pokročilých funkcí čítače/časovače (např. využití více než jednoho výstupu PWM signálu) je nutné pracovat s registrací mikrokontroléru přímo a realizovat PWM signál "ručně" pomocí přerušení a změny hodnoty OCR registrů.

OCR (Output Compare Register) registry jsou registry, které určují hodnotu, srovnávanou s časovačem, pro generování PWM signálu na výstupních pinech mikrokontroléru. V Arduino UNO mikrokontroléru jsou k dispozici tři OCR registry, OCR0A pro časovač 0 a OCR1A a OCR1B pro časovač 1. (Arduino, 2023)

OCR registry mohou být programovány pomocí softwaru, aby nastavily šířku pulzu PWM signálu. Hodnota v registru se porovnává s čítačem časovače a když se shodují, hodnota na pinu se mění. Pokud je hodnota OCR menší než hodnota čítače, výstupní pin se nastaví na logickou 0, jinak se nastaví na logickou 1. Tímto způsobem se generuje PWM signál.

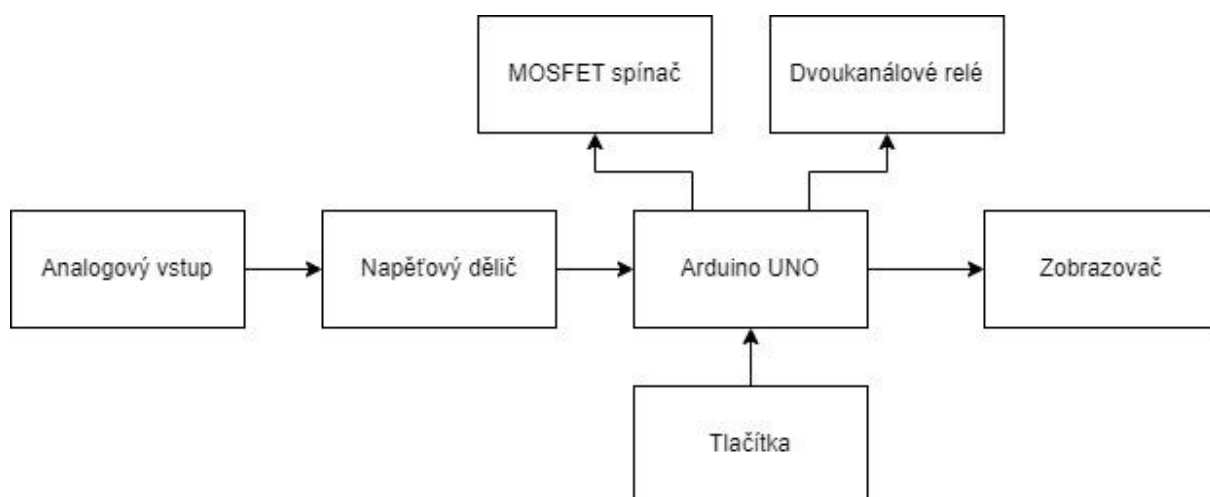
Pro časovač 0 má OCR0A 8-bitovou hodnotu, která určuje horní limit čítače časovače. Pro časovač 1 mají OCR1A a OCR1B 16-bitovou hodnotu, což umožňuje vytváření širšího rozsahu PWM signálu. Pro každý z těchto registrů existují speciální bitové masky, které umožňují nastavit různé vlastnosti PWM signálu, jako je režim generování signálu, směr inkrementace čítače, rozlišení a další. (Arduino, 2023)

