

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**ČÍSLICOVÝ PI REGULÁTOR PRO UDRŽOVÁNÍ ZADANÉ ÚROVNĚ
OSVĚTLENÍ**

Lukáš Málek

Bakalářská práce
2018

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš Málek**
Osobní číslo: **I15014**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Číslicový PI regulátor pro udržování zadané úrovně osvětlení**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je ověřit principy zpětnovazebního řízení na příkladu udržování úrovně osvětlení v daném místě. Řídicí systém typu PI bude prakticky realizován s využitím zvolené univerzální vývojové platformy s jednočipovým počítačem. Pro napájení, včetně akčních prvků, bude využit univerzální napájecí zdroj o napětí max. 12V. Intenzita osvětlení bude snímána foto-rezistorem. Regulátor bude nastaven vhodnou metodou na základě změřených charakteristik a jeho chování bude prakticky ověřeno.

Teoretická část bude obsahovat uvedení do problematiky, popis použitého hardware, zejména využitých funkcí, elektrické zapojení a popis zvolené metody nastavení regulátoru. Praktická část bude obsahovat naměřené charakteristiky a zprávu o experimentálně ověřených vlastnostech nastavení, včetně grafických ilustrací.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

HLAVA, J. Prostředky automatického řízení II: Analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.

CVEJN, J. Řízení procesů [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, FEI, 2012-. Elektronický studijní materiál k předmětu Automatizace 1.

LÁNÍČEK, R. Elektronika, obvody, součástky, děje, Praha: BEN - technická literatura, 1998.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jan Cvejn, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce:

6. prosince 2017

Termín odevzdání bakalářské práce:

11. května 2018



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. prosince 2017

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci 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., autorský zákon, 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. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 10. 05. 2018

Lukáš Málek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Janu Cvejnovi, Ph.D. za ochotu, rady a připomínky, které byly cenným přínosem pro tuto bakalářskou práci. Dále bych také rád poděkoval své rodině a kamarádce za jejich podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

V Pardubicích dne 10. 05. 2018

Lukáš Málek

ANOTACE

Tato bakalářská práce je zaměřena na ověření principů zpětnovazebního řízení. Bylo sestrojeno zařízení na bázi LED diod a snímače osvětlení. Snímání osvětlení se provádí pomocí fotorezistoru. Řídicí systém byl realizován s využitím univerzální vývojové platformy Arduino. Cílem práce dále bylo vytvořený systém identifikovat, navrhnout vhodný PI regulátor a prakticky ověřit chování regulačního obvodu pro udržování zadané úrovně osvětlení.

KLÍČOVÁ SLOVA

automatické řízení, PID regulátor, Arduino, mikropočítač, LED, PWM

TITLE

DIGITAL PI CONTROLLER FOR KEEPING DESIRED LEVEL OF LIGHTING

ANNOTATION

This bachelor thesis is focused on the verification of principles of feedback control. A device on the basis of light emitting diodes (LED) was assembled, as well as light sensors. A photoresistor was used to monitor the level of illumination. Arduino versatile development platform was used when implementing the control system. The objective of the work was to identify the set up system, to design a suitable PI regulator and to test the actual behaviour of the regulatory circuit for maintaining the specified level of illumination.

KEYWORDS

Automatic control, PID controller, Arduino, Microcomputer, LED, PWM

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	9
SEZNAM ILUSTRACÍ	11
SEZNAM TABULEK.....	13
ÚVOD	14
1 VYUŽITÉ METODY A TECHNOLOGIE	15
1.1 Automatické řízení dynamických systémů	15
1.1.1 Zpětnovazební regulační obvod	16
1.1.2 Regulátor	17
1.1.3 Návrh PID regulátoru.....	19
1.2 Platforma Arduino.....	22
1.3 LED dioda	26
1.3.1 Základní zapojení LED diod	28
1.4 Optoelektronické prvky.....	30
1.4.1 Fotorezistor	31
1.4.2 Fototranzistor	32
1.4.3 Fotodioda	33
1.5 Pulzně šířková modulace – PWM.....	34
2 REALIZACE REGULAČNÍHO OBVODU	35
2.1 Hardwarová platforma řídicího systému.....	35
2.2 Řízená soustava a rozhraní pro připojení k řídicí desce.....	36
2.3 Senzor osvětlení	38
2.4 Zobrazovací jednotka	40
2.5 Programová část řídicího systému	41
3 IDENTIFIKACE SOUSTAVY A NASTAVENÍ REGULÁTORU.....	44
3.1 Identifikace soustavy.....	44
3.1.1 Statická charakteristika	44
3.1.2 Přechodová charakteristika	45
3.2 Nastavení regulátoru	46
3.3 Ověření chování regulačního obvodu	47
4 ZÁVĚR	50
POUŽITÁ LITERATURA	51
PŘÍLOHY	53

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

A/D	analogově digitální (převodník)
D/A	digitálně analogový (převodník)
GND	ground (uzemnění)
ICSP	In-Circuit Serial Programming (konektor)
IDE	Integrated Development Environment (vývojové prostředí)
LED	Light Emitting Diode (dioda emitující světlo)
Mac OS	Macintosh Operating System (operační systém Macintosh)
MS	Microsoft
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PID	proporcionálně integračně derivační (regulátor)
PSD	proporcionálně sumačně diferenční (regulátor)
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
SMD	surface mount device (součástky určené pro povrchovou montáž)
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
V-A	Volt-Ampérová (charakteristika)

SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

A	integrační plocha
E	osvětlení, lx
e	regulační odchylka
$G(s)$	obrazový přenos systému
$h(t)$	přechodová funkce
I_F	propustný proud, A
k	diskrétní krok
K_s	zesílení soustavy
R	odpor, Ω
r_0	zesílení PID regulátoru,
r_k	kritické zesílení
S	diskrétní pomocná proměnná
T	perioda vzorkování, s
t, τ	čas, s
T_Σ	souhrnná časová konstanta, s
T_d	derivační časová konstanta, s
T_i	integrační časová konstanta, s
T_k	kritická perioda, s
T_u	doba ustálení, s
u	akční veličina
U_d	prahové napětí diody, V
U_F	propustné napětí, V
U_{nap}	napájecí napětí, V
v	porucha
w	žádaná hodnota (řídící veličina)
y	regulovaná veličina

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obr. 1.1 – Blokové schéma ovládání a regulace.....	15
Obr. 1.2 – Blokové schéma zpětnovazebního regulačního obvodu.....	17
Obr. 1.3 – Určení kritické periody při kritickém zesílení.....	20
Obr. 1.4 – Určení parametrů pro výpočet T_{Σ}	22
Obr. 1.5 – Arduino Mini	23
Obr. 1.6 – Arduino Nano	24
Obr. 1.7 – Arduino Micro	24
Obr. 1.8 – Arduino Uno	25
Obr. 1.9 – Arduino Mega2560.....	25
Obr. 1.10 – Arduino Ethernet Shield	26
Obr. 1.11 – Standardní uspořádání LED diody	27
Obr. 1.12 – V-A charakteristiky barevných LED diod.....	28
Obr. 1.13 – Sériové zapojení LED diod.....	29
Obr. 1.14 – Paralelní zapojení LED diod.....	29
Obr. 1.15 – Sérioparalelní zapojení LED diod	30
Obr. 1.16 – Závislost odporu na osvětlení	31
Obr. 1.17 – Příklady fotorezistorů	32
Obr. 1.18 – Fototranzistor.....	32
Obr. 1.19 – Charakteristika fotodiody	33
Obr. 1.20 – Fotodioda	34
Obr. 1.21 – Příklady pulzně šířkové modulace.....	34
Obr. 2.1 – Popis desky RobotDyn UNO.....	35
Obr. 2.2 – Schéma zapojení LED diod k řízené soustavě.....	37
Obr. 2.3 – Zhotovená deska s RobotDyem.....	38
Obr. 2.4 – Závislost osvětlení na odporu	39
Obr. 2.5 – Závislost osvětlení na odporu v logaritmickém měřítku	39
Obr. 2.6 – Zapojení fotorezistoru.....	40
Obr. 2.7 – Zobrazovací jednotka	41
Obr. 2.8 – Funkce setup()	42
Obr. 2.9 – Funkce loop().....	42
Obr. 2.10 – Výpočet intenzity osvětlení	43
Obr. 2.11 – Funkce regulace()	43

Obr. 3.1 – Statická charakteristika systému.....	44
Obr. 3.2 – Reakce systému na skokovou změnu akční veličiny.....	45
Obr. 3.3 – Skoková změna akční veličiny	45
Obr. 3.4 – Přechodová charakteristika systému.....	46
Obr. 3.5 – Reakce systému na změnu žádané hodnoty.....	48
Obr. 3.6 – Reakce systému na poruchu	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Nastavení regulátoru podle Ziegler – Nicholse	21
Tab. 1.2 – Nastavení regulátoru podle Kuhnova pravidla	22
Tab. 2.1 – Přehled zapojení pinů	37
Tab. 3.1 – Nalezené parametry PID regulátorů	47

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá ověřením principů zpětnovazebního řízení. Byl navrhnout a vytvořen systém z LED osvětlení a snímače osvětlení. Pro napájení byl využit univerzální napájecí zdroj o napětí 12 V. Cílem práce bylo sestrojený systém identifikovat a navrhnout vhodný regulátor. Řídicí systém byl realizován s využitím univerzální vývojové platformy Arduino. Regulátor byl nastaven pomocí Kuhnovy metody na základě změřené přechodové charakteristiky. Bylo provedeno porovnání chování regulačního obvodu při regulaci pomocí PI a PID regulátoru. Součástí práce je také praktické ověření chování regulačního obvodu pro udržování zadané úrovně osvětlení.

Bakalářská práce je rozdělena na tři hlavní části. První část obsahuje pět kapitol, které pojednávají o využitých metodách a technologiích. První kapitola se zabývá automatickým řízením dynamických systémů. Je zde také popsán uzavřený regulační obvod, PID regulátory a metody pro nastavení PID regulátorů. V druhé kapitole je popsána vývojová platforma Arduino. Ve třetí a čtvrté kapitole jsou uvedeny vlastnosti použitého zdroje osvětlení a způsoby měření osvětlení pomocí optoelektronických prvků. Závěr této části je věnován regulaci výkonu pomocí pulzně šířkové modulace. V druhé části bakalářské práce je popsána samotná realizace regulačního obvodu. Ta se skládá z popisu zvolené desky, návrhu rozhraní mezi řídicí deskou a regulovanou soustavou. Je zde také popsána realizace senzoru osvětlení a jeho kalibrace. Závěr této části je věnován zobrazovací jednotce a popisu vytvořeného řídicího programu. Poslední část práce je zaměřena na identifikaci regulované soustavy, nastavení regulátoru a ověření regulačního pochodu.

1 VYUŽITÉ METODY A TECHNOLOGIE

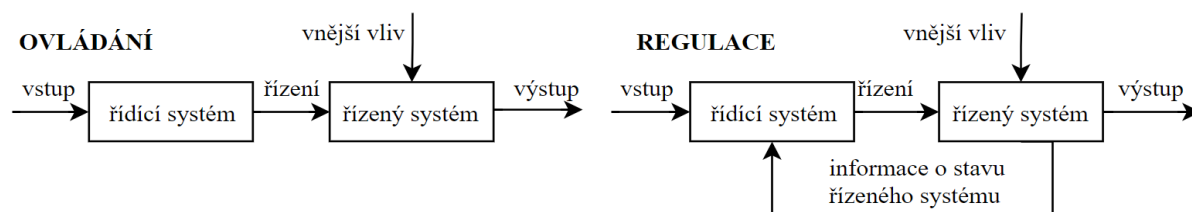
1.1 AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ

Pro udržování intenzity osvětlení bylo využito principů zpětnovazebního řízení dynamických systémů. Informace v této kapitole byly čerpány z (Švarc, 2011; Pivoňka, 2003). Řízení je cílené působení na řízený systém, za účelem dosažení určitého předepsaného cíle. Podle způsobu provedení řízení, je možné ho rozdělit na ruční a automatické. Příkladem může být udržování požadované teploty v místnosti člověkem nebo regulátorem.

Automatické řízení je dále možné rozdělit na řízení přímé a nepřímé. Řídicí proces u přímého řízení probíhá bez přívodu vnější energie, například regulace výšky hladiny, kde výška hladiny je odvozena od síly plováku. V dnešní době převažuje nepřímé řízení, kde řídicí proces probíhá s vnějším přívodem energie.

Dalším hlediskem pro rozdělení řízení je, zda výsledek řízení je nebo není zpětně kontrolován, to znamená, jestli je při řízení použita zpětná vazba. Podle toho je možné rozlišit řízení na ovládání, regulaci a vyšší formy řízení.

- **Ovládání** je řízení bez zpětné vazby, řídicí systém nemá žádné informace o řízené veličině, a proto nemůže reagovat na vnější vliv.
- **Regulace** je řízení se zpětnou vazbou. Cílem regulace je udržování určité fyzikální veličiny na požadované hodnotě nebo změna její hodnoty podle určitých pravidel. Do regulačního obvodu je zavedena zpětná vazba. Díky tomu je možné při regulaci získat informaci o regulované veličině. Ta je následně srovnávána s žádanou hodnotou. Podle zjištěných odchylek se zasahuje do regulačního procesu s cílem odstranit tyto odchylky. Rozdíl mezi ovládáním a regulací je vidět na obr. 1.1.



Obr. 1.1 – Blokové schéma ovládání a regulace

- **Vyšší formy řízení**, mezi ně např. patří optimální řízení a adaptivní řízení.