5.9 Schéma zapojení a popis funkce regulátoru

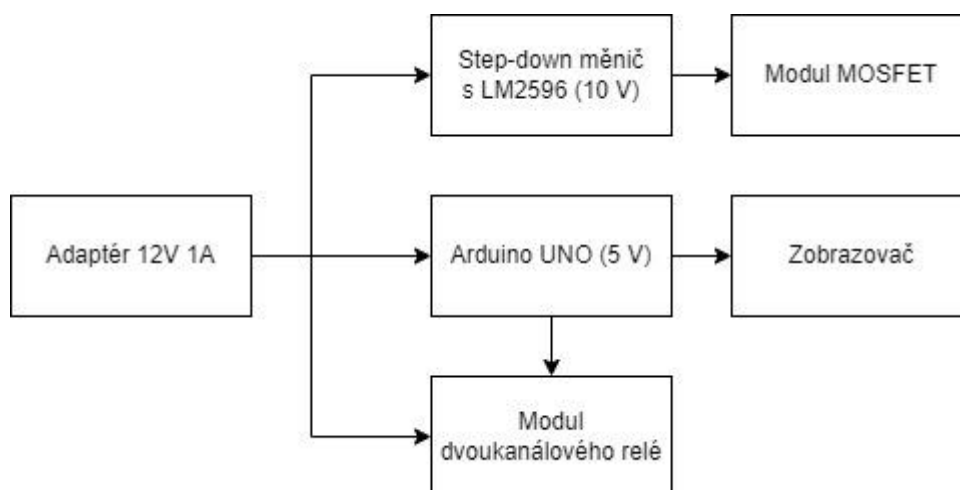
K napájení všech členů obvodu slouží adaptér 12V/1A, který je zapojen na externí koaxiální napájecí konektor DC-022 (barrel jack). Tento zdroj je dostačující pro napájení celého obvodu. Z barrel jacku je vedeno napětí nepájivé pole a z nepájivého pole na dvoukanalové relé, které slouží pro spínání výstupu u dvoustavové a třístavové regulace. Další člen napájený z barrel jacku je modul DC-DC step-down měniče s LM2596S. Měnič LM2596S umožňuje snížit vstupní napětí na nižší stabilizované výstupní napětí. Vstupní napětí může být v rozmezí 4,5 V až 40 V, zatímco výstupní napětí lze nastavit v rozmezí 1,23 V až 37 V. V tomto případě je pomocí trimmru nastaveno výstupní napětí na 10 V a dále vedeno na MOSFET.

Posledním napájeným členem z barrel jacku, tj. nepájivého pole je vývojový kit Arduino Uno, a to přímo na pin Vin. Externí napájecí napětí se doporučuje v rozsahu 7-12 V, vyšší napětí by mohlo poškodit elektroniku v kitu. Součástí kitu je 5V a 3,3V stabilizátor, který lze využít pro napájení další elektroniky. V tomto regulátoru je použit 5V zdroj pro napájení zobrazovače a cívek v relé.

Arduino UNO nejenom napájí další prvky, ale také posílá logické signály. Logický obvod začíná analogovým vstupem. Zde se pomocí napěťového děliče snižuje napětí a toto napětí je vedeno do Arduina. Arduino dále zpracovává signály od tlačítek, díky kterým dochází ke změnám v menu, tj. možnosti přepnutí druhu regulace a nastavení hodnot. Logickými signály je zároveň spínán modul MOSFET, který spíná napětí 10 V vedených ze step-down měniče.



Obrázek 17 - Schéma napájení



Obrázek 18 - Schéma logického obvodu

5.9.1 Analogový vstup

Analogové vstupy průmyslových regulátorů vývají navrženy tak, aby přijímaly signály z různých typů senzorů, jako jsou například termistory, termočlánky, snímače tlaku, proudu, výše hladiny vody apod. Tyto senzory vytvářejí malé změny v napětí nebo proudu v závislosti na změně fyzikální veličiny, kterou měří.

Analogové vstupy obvykle pracují s rozsahem napětí, který je kompatibilní s výstupem senzoru, který se používá. Například termistor s teplotním rozsahem od 0 °C do 100 °C může mít výstupní rozsah napětí od 0 V do 5 V. Analogové vstupy by měly být navrženy tak, aby

mohly přijmout tento rozsah napětí a převést ho na digitální formát, který může být dále zpracován mikroprocesorem nebo mikrokontrolérem. Nicméně unifikovaný rozsah napětí na vstupu je u průmyslových regulátorů 0 – 10 V. Jelikož maximální možné napětí, které lze přivést na Arduino je 5 V, byla zvolena cesta napěťového děliče, který rozdělí škálu 0 – 10 V na 0 – 5 V.

5.9.2 Výstupy regulátoru

Reléové výstupy jsou nejjednodušší a nejrobustnější. Výstupem je běžně reléový kontakt, který může spínat vysoké napětí a proudy. To umožňuje snadnou implementaci dvoustavové a třístavové regulace. Reléové výstupy jsou vhodné pro regulaci například topení nebo chlazení. V tomto regulátoru je spínán výše zmíněné dvoukanálový relé modul, který spína v režimu dvoustavové i třístavové regulace napětí 0 a 12 V.