Optimální řízení je takové řízení, kdy systém dosáhne požadovaných vlastností například v co nejkratším čase nebo při minimu vynaložené energie. Systém je schopen dosáhnout co nejefektivnějšího působení a tím i nejlepšího chování celého systému za daných

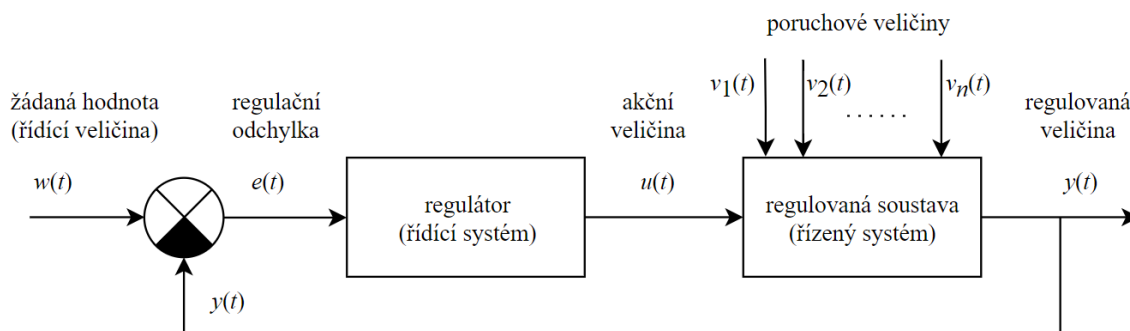
podmínek. Adaptivní řízení je schopné měnit svou strukturu i své parametry tak, aby řídicí proces probíhal stále optimálně, a to i při změnách parametrů řízeného objektu.

Automatické řízení lze uskutečnit několika způsoby, které se liší principem působení řídicího systému na řízený systém. Z tohoto hlediska lze automatické řízení rozdělit na logické, spojitě a nespojitě (diskrétní). Logické řízení využívá pro řízení pouze dvě hodnoty. Jejich působení má tedy pouze dva stavy, například vypínač je sepnut nebo rozepnut. Také i informace o stavu systému se vyjadřují pouze dvouhodnotově, např. hladina je nad nebo pod požadovanou hodnotou. Dvouhodnotové veličiny se formálně vyjadřují hodnotami logická 0 a logická 1. Stejně jako proměnné výrokové logiky, proto jsou vztahy mezi proměnnými nazývány logické funkce a řídicí obvody jsou logické řídicí obvody. Spojité řízení je takové řízení, kde řídicí systém vytváří nepřetržitou vazbu mezi vstupy a výstupy. Všechny veličiny spojitěho systému jsou spojitě proměnné v čase a žádná z nich tedy není logická nebo nespojitá. V důsledku nasazení počítačů či mikrokontrolerů do systému jako regulátoru (řídicího systému), vzniklo nespojitě řízení. Řídicí počítače nejsou schopny zpracovávat spojitý signál, a proto je nutné tento signál převádět na nespojitý signál. Nespojitý řídicí systém vytváří vztah mezi vstupy a výstupy jako vztah mezi posloupnostmi impulsů, snímaných v časovém sledu daném vzorkovací periodou (sample hold). Mezi okamžiky vzorkování není regulovaná veličina měřena a ani hodnota akční veličiny není upravována. Čím je vzorkovací perioda kratší, tím rychlejší je řízený proces a nespojitě řízení se přibližuje spojitěmu řízení.

1.1.1 Zpětnovazební regulační obvod

Regulační obvod je systém, ve kterém se uskutečňuje regulace. Regulační obvod se skládá ze dvou částí, z regulátoru (řídicího systému) a regulované soustavy (řízeného systému). Regulátor je zařízení, které provádí regulaci. Regulovaná soustava je objektem regulace, některá její veličina je regulátorem regulována (např. výška hladiny v nádrži nebo jas LED diod). Regulační obvod se znázorňuje blokovým schématem na obr. 1.2.

Vstupem do regulačního obvodu je žádaná hodnota (někdy též řídicí veličina), která je označována w . Pomocí žádané hodnoty se nastavuje hodnota, kterou má dosahovat regulovaná veličina. Regulovaná veličina y je výstupem z regulované soustavy a pomocí regulace se udržuje na požadované hodnotě.



Obr. 1.2 – Blokové schéma zpětnovazebního regulačního obvodu

V regulačním obvodu se měří hodnota regulované veličiny y a dochází k jejímu porovnávání s žádanou hodnotou w , vytváří se rozdíl

$$e = w - y, \quad (1.1)$$

kteří se nazývá regulační odchylka e . Pokud má regulační odchylka nenulovou hodnotu, tak regulátor provádí akční zásah. Úkolem regulátoru je zasahovat do regulačního procesu tak, aby se regulační odchylka e udržovala minimální nebo nulová. Toho je docíleno pomocí výstupní veličiny regulátoru, která je zároveň vstupní veličinou regulované soustavy, nazývá se akční veličina a označuje se symbolem u .

Příčinou, proč je nutné provádět regulaci, jsou poruchy (poruchové veličiny), které jsou označovány symbolem v . Na regulační obvod může působit více poruch, ty se potom označují v_1, v_2 až v_n . Poruchové veličiny nežádoucím způsobem působí na regulovanou veličinu.

1.1.2 Regulátor

Regulátor je zařízení, které prostřednictvím akční veličiny působí na regulovanou soustavu tak, aby se regulovaná veličina udržovala na žádané hodnotě. Regulátory lze rozdělit podle několika kritérií. Rozdělují se podle příkonu na regulátory přímé (bez přívodu vnější energie) a nepřímé (s přívodem vnější energie), podle signálu na regulátory elektrické, pneumatické a hydraulické. Další možné rozdělení je podle výstupního signálu na spojitě a nespojitě.

PID regulátor

Zdaleka nejpoužívanější regulátor v průmyslu je proporcionálně integračně derivační (PID) regulátor. Základní rovnice PID regulátoru je dána vztahem

$$u(t) = r_0 \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1.2)$$

kde r_0 – zesílení PID regulátoru,

T_i – integrační časová konstanta,

T_d – derivační časová konstanta,

$e(t)$ – regulační odchylka,

$u(t)$ – akční zásah.

PID regulátor se skládá ze tří složek. Jedná se o proporcionální, integrační a derivační složku. Vynecháním některé ze složek regulátoru je možné získat další typy regulátorů například P, PI nebo PD regulátor.

Proporcionální složka zesiluje regulační odchylku. Akční veličina je tedy úměrná regulační odchylce. Rychlost regulačního děje roste se zesílením, ale pro vysoké hodnoty zesílení se může obvod stát nestabilním. Samotná proporcionální složka není sama o sobě schopna odstranit regulační odchylku a vzniká trvalá regulační odchylka.

Integrační složka umožňuje trvalé odstranění regulační odchylky. To sebou přináší i nevýhody v podobě zhoršení stability regulačního obvodu a zpomalení regulačního děje.

Derivační složka je poslední složka PID regulátoru. Složka zlepšuje stabilitu regulačního obvodu a zároveň urychluje regulační děj. Příliš vysoká hodnota derivační konstanty může vést k nežádoucímu zesílení šumu v obvodě.

Číslicový PID regulátor

V současné době se regulátory nejčastěji realizují pomocí počítačů (mikrokontrolerů). Číslicové regulátory pracují s posloupností hodnot. Před číslicový regulátor je umístěn vzorkovač (A/D převodník), který převádí analogový signál na číslicový. Převod probíhá obvykle s konstantní periodou T . Za regulátor se dává tvarovač (D/A převodník), který převádí číslicovou informaci na analogový signál, který je přiveden do regulované soustavy.

Tvar číslicového PID regulátoru se získá ze spojitého PID regulátoru tak, že se integrační složka I nahradí numerickou integrací neboli sumací S a derivace diferencí. Z této náhrady také plyne název proporcionálně sumačně diferenční (PSD) regulátor. Integraci lze přibližně nahradit několika způsoby levou obdélníkovou, pravou obdélníkovou nebo lichoběžníkovou metodou. Při odvození se vyjde z rovnice (1.2). Nahrazením integrace lichoběžníkovou metodou a derivace diferencí, se získá rovnice (1.3), která se také nazývá polohový algoritmus PSD regulátoru.

$$u(k) = r_0 \left(e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k \frac{e(i) + e(i-1)}{2} + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right), \quad (1.3)$$

kde r_0 – zesílení PID regulátoru,
 T_i – integrační časová konstanta,
 T_d – derivační časová konstanta,
 k – diskretní krok, $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$,
 T – perioda vzorkování,
 $u(k)$ – diskretní akční zásah,
 $e(k)$ – diskretní regulační odchylka,
 $e(k-1)$ – diskretní regulační odchylka v předcházejícím kroku.

Pro diskretní krok $k = 0$ se integrační a derivační složka vypustí. Rovnice (1.3) není příliš vhodná pro praktickou realizaci, protože s krokem k roste náročnost sumace integrační složky. Tento problém je možné snadno odstranit, zavedením pomocné proměnné S , která se v každém kroku aktualizuje (Cvejn, 2016).

$$u(k) = r_0 \left(e(k) + \frac{T}{T_i} S(k) + \frac{T_d}{T} (e(k) - e(k-1)) \right), \quad (1.4)$$

$$S(k) = S(k-1) + \frac{e(k) + e(k-1)}{2}; \quad S(0) = 0, \quad (1.5)$$

kde r_0 – zesílení PID regulátoru,
 T_i – integrační časová konstanta,
 T_d – derivační časová konstanta,
 k – diskretní krok, $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$,
 T – perioda vzorkování,
 $u(k)$ – diskretní akční zásah,
 $e(k)$ – diskretní regulační odchylka,
 $S(k)$ – diskretní pomocná proměnná,
 $S(k-1)$ – diskretní pomocná proměnná v předcházejícím kroku,
 $e(k-1)$ – diskretní regulační odchylka v předcházejícím kroku.

1.1.3 Návrh PID regulátoru

Správný návrh a seřízení regulátoru je velice důležitý problém. V současnosti se přistupuje k nastavování regulátorů pomocí 4 základních postupů. Mezi ně patří analytické metody, metoda pokus – omyl, inženýrský postup a automatické nastavení parametrů.

Analytické metody jsou založeny na vytvoření matematického modelu procesu. Matematický model se získá z matematicko-fyzikální analýzy, to je možné pouze u jednodušších systémů. U složitějších systémů se model sestavuje spíše z měřených charakteristik. Parametry regulátoru mohou být získány experimentálně simulací modelu. V praxi se tyto metody používají méně často.

Metoda pokus – omyl se v praxi používá nejčastěji. Parametry regulátoru se nastavují experimentálně podle přechodové charakteristiky. Zkušený regulační technik určí vhodné nastavení parametrů, které je vhodné pro daný regulační obvod.

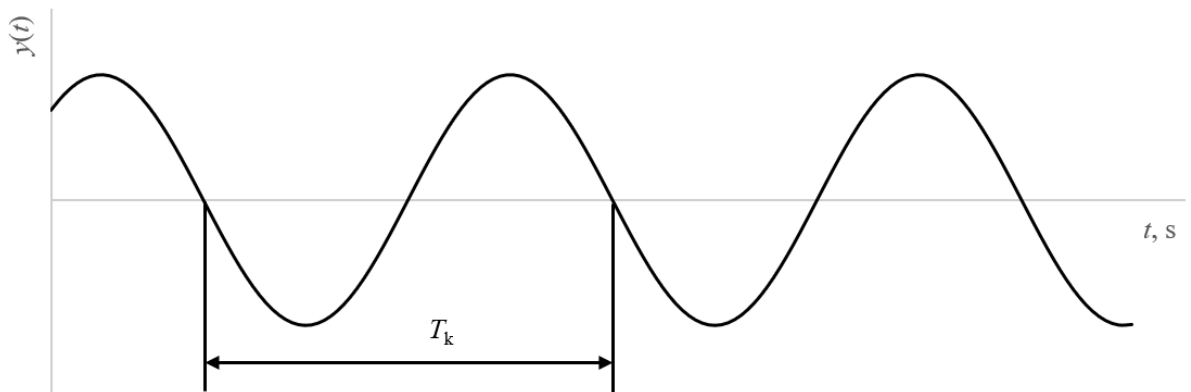
Inženýrský postup částečně aplikuje obě dvě předchozí metody. Nejdříve je vytvořen hrubý model procesu. Získané parametry regulátoru jsou doladěny regulačním technikem na reálném systému metodou pokus – omyl).

Automatické nastavování regulátorů se velmi často objevuje u kompaktních regulátorů. Většina těchto regulátorů používá pro nastavování parametrů různé varianty klasické metody Zieglera a Nicholse, jedná se o hrubý návrh parametrů regulátoru. Automatické nastavování je určeno pouze pro úzkou řadu systémů.

Zieglerova – Nicholsova metoda kritického zesílení (Švarc, 2011)

Jedná se o jednoduchou a nenáročnou metodu, která je v praxi velmi rozšířená. Metoda byla publikována v roce 1942.

Princip metody spočívá v přivedení uzavřeného regulačního obvodu na mez stability. Při vyřazení integrační a derivační složky je postupně zvyšováno zesílení regulátoru r_0 až do doby, kdy je obvod na mezi stability. Regulovaná veličina y kmitá s konstantní amplitudou a konstantní periodou (viz obr. 1.3), která se nazývá kritická perioda T_k . Hodnota zesílení regulátoru r_0 , při které se obvod dostane na mez stability, se nazývá kritické zesílení r_k .



Obr. 1.3 – Určení kritické periody při kritickém zesílení

Dosažením těchto dvou parametrů r_k a T_k do tab. 1.1, je možné určit vhodné nastavení parametrů regulátoru.

Tab. 1.1 – Nastavení regulátoru podle Ziegler – Nicholse

Regulátor	r_0	T_i	T_d
P	$0,5 \cdot r_k$		
PI	$0,45 \cdot r_k$	$0,85 \cdot T_k$	
PID	$0,6 \cdot r_k$	$0,5 \cdot T_k$	$0,125 \cdot T_k$

Kuhnova metoda (Kuhn, 1995)

Další z metod pro nastavování regulátorů je Kuhnova metoda. Bývá také nazývána jako pravidlo souhrnné časové konstanty. Tato metoda byla vyvinuta Udo Kuhnem v roce 1995, je určena pro stabilní lineární systémy s přechodovou charakteristikou ve tvaru s. Kuhnova metoda je snadno použitelná pro získání parametrů regulátoru. Pro určení parametrů je postačující, znát zesílení soustavy K_s a souhrnnou časovou konstantu T_Σ .

Pokud je přenos systému ve tvaru rovnice (1.6), pak je možné souhrnnou časovou konstantu T_Σ určit pomocí rovnice (1.7).

$$G(s) = K_s \cdot \frac{(1 + T_{N1} \cdot s) \cdot (1 + T_{N2} \cdot s) \cdot \dots \cdot (1 + T_{Nm} \cdot s)}{(1 + T_1 \cdot s) \cdot (1 + T_2 \cdot s) \cdot \dots \cdot (1 + T_n \cdot s)} \cdot e^{-T_D \cdot s}, \quad (1.6)$$

kde $G(s)$ – obrazový přenos systému,

K_s – zesílení regulované soustavy,

$T_{N1}, T_{N2}, T_{Nm}, T_1, T_2, T_n, T_D$ – časové konstanty,

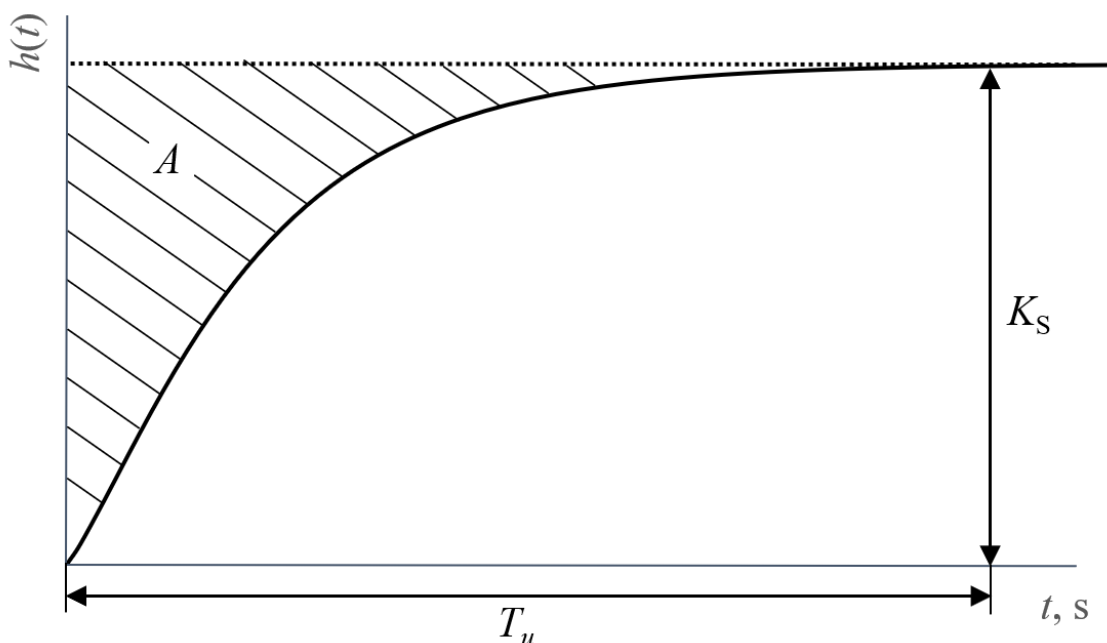
$$T_\Sigma = T_1 + T_2 + \dots + T_n - T_{N1} - T_{N2} - \dots - T_{Nm} + T_D. \quad (1.7)$$

Pokud není znám přenos soustavy, je možné určit parametry regulátoru z přechodové charakteristiky. Z přechodové charakteristiky na obr. 1.4 je přímo možné určit zesílení soustavy K_s . Pro souhrnnou časovou konstantu platí vztah

$$T_\Sigma = \frac{A}{K_s}, \quad (1.8)$$

kde K_s – zesílení regulované soustavy,

A – plocha mezi zesílením soustavy a její přechodovou charakteristikou.



Obr. 1.4 – Určení parametrů pro výpočet T_Σ

Plochu A je možné vyjádřit pomocí rovnice

$$A = K_s \cdot T_u - \int_0^{T_u} h(\tau) d\tau. \quad (1.9)$$

Po získání zesílení soustavy K_s a souhrnné časové konstanty T_Σ , je možné určit parametry regulátoru z tab. 1.2.

Tab. 1.2 – Nastavení regulátoru podle Kuhnova pravidla

Regulátor	r_0	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K_s}$		
PI normální	$\frac{0,5}{K_s}$	$0,5 \cdot T_\Sigma$	
PI rychlý	$\frac{1}{K_s}$	$0,7 \cdot T_\Sigma$	
PID normální	$\frac{1}{K_s}$	$0,66 \cdot T_\Sigma$	$0,167 \cdot T_\Sigma$
PID rychlý	$\frac{2}{K_s}$	$0,8 \cdot T_\Sigma$	$0,194 \cdot T_\Sigma$

1.2 PLATFORMA ARDUIONO

Arduino je open-source platforma, založená na mikroprocesorech AVR od firmy Atmel. Vývoj této platformy začal v roce 2005 v italském městě Ivrea. Projekt byl pojmenován po Arduinovi Ivrejském, významné historické postavě města. Arduino vytvořili Massimo Banzi

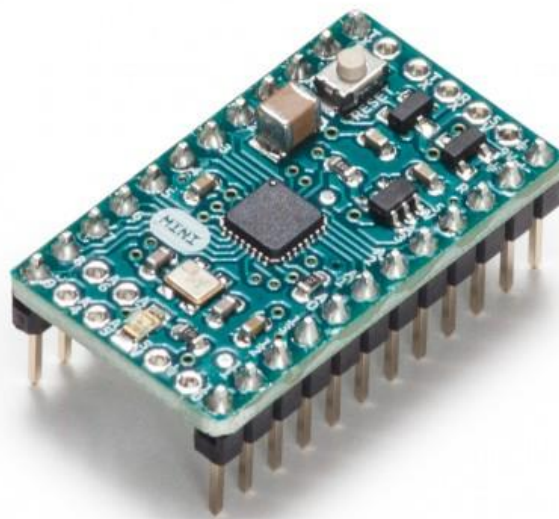
a David Cuartielles jako levný vývojový set pro studenty, kteří si nechtěli pořizovat drahé desky Basic Stamp. Mezi studenty se stal oblíbený, proto se rozhodli poskytnout ho celému světu. Arduino se rozšířilo po celém světě a používá se v mnoha odvětvích od zdravotnictví přes webové servery až po řízení robotů. V této kapitole se vychází z (Arduino, ©2018a; Voda, 2014; Voda, 2015).

Arduino může připomínat Raspberry Pi, ale na rozdíl od této platformy se nejedná o mikropočítač. Raspberry Pi má vlastní operační systém, je výkonnější, ale tím má i vyšší spotřebu. Oproti tomu je Arduino levnější a jednodušší.

Oficiálním vývojovým prostředím je Arduino IDE (Integrated Development Environment). Jedná se o multiplatformní vývojové prostředí dostupné pro Windows, Mac OS a Linux. Pro programování byl vytvořen programovací jazyk Wiring (vychází z programovacího jazyka C++).

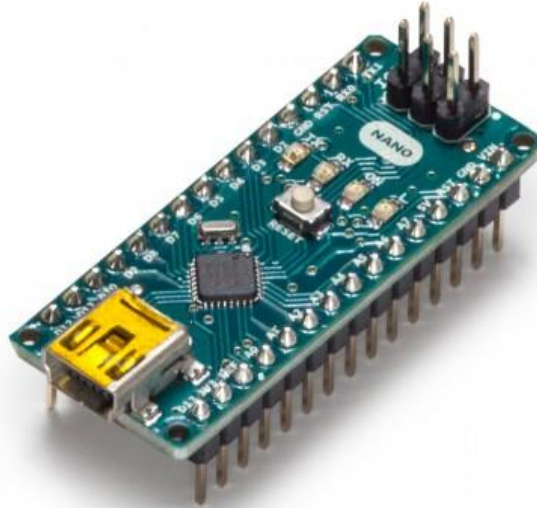
V současné době existuje několik typů desek Arduino. Desky používají typické jednotné grafické zpracování s převažující modrou barvou. Jednotlivé desky se od sebe odlišují svojí velikostí, typem použitého mikrokontroléru, napájecím napětím či počtem vstupně/výstupních pinů. Dalším rozdílem může být také způsob programování, pro některé desky je potřeba externí převodník, protože je nelze připojit přímo k PC.

- **Arduino Mini** je nejmenší ze všech oficiálních desek a je navržena pro úsporu místa. Běží na mikrokontroleru ATmega 328 s taktem 16 Mhz, výkonem tedy nijak nezaostává za většími deskami. Daní za malé rozměry je absence USB portu a převodníku, tím vzniká nutnost programování pomocí externího převodníku. Využívá se zejména tam, kde jsou potřeba malé rozměry např. dálkové ovladače, chytré vypínače apod.



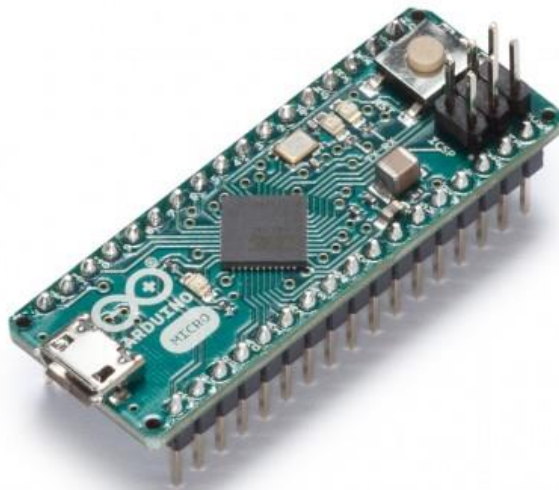
Obr. 1.5 – Arduino Mini (Arduino, ©2018b)

- **Arduino Nano** se velmi podobá předchozí desce. Hlavním rozdílem je přítomnost USB portu a převodníku, čímž odpadá nutnost používat externí převodník pro programování. Díky tomu má, ale také o něco větší rozměry.



Obr. 1.6 – Arduino Nano (Arduino, ©2018c)

- **Arduino Micro** je deska, která obsahuje převodník přímo v čipu (ATmega 32u4). Výhodou této desky je, že po připojení k počítači se tváří jako myš nebo klávesnice. Umožňuje posílat příkazy, jako je stisk klávesy nebo posunutí myši. To je možné i u ostatních desek, ale je nutné přeprogramovat převodník.



Obr. 1.7 – Arduino Micro (Arduino, ©2018d)

- **Arduino Uno** je v dnešní době pravděpodobně nejrozšířenější deska. Tato deska je vybavena procesorem ATmega 328 a má klasické USB. Patří do hlavní vývojové linie.



Obr. 1.8 – Arduino Uno (Arduino, ©2018e)

- **Arduino Mega2560** je rozšířená verze desky Arduino Uno. Díky větším rozměrům je možné využít výkonnější čipy, které přináší větší výpočetní výkon. Pokud se tvoří rozsáhlejší projekty, je pravděpodobné, že počet pinů na Arduino Uno nebude dostačující. Z toho důvodu existují desky, které obsahují daleko větší počet pinů.



Obr. 1.9 – Arduino Mega2560 (Arduino, ©2018f)

- **Rozšiřující desky** (tzv. shieldy) jsou moduly s přídatnými obvody, které lze přímo nasadit na konektory některých vývojových desek platformy Arduino. Nejvyšší počet rozšiřujících desek je pro vývojové desky Arduino Uno a Arduino Leonardo. Většina shieldů je také kompatibilní s Arduino Mega2560, kde zůstane zadní část pinů volná. Některé shieldy lze nasazovat na sebe. Existuje celá řada shieldů např. Ethernet Shield, Wifi Shield, Motor Shield.