Tranzistorové výstupy jsou obvykle realizovány pomocí tranzistorů nebo MOSFETů. Ty umožňují regulaci spojitou, protože mohou být řízeny PWM. Tranzistorové výstupy jsou vhodné pro regulaci motorů, světel a dalších zařízení, které vyžadují regulaci výkonu. V tomto regulátoru je PWM signálem řízen MOSFET, který má na výstupu napětí v rozsahu 0 – 10 V.

ZÁVĚR

Cílem této práce byl návrh a následná realizace průmyslového regulátoru. Přibližně v první polovině práce (body 1 až 4) jsou popsány již existující průmyslové regulátory, jejich rozdělení, popisy a algoritmy výpočtů jejich složek. Zároveň je zmíněn regulační obvod, druhy regulací a způsoby nastavení veličin regulátorů.

Po výpisu výše zmiňovaných bodů, které do jisté míry inspirovaly ke konečné podobě realizovaného regulátoru, dochází k popisu a návrhu samostatného regulátoru. Ten byl realizován převážně za pomoci již hotových modulů, konstrukce jako taková měla být nejjednodušší a nejefektivnější a zároveň měla splňovat určitá kritéria, kterých se nakonec dosáhlo.

Činnost procesního regulátoru má být ze zadání řízena jednočipovým mikropočítačem, byl tedy zvolen precizní klon Arduino UNO. Jelikož cílem této práce je se co nejvíce přiblížit použitelnému průmyslovému regulátoru, bylo zapotřebí zjistit, jak takové běžné regulátory fungují. Především se podívat na realizované vstupy a výstupy, rozsahy vstupních napětí pro senzory a způsoby realizace výstupů.

Ze zadání vyplývá, že vstup má být univerzální analogový a výstupy mají umožňovat dvoustavovou, třístavovou a spojitou regulaci. Dvoustavová a třístavová regulace je z důvodu zjednodušení a šetření místem řešena jedním modulem dvoukanalového relé, které, stejně jako v již existujících procesních regulátorech, spíná na výstupu 0 a 12 V. Spojitá regulace je řešena MOSFET modulem, do kterého je v závislosti na výpočtu algoritmu regulace posíláno napětí 0 – 10 V, opět stejně jako v reálných regulátorech. Napájení je řešeno 12V/1A adaptérem, který je připojen na externí konektor, z něj je vedeno napětí na nepájivé pole. Relé modul je napájen přímo napětím 12 V z nepájivého pole, odkud je napájen také modul se step-down DC/DC měničem LM2596S, na kterém je pomocí trimmru nastaveno výstupní napětí 10 V, které je připojeno na modul MOSFET.

Asi nejdůležitější částí regulátoru je kód mikropočítače. Ten nejenom zajišťuje chod regulací a přepínání mezi druhy regulace, ale taky umožňuje interakci s menu na SPI OLED zobrazovači pomocí třech tlačítek. K realizaci byla zvolena cesta manuálního nastavení složek PID regulace a velikosti žádané hodnoty. Spojitá PID regulace je umožněna díky PWM signálu Arduina.

Zadané požadavky byly splněny vyjma vstupu externí žadané veličiny. Tu se bohužel nepodařilo realizovat v programovací části. Zařízení se velmi podobá průmyslovým regulátorům s manuálním nastavením hodnot PID složek. Menu je stručné a přehledné bez zbytečných prvků, ovládání je díky rozložení a kombinacím tlačítek intuitivní. V případě nejasností je součástí práce přehledný návod, který nejenom popisuje pohyb v menu ale i funkci a princip tohoto regulátoru. Zařízení není zdaleka dokonalé, chybí galvanické oddělení, které ač není potřeba, je lepší mít z důvodu bezpečnosti. Zároveň volba metody připojení některých dílů může být považována za nevhodnou, protože je vše jednoduše spájeno na plošný spoj.