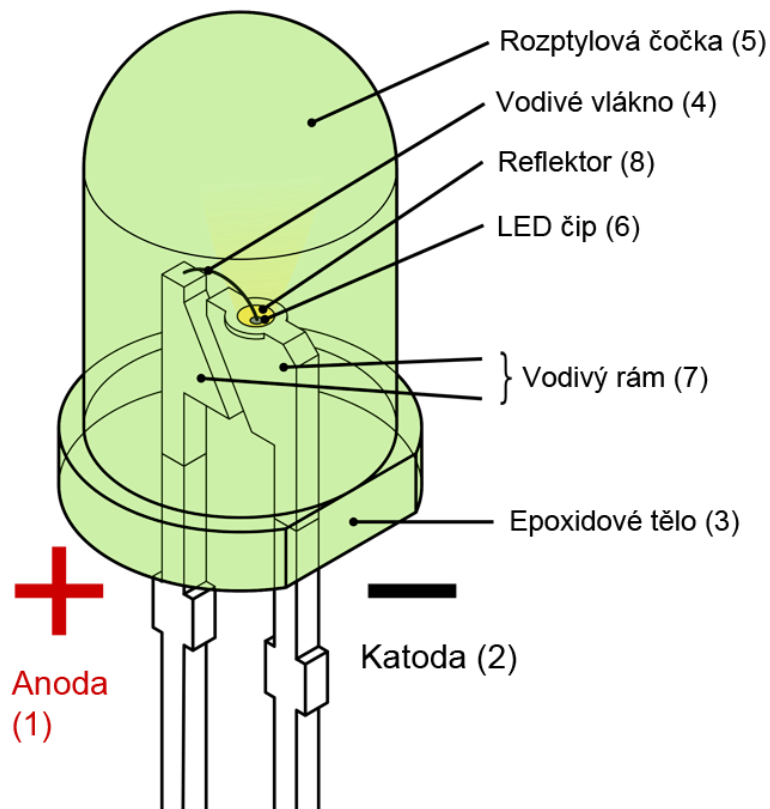


Obr. 1.10 – Arduino Ethernet Shield (Arduino, ©2018g)

1.3 LED DIODA

Zvoleným zdrojem světla pro následné řízení je LED dioda, jedná se o polovodičovou součástku, která obsahuje PN přechod. LED je zkratka anglických slov light emitting diode, do češtiny přeloženo jako dioda vyzařující světlo. Oficiální český název je elektroluminiscenční dioda. Informace v této kapitole byly čerpány z (Doleček, 2005; LED Solution, ©2018).

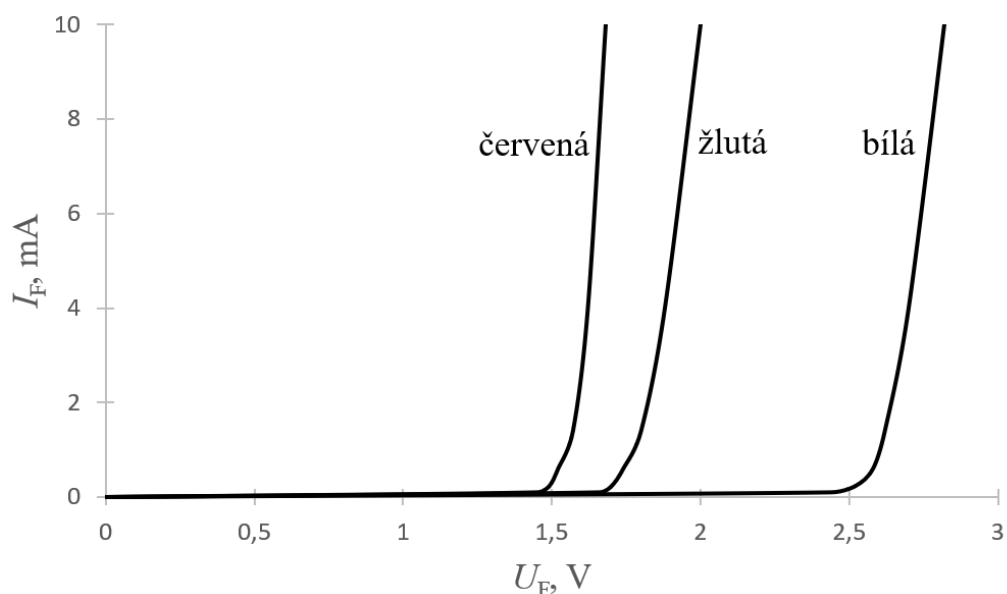
Tato technologie byla vyvinuta v šedesátých letech minulého století, ale k jejich masovému rozšíření dochází až nyní. Náklady na jejich výrobu byly stlačeny na minimum. Díky tomu se během relativně krátké doby rozšířily do mnoha oblastí od LED žárovek, světla automobilů až po vánoční ozdoby.



Obr. 1.11 – Standardní uspořádání LED diody (LED Solution, ©2018)

Průchodem elektrického proudu přes PN přechod LED diody v propustném směru, dochází k rekombinaci (přeskupení) elektronů s dírami. Přitom se uvolňuje energie, která se může vyzářit ve formě fotonu nebo být absorbována v krystalové mřížce a vyzářena ve formě tepelné energie.

Jak je patrné z obr. 1.12, V-A charakteristika LED diody je obdobná charakteristice klasické usměrňovací diody. Rozdíl je ovšem v tom, že LED diody mají různá prahová napětí pro jednotlivé barvy. Prahové napětí je napětí, při kterém dochází k vyzařování světla a přes diodu teče proud, který velmi rychle roste úměrně s napájecím napětím. Z toho důvodu je nutné do obvodu zařadit vždy rezistor pro omezení maximálního proudu, aby nedošlo ke zničení LED diody. Křemíková dioda má prahové napětí 0,5 V. Prahové napětí LED diod se pohybuje mezi 1,5 V až 3,5 V. Velikost prahového napětí je závislá na použitém materiálu.



Obr. 1.12 – V-A charakteristik barevných LED diod

U LED diody na rozdíl od žárovek záleží na polaritě napájecího napětí. Pokud je dioda zapojena v závěrném směru, nevede téměř žádný proud a nevyzařuje žádné světlo. Při zapojení v závěrném směru může dojít k trvalému zničení LED diody, protože průrazné napětí je velmi nízké, informaci o jeho velikosti lze získat z katalogu výrobce.

1.3.1 Základní zapojení LED diod

Pro zvýšení svítivosti je nutné zapojovat více LED diod dohromady. To je možné provést třemi způsoby (MT, 2015a).

Sériové zapojení je zapojení, kde do série k napěťovému zdroji je zapojen jeden rezistor a n LED diod, viz obr. 1.13. Přes všechny LED diody poteče stejný proud, který je nutné omezit předřadným rezistorem. Napětí zdroje se rozloží na jednotlivé prvky obvodu. Nevýhodou tohoto zapojení je to, že počet diod je bohužel omezen velikostí napájecího napětí, které musí být větší než součet prahových napětí LED diod. Rovnice pro výpočet velikosti předřadného odporu R , pro LED diody se stejným prahovým napětím, je dána vztahem

$$R = \frac{U_{\text{nap}} - n \cdot U_d}{I_f}, \quad (1.10)$$

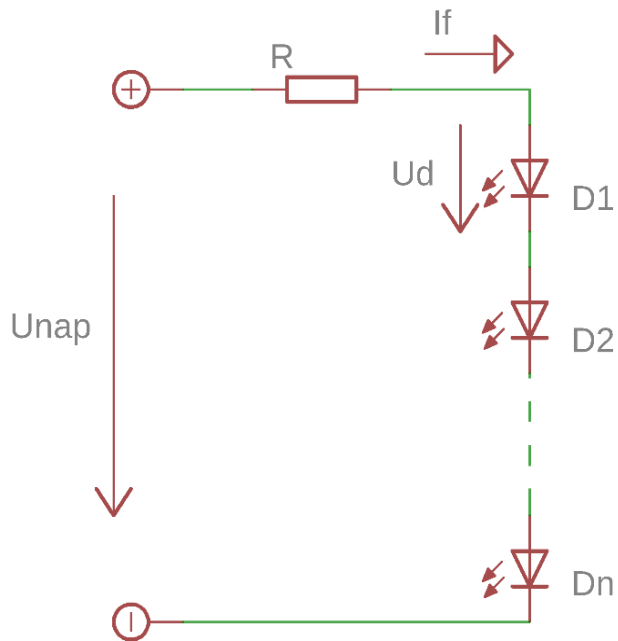
kde R – předřadný odpor, Ω ,

U_{nap} – napájecí napětí, V,

n – počet diod,

U_d – prahové napětí diod, V,

I_f – maximální proud tekoucí přes diody, A.

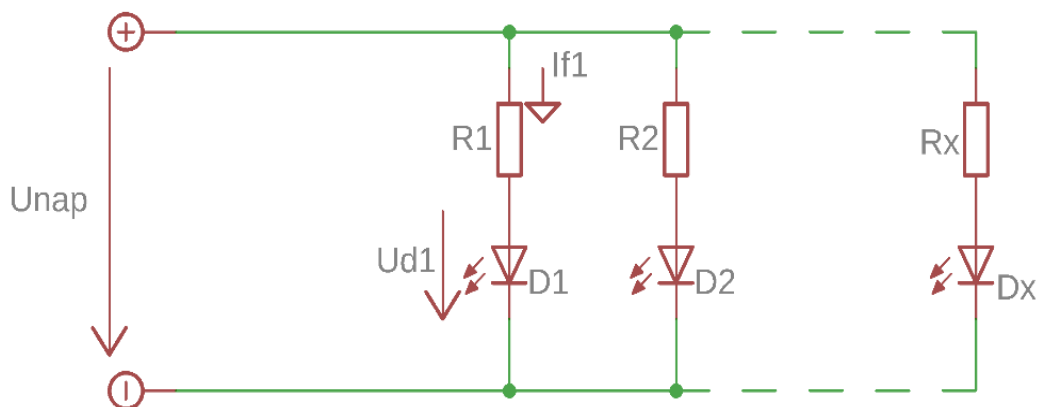


Obr. 1.13 – Sériové zapojení LED diod

Paralelní zapojení je druhou možností, jak LED diody zapojit, viz obr. 1.14. Každá dioda má vlastní předřadný odpor. Ve všech větvích bude stejné napětí. Nevýhodou může být nutnost použít větší množství rezistorů. Pro toto zapojení bude rovnice pro výpočet předřadného rezistoru vyjádřena vztahem

$$R_x = \frac{U_{\text{nap}} - U_{\text{dx}}}{I_{\text{fx}}}, \quad (1.11)$$

- kde R_x – předřadný odpor, Ω ,
 U_{nap} – napájecí napětí, V,
 U_{dx} – prahové napětí diody, V,
 I_{fx} – maximální proud tekoucí diodou, A.



Obr. 1.14 – Paralelní zapojení LED diod

Sérioparalelní zapojení je kombinací dvou předcházejících řešení, viz obr. 1.15. Velmi často se používá v praxi, má svoje výhody, ale i nevýhody. Díky tomuto zapojení je možné zmenšit protékající proud proti paralelnímu zapojení, ale musíme počítat s větším napájecím napětím. Pokud použijeme diody se stejným prahovým napětím, je možné předřadný odpor vyjádřit vztahem

$$R_1 = \frac{U_{\text{nap}} - n \cdot U_d}{I_{f1}}, \quad (1.12)$$

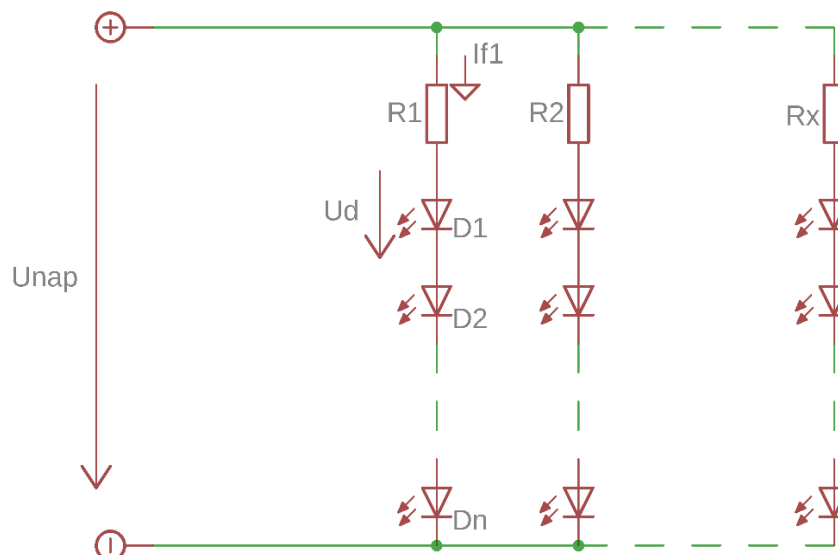
kde R_1 – předřadný odpor, Ω ,

U_{nap} – napájecí napětí, V,

n – počet diod ve větvi,

U_d – prahové napětí diod, V,

I_{f1} – maximální proud tekoucí přes diody, A.



Obr. 1.15 – Sérioparalelní zapojení LED diod

1.4 OPTOELEKTRONICKÉ PRVKY

Optoelektronické prvky jsou zařízení, která jsou schopná přeměnit optické záření na odpovídající elektrický signál. Informace o optoelektronických prvcích byly čerpány z (Doleček, 2005). Vyrábí se s různými vlastnostmi, díky tomu mohou pracovat v různých oblastech světelného záření od ultrafialového záření po záření infračervené.

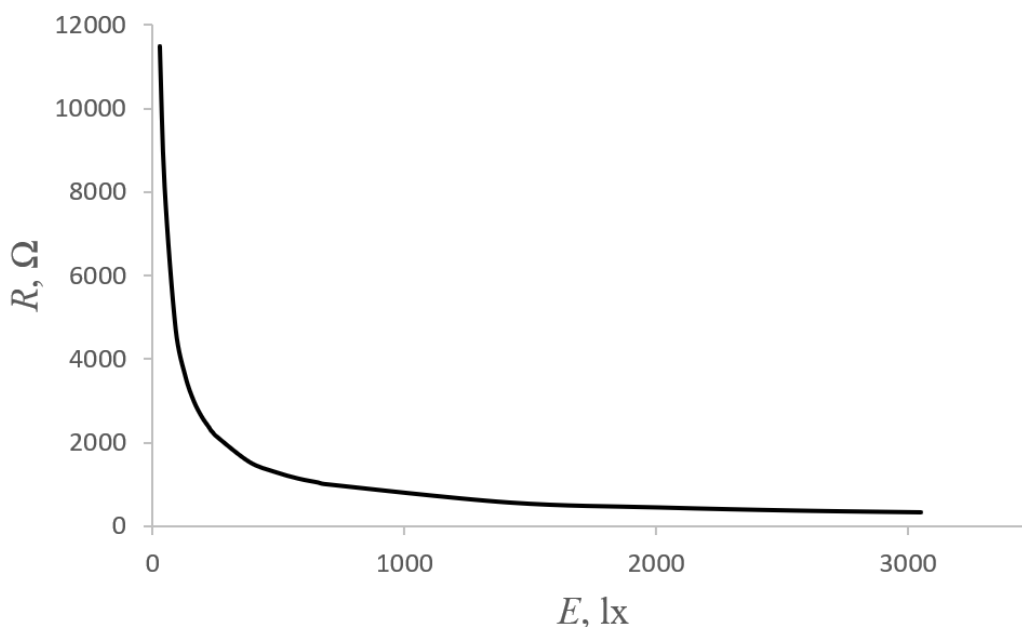
Veličinou, kterou je možné pomocí optoelektronických prvků měřit, je osvětlení E , jednotkou je lux. Osvětlení je definováno jako celkový světelný výkon, který kolmo dopadne na jednotku plochy (Reichl, ©2006–2018).

1.4.1 Fotorezistor

Fotorezistor je polovodičový prvek bez přechodu PN, který v závislosti na dopadajícím světle snižuje svoji elektrickou vodivost vlivem fotoelektrického jevu. Velikost odporu není závislá na směru protékajícího proudu. Největší odpor má fotorezistor ve tmě, s rostoucí intenzitou světla velikost odporu klesá. Fotorezistory jsou navrženy tak, aby se dosáhlo velkého poměru odporu za tmy k odporu při osvětlení, jsou velmi tepelně závislé (Koutný, 2009a).

Fotorezistory mají typicky pomalou odezvu na změnu osvětlení, která se mění podle velikosti intenzity osvětlení. S rostoucí velikostí osvětlení se odezva rezistorů zrychluje. Rychlost odezvy závisí na použitém materiálu.

Na obr. 1.16 je zobrazena grafická závislost odporu R na osvětlení E , jedná se o exponenciální funkci.



Obr. 1.16 – Závislost odporu na osvětlení

Výhodou fotorezistorů je jejich snadné použití, nízká cena a mohou pracovat jak se stejnosměrným, tak i střídavým napětím. Nevýhodou je značná teplotní závislost, která se mění s intenzitou osvětlení a poměrně dlouhá doba odezvy v porovnání s fotodiodami. Fotorezistory se vyrábí v mnoha různých provedeních, viz obr. 1.17.



Obr. 1.17 – Příklady fotorezistorů (Gg1, 2014; PS electronic, 2010?)

1.4.2 Fototranzistor

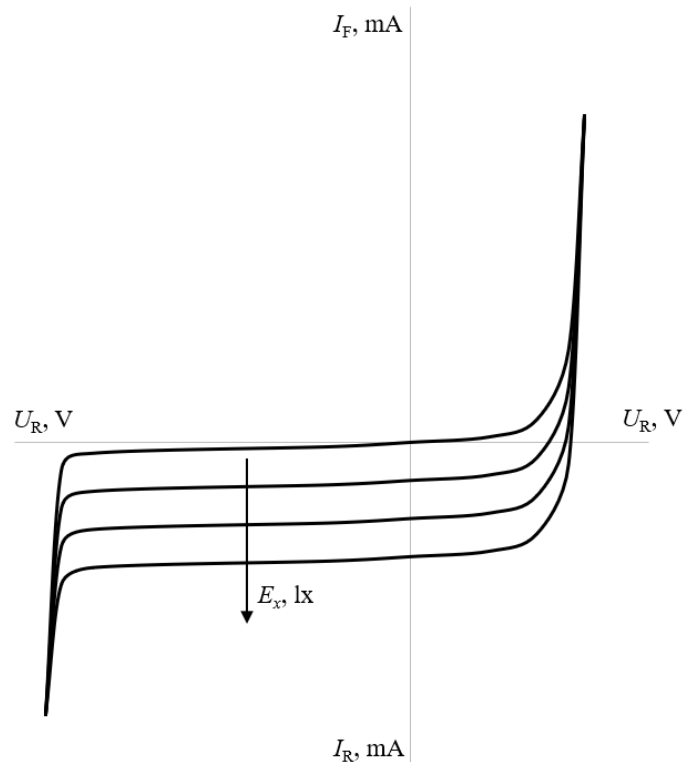
Fototranzistor je tranzistor, který se řídí intenzitou dopadajícího optického záření. Vyrábí se ve dvou provedeních, a to bez bázevého vývodu nebo s bázevým vývodem. Častějším provedením je bez bázevého vývodu, kde místo bázevé nožičky je okénko na PN přechod. Světlo dopadající na tento přechod otevírá fototranzistor, stejně jako bázevý proud u normálního tranzistoru. Fototranzistory s bázevým vývodem je možné kromě řízení změnou intenzity osvětlení, řídit i velikostí elektrického signálu přivedeného do báze. To umožňuje nastavení citlivosti.



Obr. 1.18 – Fototranzistor (OFFICIAL ELECTRONIC, 2008?)

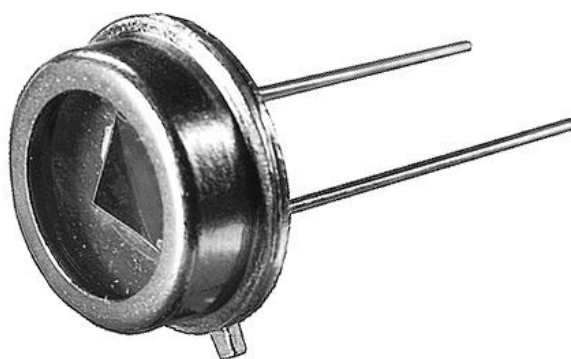
1.4.3 Fotodioda

Fotodioda ke své činnosti využívá vlastnosti PN přechodu. PN přechod je upraven tak, aby na něj mohlo dopadat optické záření, díky tomu je možné takto upravenou diodu použít jako fotocitlivou součástku. Z charakteristiky, která je zobrazena na obr. 1.19, je vidět, že fotodiody mohou pracovat ve třech režimech.



Obr. 1.19 – Charakteristika fotodiody

V I. kvadrantu má fotodioda podobnou charakteristiku jako normální usměrňovací dioda, ale v tomto režimu se nepoužívá. Ve III. kvadrantu se chová podobně jako fotorezistor, její elektrický odpor je závislý na intenzitě dopadajícího světla, jedná se o tzv. odporový (fotovodivostní) režim. Dioda je v tomto režimu zapojena do série se zatěžovacím rezistorem, tvoří napěťový dělič. Výhodou tohoto zapojení je rychlá odezva na změnu osvětlení řádově 10^{-6} s až 10^{-9} s. Tento princip zapojení se používá k měření a detekci optického záření. Ve IV. kvadrantu dioda dodává proud do připojené zátěže a funguje jako zdroj elektrického proudu, takovému režimu se říká hradlový (fotovoltaický) režim. Nevýhodou fotodiody je jejich vysoká cena a nelze je použít ve střídavých obvodech (Koutný, 2009b).

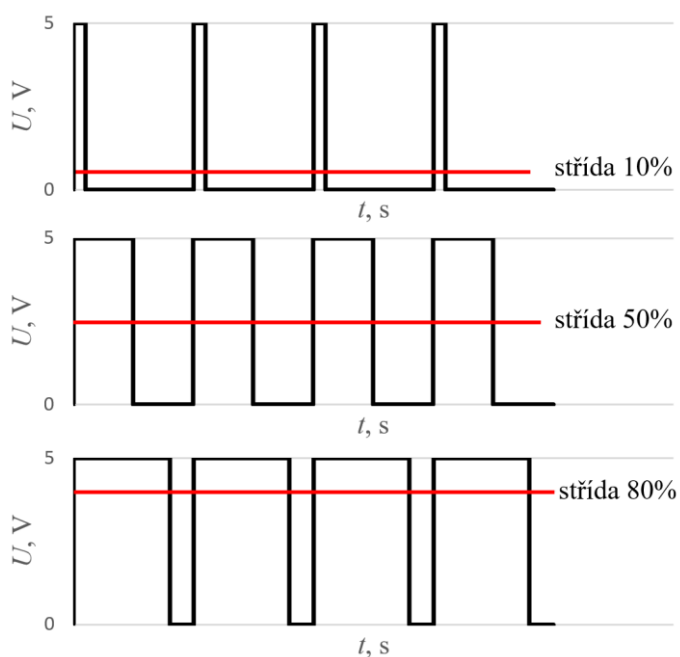


Obr. 1.20 – Fotodioda (DISTRELEC. ©2018)

1.5 PULZNĚ ŠÍRKOVÁ MODULACE – PWM

Pulzně šířková modulace je diskretní modulace, která umožňuje přenos analogového signálu pomocí signálu digitálního. Tento druh modulace se běžně používá ve výkonové elektronice. Jedná se o bezeztrátový způsob řízení výkonu, a proto je vhodný pro řízení rychlosti otáčení stejnosměrných motorů nebo pro řízení jasu světelných zdrojů (MT, 2015b).

Jak je patrné z obr. 1.21, signál může nabývat pouze dvou hodnot, a to logická 0 nebo logická 1, hodnoty tedy představují vypnutí nebo sepnutí zdroje napětí, proudu atd. Důležitým parametrem PWM je střída signálu, jedná se o poměr mezi stavem logická 1 ku celé periodě signálu. Může nabývat hodnot 0 až 1, těmto hodnotám potom odpovídá výstupní výkon od 0 % do 100 %. Délka pulzu ve stavu logická 1 se nazývá šířka pulzu (MT, 2015b).



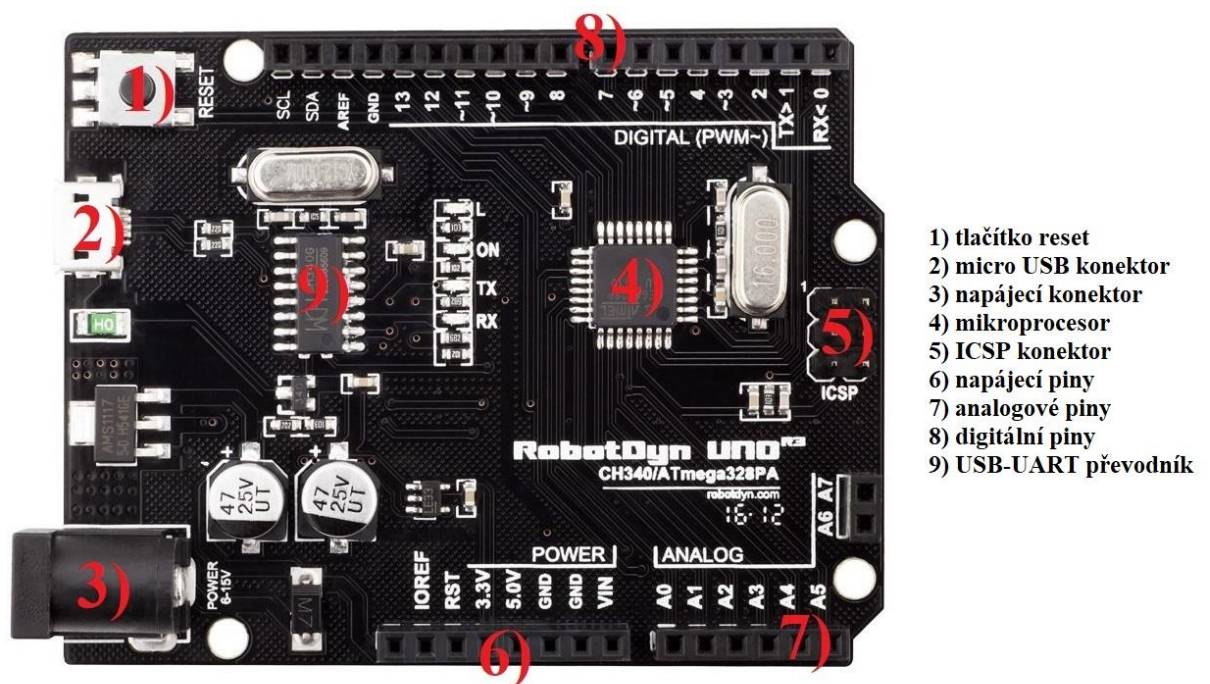
Obr. 1.21 – Příklady pulzně šířkové modulace

2 REALIZACE REGULAČNÍHO OBVODU

2.1 HARDWAROVÁ PLATFORMA ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Jako řídicí systém soustavy pro udržování požadované úrovně osvětlení byla zvolena univerzální vývojová platforma Arduino.

Konkrétně byl pro účely praktické části bakalářské práce zvolen klon desky Arduino Uno rev3, který se nazývá RobotDyn UNO. Deska je osazena 8-bitovým mikrokontrolérem ATmega 328P. Kromě mikrokontroléru se na desce také nachází krystalový oscilátor 16 MHz, 14 digitálních vstupně/výstupních pinů, z nichž 6 může být použito jako PWM výstup, 8 analogových vstupů, ICSP konektor, napájecí konektor, micro USB port a resetovací tlačítko. Dále je na desce USB-UART převodník CH340G, který umožňuje sériovou komunikaci přes micro USB port. Přehledné informace o tom, co se na desce nachází, je vidět na obr. 2.1.