BIBLIOGRAFIE

Arduino - Home. Arduino - Home [online]. [cit. 2023-04-24]. Dostupné z:
<https://www.arduino.cc/>

Astrom, K.J., a Hagglund, T. PID controllers. 2nd ed. Research TrianglePark, N.C.:
International Society for Measurement and Control, 1995.

BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. Praha: BEN – technická literatura, 2003, ISBN 80-
7300-020-2.

Drátek [online]. Dratek s.r.o. [cit. 2023-05-4]. Dostupné z: dratek.cz

GRAEBE, Stefan F., Graham C. GOODWIN a Mario E. SALGADO. Control System Design:
Classical PID Control [online]. Prentice Hall PTR [cit. 2023-04-23]. Dostupné z:
[http://caaelotel.elo.utfsm.cl/home/wp-content/uploads/Control-System-Design-
SalgadoGoodwinGraebe.pdf](http://caaelotel.elo.utfsm.cl/home/wp-content/uploads/Control-System-Design-SalgadoGoodwinGraebe.pdf)

KLÁN, Petr. Moderní metody nastavení PID regulátorů [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné
z: https://valter.byl.cz/sites/default/files/soubory/moderni_nastav_pid.pdf

KMÍNEK, Miloš. Měřicí a řídicí technika: Spojité regulátory [online]. Praha, [cit. 2023-04-
13]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/f3/f3k34-sprg.htm>

KUPKA, Libor. Mechatronika a robotika: Přednášky a cvičení [online]. Univerzita Pardubice
[cit. 2023-04-11].

Láskakit [online]. LaskaKit s.r.o. [cit. 2023-05-5]. Dostupné z: laskakit.cz

NAVRÁTIL, Petr. Metody průběžné identifikace pro návrh samočinně se nastavujících
regulátorů[online]. Disertační práce, Univerzita Tomáše Bati Zlín, fakulta aplikované
informatiky 2007 [cit.2023-04-15]. Dostupné z:
[https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/2811/navr%C3%A1til_2007_dp.pdf?sequence
=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/2811/navr%C3%A1til_2007_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

P. M. Meshram, R. G. Kanojiya, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for
speed control of DC motor," IEEE-International Conference On Advances In Engineering,
Science And Management (ICAESM -2012), Nagapattinam, Indie, 2012.

Regulované soustavy [online]. Hradec Králové [cit. 2023-04-13]. Dostupné z:
https://vyuka.hradebni.cz/file.php/133/regulovane_soustavy_PID.pdf

Složené spojité regulátory [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z:
<https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/949>

SPI OLED 1,3" displej 128 x 64 - Bílý. Drátek [online]. Havlíčkův Brod: Dratek [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/3202-spi-oled-1-3-displej-128x64-bily.html>

Spojité regulátory [online]. Hradec Králové, [cit. 2023-04-13]. Dostupné z:
https://vyuka.hradebni.cz/file.php/133/spojite_regulatory.pdf

ŠČEVÍK, Petr. Konvenční typy lineárních diskretních regulátorů a jejich modifikace [online]. Ostrava [cit. 2023-04-15]. Dostupné z:
http://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/data/kapitola4.html?fbclid=IwAR0zNkIIENG2UdkDXXFfAV2mvu7dY_ezspv1R7ef68p8TqFhjLbGl7gjMYg

ŠULC, Bohumil a VÍTEČKOVÁ, Miluše. Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03007-5.

ŠVARC, Ivan, MATOUŠEK Radomil; ŠEDA Miloš a VÍTEČKOVÁ Miluše. Automatické řízení. Brno: CERM – Akademické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-214-4398-3.

TŮMA, Jiří, WAGNEROVÁ Renata, FARANA Radim a LANDRYOVÁ, Lenka. Základy automatizace [online]. Ediční středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z:
http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta_text.pdf

Vypracované okruhy - Automatizace [online]. [cit. 2023-04-12]. Dostupné z:
<http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory2/1%20regulacni%20obvod.pdf>

SEZNAM PŘÍLOH

A – CD

B – Návod na použití

PŘÍLOHA A

Příloha k bakalářské práci
Návrh a realizace průmyslového regulátoru
Michal Valášek

CD

OBSAH

Kompletní zdrojový kód aplikace v prostředí Arduino IDE.