Obr. 2.1 – Popis desky RobotDyn UNO (RobotDyn, ©2014–2018)

Deska se napájí přes micro USB port z počítače nebo z externího zdroje. Způsob napájení se volí automaticky. Pro externí napájení je možné použít síťový adaptér nebo baterie, připojují se přes souosý napájecí konektor s průměrem středového kolíku 2,1 mm. Baterie je také možné připojit přes piny VIN a GND.

Externí napájecí napětí může být v rozsahu 6 až 12 voltů. Při napětí menším než 7 V nemusí spolehlivě pracovat vnitřní stabilizátor a deska může být nestabilní. Při napětí větším

než 9 V může dojít k přehřátí stabilizátoru a poškození desky. Doporučený rozsah napětí je proto mezi 7 až 9 volty.

Mikrokontrolér je vybaven 10 bitovým analogově digitálním převodníkem. Převodník tedy rozděluje referenční napětí na 1024 hodnot. Standardní rozsah je 0 až 5 voltů. Horní hranici lze změnit připojením napětí na pin AREF.

Programování desky je velice jednoduché, na desce je již naprogramován zavaděč, a tak je program přímo nahrán přes micro USB z vývojového prostředí Arduino bez použití externího programátoru. Program je možné nahrát i přes externí programátor pomocí rozhraní ICSP (In-Circuit Serial Programming). Přes rozhraní micro USB může také probíhat komunikace mezi Arduinem a počítačem. Vývojové prostředí obsahuje sériový monitor, který umožňuje přijímat a odesílat data. Součástí vývojového prostředí je i sériový plotter, který umožňuje zobrazovat přijaté číselné hodnoty v grafu v závislosti na čase.

2.2 ŘÍZENÁ SOUSTAVA A ROZHRANÍ PRO PŘIPOJENÍ K ŘÍDICÍ DESCE

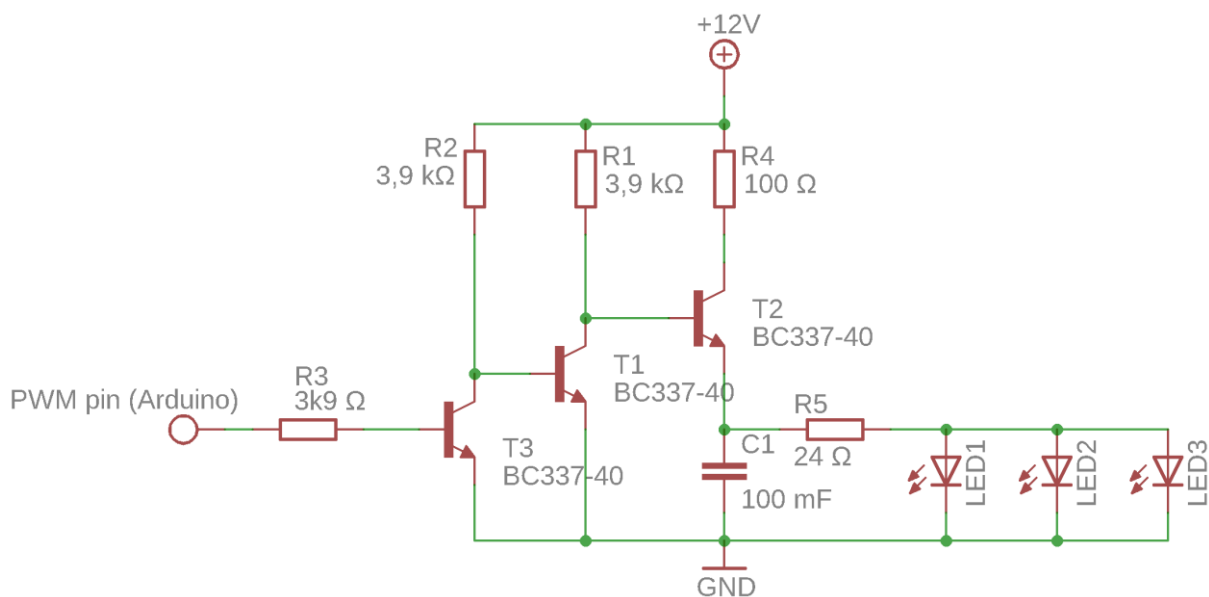
Řízená soustava je realizována pomocí tří SMD LED diod 5050. LED dioda 5050 se skládá ze tří menších LED čipů, které jsou umístěny do jednoho pouzdra. Číslo 5050 v názvu udává pouze velikost pouzdra v milimetrech, pouzdro má tedy rozměry 5,0 mm x 5,0 mm. Předností pouzdra je dobrá svítivost při málem rozměru a rozptyl světla 120°.

Jednotlivé LED čipy v pouzdře mají prahové napětí 3 V. Pouzdra jsou napájena na plošném spoji a LED čipy jsou zapojeny do série. Každý plošný spoj je tedy nutné napájet 9 V. Výstupy RobotDyna poskytují maximálně napětí 5 V a jsou proudově omezeny na 20 mA, proto bylo nutné pro napájení diod použít externí zdroj napájení. Externí zdroj se přes pomocný obvod spíná pomocí PWM signálu z RobotDyna. Navržený obvod je tvořen bipolárními tranzistory BC337-40 a rezistory. Externí 12 V napájecí zdroj se k desce připojuje přes souosý napájecí konektor s průměrem středového kolíku 2,1 mm. LED diody na změnu akční veličiny reagují téměř skokovou změnou, proto byl do obvodu také zařazen kondenzátor C1 s kapacitou 10 mF. Kondenzátor je nabíjen přes rezistor R4 s odporem 100 Ω. Doba nabíjení kondenzátoru je dána vztahem

$$\tau = R \cdot C = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ s}, \quad (2.1)$$

jedná se o časovou konstantu přechodového děje.

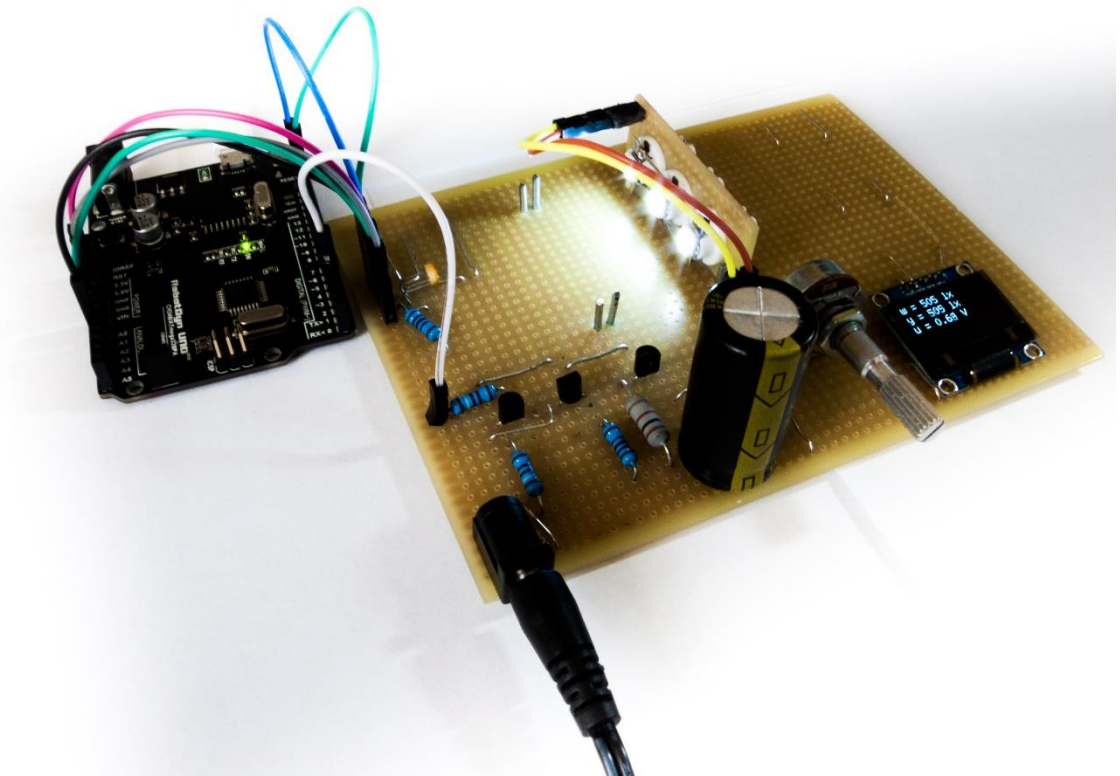
Schéma navrženého obvodu je na obr. 2.2. Pro zpracování schématu byl použit software EAGLE. Navržený obvod je realizován na univerzálním plošném spoji. Zhotovená deska je na obr. 2.3. Součástí desky je potenciometr pro nastavení žádané hodnoty osvětlení a senzor osvětlení, který je blíže popsán v kapitole 2.3. Na desce je také umístěna zobrazovací jednotka, která je blíže popsána v kapitole 2.4. Kompletní zapojení včetně potenciometru, zobrazovací jednotky a senzoru osvětlení je v příloze B bakalářské práce. V tab. 2.1 jsou uvedeny piny, které jsou na RobotDynu využity.



Obr. 2.2 – Schéma zapojení LED diod k řízené soustavě

Tab. 2.1 – Přehled zapojení pinů

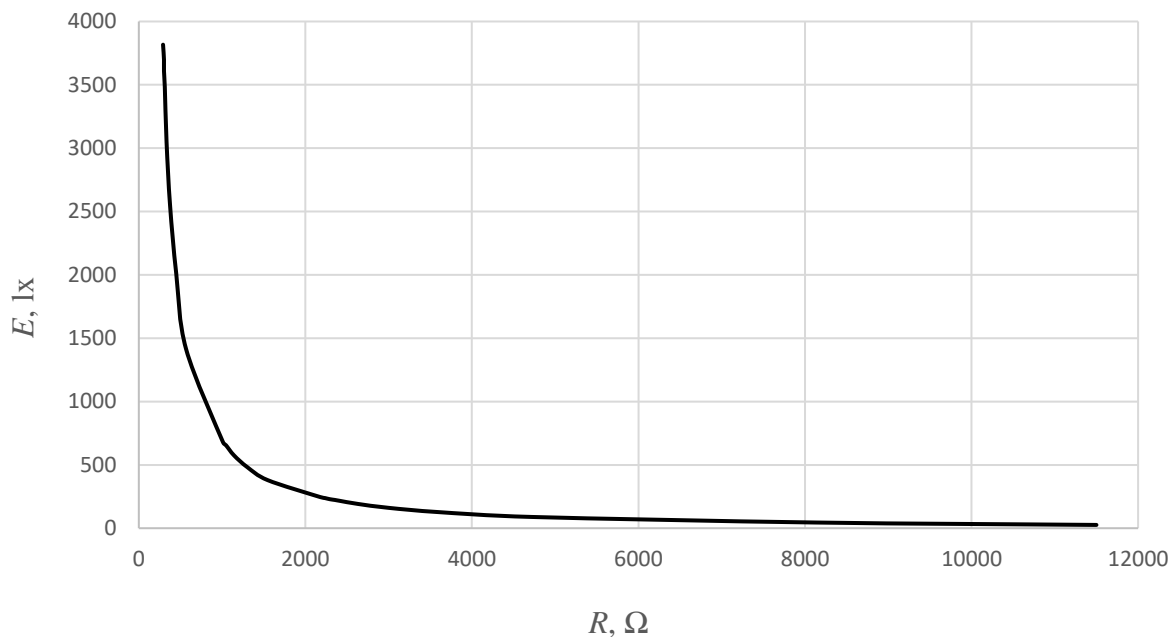
Zařízení	Číslo pinu na RobotDynu
Potenciometr	A1
Senzor osvětlení	A0
PWM	D3
SCK displeje	SCL
SDA displeje	SDA



Obr. 2.3 – Zhotovená deska s RobotDynam

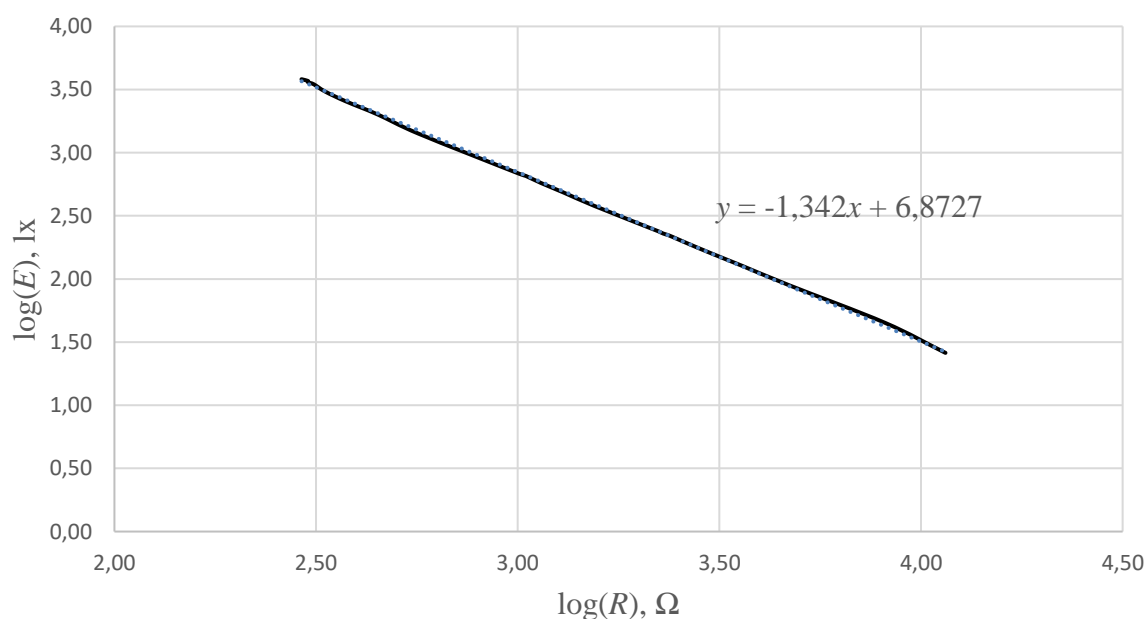
2.3 SENZOR OSVĚTLENÍ

Senzor osvětlení je realizován pomocí fotorezistoru VT93N2. Tento fotorezistor má při úplné tmě odpor 500 k Ω . Pro realizaci senzoru bylo nejdříve nutné kalibrovat fotorezistor, získat závislost osvětlení na odporu fotorezistoru. Fotorezistor byl umístěn do nepájivého pole a připojen k multimetru, který měřil odpor R fotorezistoru. Vedle fotorezistoru byl umístěn snímač osvětlení BH1750 pro měření osvětlení E . Snímač osvětlení BH1750 je schopen měřit intenzitu osvětlení v rozsahu 1 až 65535 lx, podle zvoleného nastavení je možné měřit s přesností 1 až 4 lx. Na oba senzory dopadala stejná úroveň osvětlení. Změřené hodnoty byly zpracovány pomocí tabulkového procesoru MS Excel. Tento proces se opakoval pro několik různých úrovní osvětlení od velmi tmavých až po velmi jasné. Ze získaných dat byl sestrojen graf (obr. 2.4) závislosti osvětlení na odporu.



Obr. 2.4 – Závislost osvětlení na odporu

Z grafu na obr. 2.4 je vidět, že odpor se zmenšuje v závislosti na osvětlení exponenciálně, rovnici této funkce z grafu můžeme získat pomocí funkce tabulkového procesoru MS Excel spojnice trendu. Dalším řešením je převedení grafu do logaritmického měřítka, kde se získá přímka, viz obr. 2.5. Rovnici přímky lze určit ze dvou různých bodů umístěných na přímce nebo proložením naměřených hodnot lineární spojnicí trendu.



Obr. 2.5 – Závislost osvětlení na odporu v logaritmickém měřítku

Rovnice přímky na obr. 2.5 je dána vztahem

$$\log_{10}(E) = -1,342 \cdot \log_{10}(R) + 6,873, \quad (2.2)$$

ale pro určení osvětlení E , je potřeba vyjádřit samotné osvětlení. Toho je možné docílit pomocí algebraických úprav. Použitím obecného tvaru rovnice (2.1), byl získán vztah

$$\log_{10}(y) = a \cdot \log_{10}(x) + b, \quad (2.3)$$

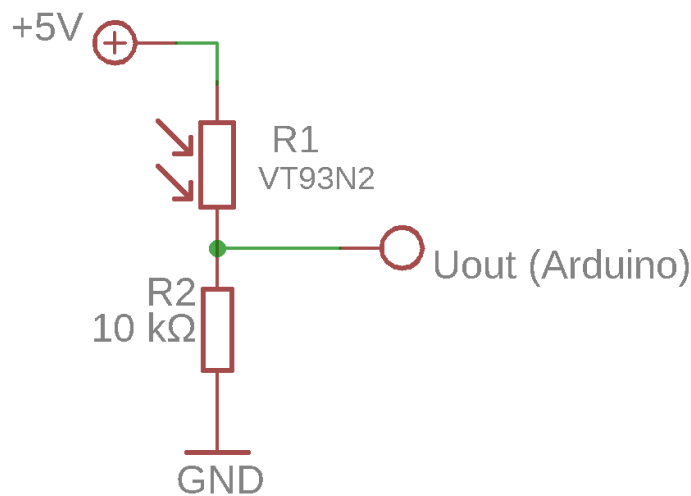
který je možné upravit

$$y = 10^{a \cdot \log_{10}(x) + b} = 10^{(\log_{10}(x))^a} \cdot 10^b = x^a \cdot 10^b. \quad (2.4)$$

Dosažením hodnot z rovnice (2.2) do rovnice (2.4), byl získán vztah pro osvětlení

$$E = R^{-1,342} \cdot 10^{6,873}. \quad (2.5)$$

Schéma zapojení senzoru pro snímání osvětlení je zobrazeno na obr. 2.6. Zapojení vychází z děliče napětí. Napájecí napětí 5 V se rozdělí mezi fotorezistor R1 a rezistor R2. Napětí U_{out} (napětí na rezistoru R2) je přivedeno na analogový vstup A0 RobotDyna.

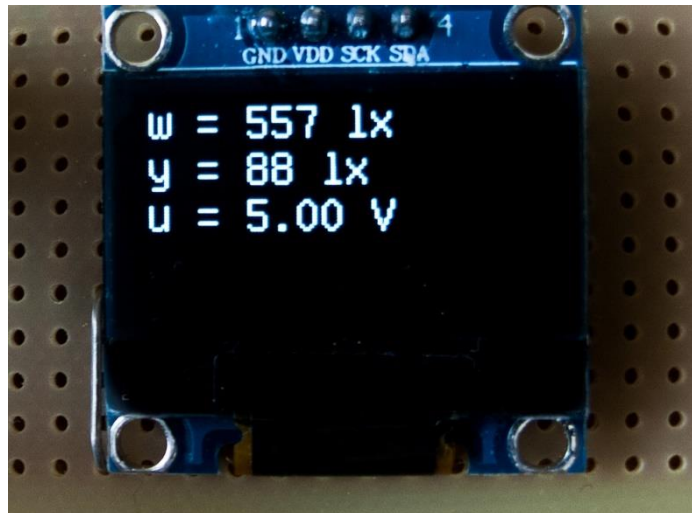


Obr. 2.6 – Zapojení fotorezistoru

2.4 ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKA

Jako zobrazovací jednotka byl použit OLED displej s bílými znaky. V porovnání s LCD displeji má mnoho výhod. Mezi tyto výhody patří vyšší rozlišení či nižší spotřeba. Nižší spotřeby je docíleno tím, že u OLED displeje svítí pouze ty body, které jsou aktivovány. Zároveň vyniká dobrou čitelností. Komunikace s řídicí deskou probíhá po rozhraní I2C. Displej má úhlopříčku 0,96 palce a rozlišení 128 x 64 pixelů. Cena displeje se pohybuje kolem 50 Kč.

OLED displej se k řídicí desce připojuje pomocí 4 vodičů. Pro správnou funkci je potřeba propojit VDD s napájením 5 V, GND se zemí, SCK s pinem SCL a SDA s pinem SDA na řídicí desce. Na displeji se zobrazuje žádaná hodnota w , regulovaná veličina y a hodnota akčního zásahu u , viz obr. 2.7.



Obr. 2.7 – Zobrazovací jednotka

2.5 PROGRAMOVÁ ČÁST ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Program pro regulátor byl vytvořen ve vývojovém prostředí Arduino IDE. Každý program psaný v Arduino IDE musí obsahovat dvě hlavní funkce. Tedy i když neobsahují žádné příkazy. První z nich je funkce `setup()`, která se provede pouze jednou na začátku programu. Ve funkci se provádí inicializace. Druhou funkcí je funkce `loop()`, do které se umísťuje kód, který se provádí neustále dokola až do odpojení napájení.

Na začátku programu před funkcí `setup()` jsou pro lepší přehlednost definovány piny pro připojení jednotlivých částí regulačního obvodu a deklarovány proměnné pro signály, proměnné pro měření osvětlení a konstanty regulátoru. Je zde také načtena knihovna pro displej.

Funkce `setup()` na obr. 2.8 obsahuje inicializaci pinů a konfiguraci přerušení od časovače. Inicializace pinů se provádí pomocí funkce `pinMode()`, která se skládá ze dvou parametrů. První parametr určuje pin, který konfigurujeme a druhý parametr nastavuje směr INPUT jako vstupní pin nebo OUTPUT jako výstupní pin.

Časovač pracuje v režimu CTC, který časuje od hodnoty 0 do hodnoty registru OCR1A. Při shodě registru TCNT1 a OCR1A dojde k vyvolání přerušení a vynulování registru TCNT1. Frekvence čítání je odvozena od frekvence mikrokontroléru (16 Mhz). K přerušení by docházelo maximálně každé 4 milisekundy, proto je použita dělička, která je schopna frekvenci snížit.


```

void setup() {
  pinMode(FOT_PIN, INPUT);
  pinMode(POT_PIN, INPUT);
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT);

  cli();          //zakáže všechny přerušení
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0;
  TCNT1 = 0;     // inicializace časovače na 0
  // nastavení registru na frekvenci 34 milisekundy
  OCR1A = 16000000 / ((1 / T) * 1024) - 1 ;
  // zapne CTC mód
  TCCR1B |= (1 << WGM12);
  // nastavení děličky na 1024
  TCCR1B |= (1 << CS12) | (1 << CS10);
  // zapnutí časovače
  TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
  sei();        //povolí všechny přerušení
}

```

Obr. 2.8 – Funkce setup()

Za funkcí setup() se nachází vektor přerušení od časovače, který se provede vždy, když dojde ke shodě registru TCNT1 a OCR1A. K přerušení dochází periodicky každých 34 ms (vzorkovací perioda). Ve funkci přerušení se nastavuje pouze logická proměnná pom na true.

Hlavní program je umístěn ve funkci loop() na obr. 2.9. Skládá se ze dvou podmínek. První podmínka se provede, když se proměnná pom rovná true, ta se nastavuje v přerušení. V podmínce se volají tři funkce. Funkce pro měření žádané veličiny, regulované veličiny a regulace. Po provedení se pom nastaví na false a program dál běhá v cyklu loop(), dokud znovu nedoje k přerušení a nastavení proměnné pom na true.

V druhé podmínce se využívá funkce millis(), která vrací počet milisekund od startu Arduina. Ke splnění podmínky dochází přibližně každých 100 ms. V podmínce se volá funkce pro zobrazení naměřených dat na OLED displej.

```

void loop() {
  if ( pom == true) {
    w = zmer_w();
    y = zmer_y();
    regulace(w, y);
    pom = false;
  }

  if ( millis() > (100 + citac) ) {
    Oled.firstPage(); // označuje začátek smyčky
    do {
      vykresli(); // funkce vykreslí vykreslí žádaný obsah
    } while( Oled.nextPage() ); // označuje konec smyčky

    citac = millis();
  }
}

```

Obr. 2.9 – Funkce loop()

Pro určení hodnoty osvětlení je potřeba znát odpor fotorezistoru, ale RobotDyno měří pouze napětí, proto je třeba provést několik výpočtů, viz obr. 2.10. Pomocí funkce `analogRead()` je získána digitální reprezentace analogového napětí na rezistoru R2. Ze znalosti maximálního rozsahu 1023 převodníku a referenčního napětí 5 V, je vypočítána analogová hodnota napětí na rezistoru R2. Napětí na fotorezistoru je dáno rozdílem referenčního napětí 5 V a napětí na rezistoru R2. Na základě znalosti napětí a odporu rezistoru R2 a napětí fotorezistoru, je vypočítán odpor fotorezistoru. Získaná hodnota odporu fotorezistoru je dosazena do rovnice (2.5) a tím se získá příslušná hodnota osvětlení E v luxech.

```
// Funkce měření regulované veličiny
float zmer_y() {
    y = analogRead(FOT_PIN); // čte hodnotu U na R2
    // převede digitální reprezentaci U na analogovou
    U1 = (float) y / 1023 * 5;
    U2 = 5 - U1; // výpočet napětí na fotorezistoru
    y = U2 / U1 * 10000; // výpočet odporu fotorezistoru
    y = pow(10, 6.873)*pow(y, -1.342); // výpočet osvětlení E
    return y;
}
```

Obr. 2.10 – Výpočet intenzity osvětlení

Funkce regulace na obr. 2.11 má dva vstupní parametry žádanou hodnotu w a regulovanou veličinu y . Nejdříve je vypočítána hodnota regulační odchylky podle rovnice (1.1). Pro výpočet akčního zásahu byl zvolen polohový tvar PID regulátoru (rovnice (1.4) a (1.5)). Vypočítaný akční zásah se pomocí funkce `omezeni()` omezí na maximální rozsah od 0 do 255, respektive 0 V až 5 V.

```
// Funkce regulátoru
void regulace(float w, float y) {
    e = w - y; // výpočet regulační odchylky
    // polohový tvar PID regulátoru
    u = r0 * ( e + T/Ti * S + Td/T * (e - ep) ); // výpočet akčního zásahu
    S = S + (e + ep)/2;
    ep = e;

    u = omezeni(u, 0, 255); //omezení akční veličiny na rozsah 0 až 255
    analogWrite(LED_PIN, u);
}

// Funkce pro omezení akčního zásahu
float omezeni(float x, float x_min, float x_max) {
    if (x < x_min) { x = x_min; }
    if (x > x_max) { x = x_max; }
    return x;
}
```

Obr. 2.11 – Funkce regulace()

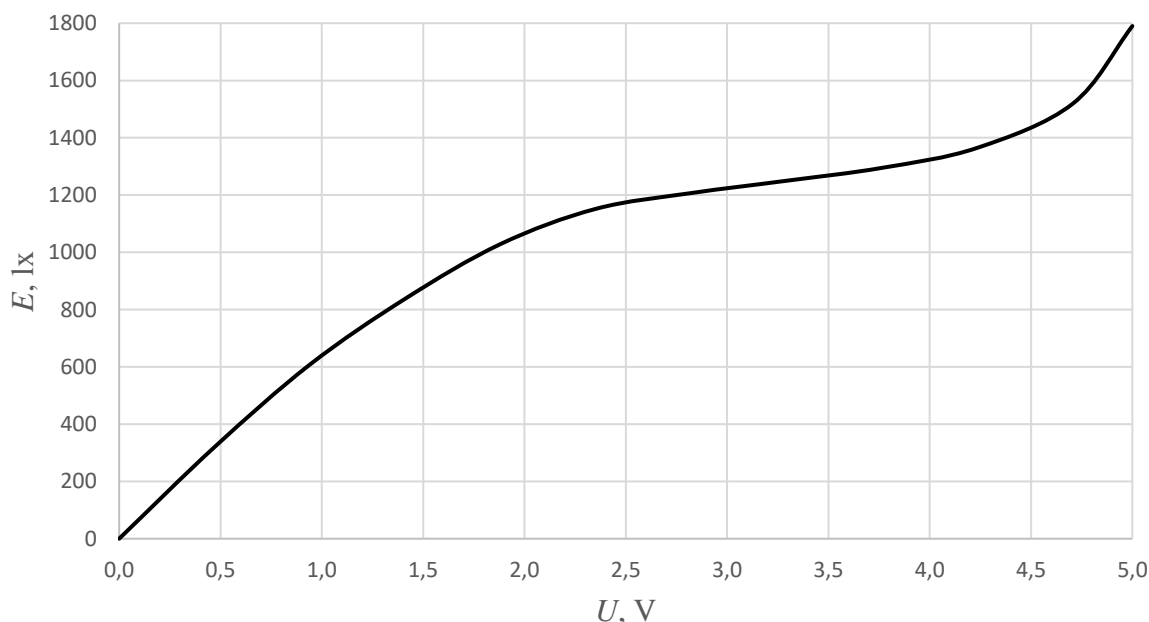
Kompletní zdrojový kód je uveden v příloze A bakalářské práce.