Příloha k bakalářské práci
Návrh a realizace průmyslového regulátoru
Michal Valášek

Návod k použití

NÁVOD K POUŽITÍ

Návod k použití vyplývá z předchozích kapitol, ovládání je poměrně jednoduché a jde pouze o porozumění tlačítkům.

Regulátor se je nejdříve potřeba připojit ke zdroji napájení přes koaxiální napájecí konektor 2.1mm (barrel jack). K dosažení spínání 0 a 12 V v relé a 0 – 10 V v MOSFETu je zapotřebí napájet zařízení zdrojem s napětím 12 V. Za použití napájení z PC pomocí USB portu je zapotřebí si uvědomit, že na výstupech budou spínána maximálně napětí 5 V vedena z pinů Arduina a musí se brát ohled na maximální napájecí možnosti Arduina. Reléový a MOSFETový výstup jsou přesunuty z modelů do zadního panelu, kde první a třetí svorka jsou výstupy prvního a druhého relé, čtvrtá svorka je Vout+ a pátá svorka Vout- MOSFETu.

Při spuštění je na displeji menu spojitě regulace (PWM). Zde je možnost za pomoci tlačítek nastavit jednotlivé položky v menu. Pro navigaci „dolů“ slouží pravé tlačítko (v kódu definováno jako rightButton, tlačítko „+“), pro navigaci „nahoru“ slouží levé tlačítko (v kódu definováno jako leftButton, tlačítko „-“).

Popisy tlačítek „+“ a „-“ jsou v předchozím případě neintuitivní, ale jimi se dá řídit až po zakotvení položky v menu. Zakotvení nastane podržením prostředního tlačítka (v kódu centerButton), které je určeno právě pro změny hodnot všech položek v menu. Přidržením prostředního tlačítka současně s pravým tlačítkem dochází k inkrementálnímu nárůstu hodnoty v menu, při podržení prostředního a levého tlačítka současně dochází k inkrementálnímu poklesu hodnoty vybrané položky.

Když je regulátor v menu spojitě regulace, jako první nastavitelná hodnota je hodnota nastavené veličiny. Ta se dá nastavit v rozmezí 0 – 1023, tyto hodnoty vyplývají z 10bitového rozlišení ADC převodníku kitu Arduino Uno. Další položkou v menu je velikost proporcionální konstanty KP, následuje velikost integrační konstanty KI a poslední volitelnou a nastavitelnou položkou je velikost derivační konstanty KD. Jedná se o konstanty aplikované přírůstkové PID regulace. Poslední řádek ukazuje informaci o velikosti čtené hodnoty ze senzoru. Jednotka čtené hodnoty odpovídá přibližně napětí 9,765 mV.

```
>PWM
Set: 0
Kp: 0.00
KI: 0.00
KD: 0.00
Read: 0
```

Při najetí na položku „PWM“ (hned první položka v menu) a zmáčknutí prostředního tlačítka dojde ke změně regulace ze spojitě na trojstavovou (Trojstav. rele). Zde se mění stejným algoritmem jako v předchozích situacích nastavená hodnota a hystereze. Ta je v menu pojmenována pouze „H“, stejně jako v kódu. Při zvyšování nastavené hodnoty dochází k prvnímu stavu, kdy je nastavená hodnota menší než čtená hodnota. V tomto stavu je sepnuto první relé (v kódu RELAY2). Druhý stav nastává, kdy je nastavená hodnota v rozsahu čtená – hystereze a čtená + hystereze, v tomto stavu jsou sepnuta obě relé. Třetí a poslední stav nastává, když je nastavená hodnota větší než čtená + hystereze, v tomto stavu je sepnuto pouze druhé relé (v kódu RELAY2).

```
>Trojstav. rele
Set: 0
H: 0
Read: 0
```

Při najetí na položku trojstavové regulace a zmáčknutí prostředního tlačítka dojde k přepnutí změny režimu na dvoustavovou regulaci (Dvoustav. rele). Zde je ovládání podobné trojstavové regulaci, nicméně je zde pouze možnost změny hodnoty nastavené veličiny. V tomto případě, pokud je hodnota nastavené menší než hodnota čtené hodnoty, je seplé první relé a při přechodu přes čtenou hodnotu není sepnuté žádné relé.

```
>Dvoustav. Rele
Set: 0
Read: 0
```