3 IDENTIFIKACE SOUSTAVY A NASTAVENÍ REGULÁTORU

3.1 IDENTIFIKACE SOUSTAVY

3.1.1 Statická charakteristika

Statická charakteristika je závislost výstupní veličiny systému na vstupní veličině systému v ustáleném stavu. Pracovní rozsah od 0 V do 5 V byl rozdělen na 10 bodů s krokem 0,49 V. Doba pro ustálení osvětlení byla stanovena na 15 s, po uplynutí této doby se změřila hodnota osvětlení a zaznamenala do tabulky. Stejně tak pro ostatní body. Z naměřených hodnot byla sestavena statická charakteristika na obr. 3.1, je patrné, že se jedná o nelineární systém.



Obr. 3.1 – Statická charakteristika systému

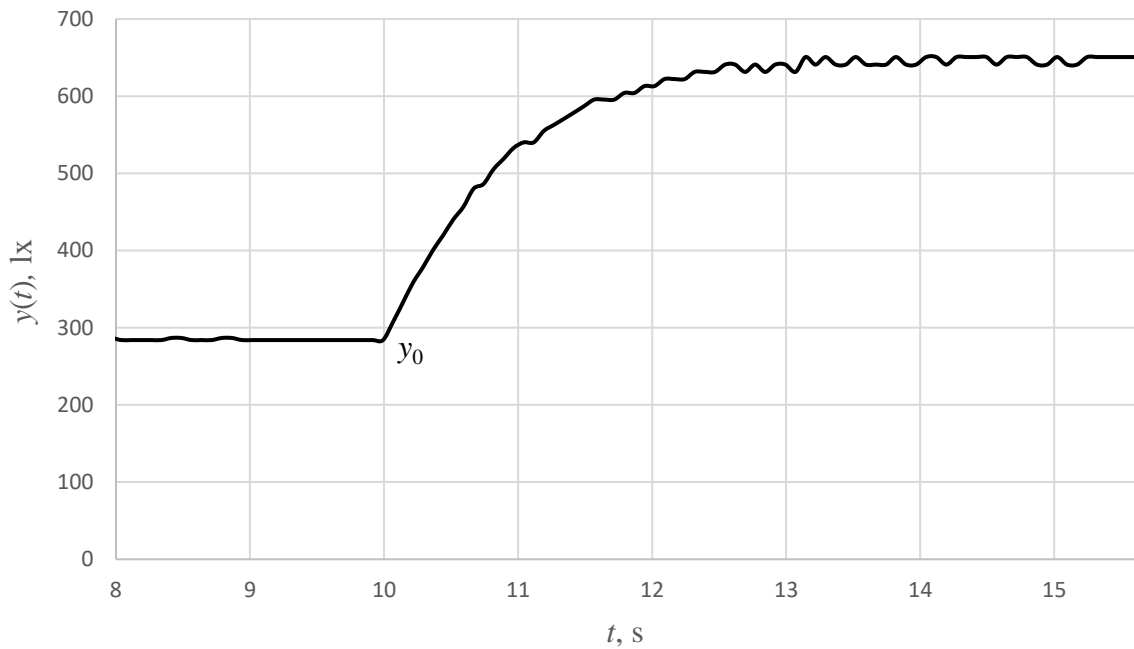
Návrhy regulátorů fungují pro lineární systémy. Existuje několik přístupů, jak tento problém vyřešit pro nelineární systémy. První z možností je použít linearizaci statické charakteristiky a získat přímkovou závislost. Nevýhodou je zavedení odchylek od skutečného průběhu statické charakteristiky.

Druhá možnost je omezit pracovní rozsah na lineární oblast. Regulátor bude pracovat pouze v lineární oblasti pracovního rozsahu.

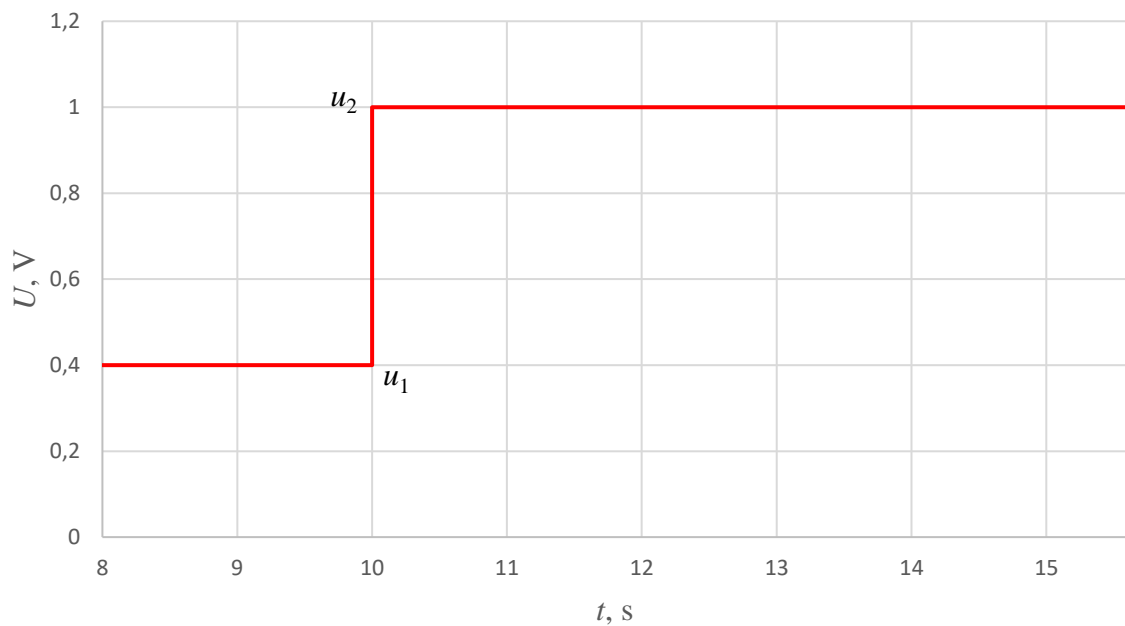
Třetí možnost je rozdělit pracovní rozsah na lineární části a pro každou část navrhnout vlastní regulátor. Regulace probíhá v celém pracovním rozsahu přepínáním těchto regulátorů.

3.1.2 Přejchodová charakteristika

Před získáním přechodové charakteristiky bylo nejdříve nutné najít vhodnou lineární pracovní oblast. Zvolená lineární oblast je od 0 V do 1,5 V. V čase 10 s byla v této oblasti provedena skoková změna digitální hodnoty napětí z 20 na 51, to odpovídá změně napětí z 0,4 V na 1 V. Na obr. 3.2 je zobrazena reakce systému na skokovou změnu akční veličiny, která je zobrazena na obr. 3.3.



Obr. 3.2 – Reakce systému na skokovou změnu akční veličiny



Obr. 3.3 – Skoková změna akční veličiny

Posunutím času, kdy dojde ke skokové změně akční veličiny do počátku souřadnicového systému a díky linearitě pro přechodovou funkci platí

$$h(t) = \frac{y(t) - y_0}{u_2 - u_1}, \quad (3.1)$$

kde $h(t)$ – přechodová funkce,

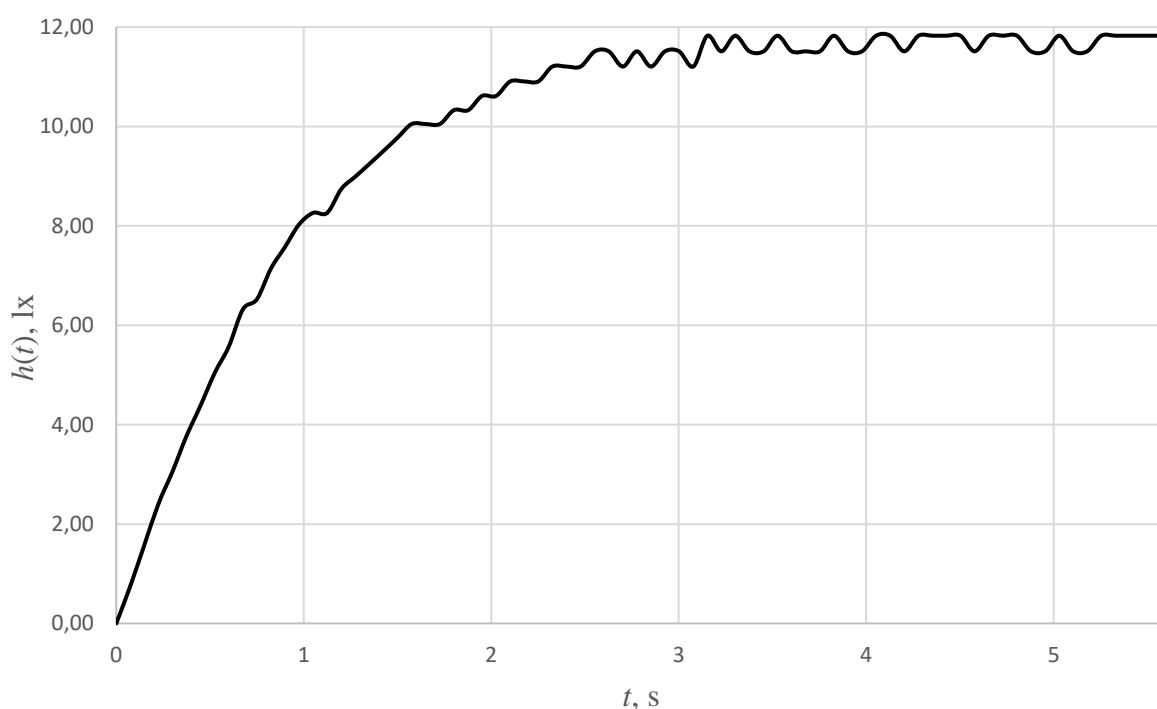
$y(t)$ – hodnota regulované veličiny,

y_0 – počáteční hodnota regulované veličiny,

u_1 – počáteční hodnota akční veličiny,

u_2 – hodnota akční veličiny po provedení skokové změny,

je možné určit přechodovou charakteristiku, která je zobrazena na obr. 3.4. Z přechodové charakteristiky je patrné, že se jedná o systém prvního řádu bez dopravního zpoždění. Výsledky měření a výpočty jsou v příloze bakalářské práce.



Obr. 3.4 – Přechodová charakteristika systému

3.2 NASTAVENÍ REGULÁTORU

Po získání přechodové charakteristiky bylo možné přistoupit k nastavení regulátoru. Regulátor byl nastaven pomocí Kuhnovy metody, pro regulaci byl použit PI a PID regulátor. Pro nastavení regulátoru pomocí této metody, je potřeba znát zesílení soustavy K_s a souhrnnou časovou konstantu T_Σ .

Zesílení soustavy je definováno vztahem

$$K_s = \frac{y_\infty}{u_\infty}, \quad (3.2)$$

kde K_s – zesílení soustavy,
 y_∞ – ustálená hodnota regulované veličiny,
 u_∞ – ustálená hodnota akční veličiny.

Dosazením do rovnice (3.2) z přechodové charakteristiky na obr. 3.4, byla získána hodnota zesílení soustavy

$$K_s = 11,83 \text{ lx}. \quad (3.3)$$

Pro určení souhrnné časové konstanty je potřeba znát plochu A , která je definována rovnicí (1.9). Plocha A byla vypočítána v tabulkovém procesoru MS Excel. Dosazením plochy A do rovnice (1.8), byla získána hodnota souhrnné časové konstanty

$$T_\Sigma = \frac{A}{K_s} = \frac{10,56}{11,83} = 0,89 \text{ s}. \quad (3.4)$$

Dosazením získaných parametrů regulované soustavy do tab. 1.2, byly nalezeny parametry regulátoru, které jsou uvedeny v tab. 3.1.

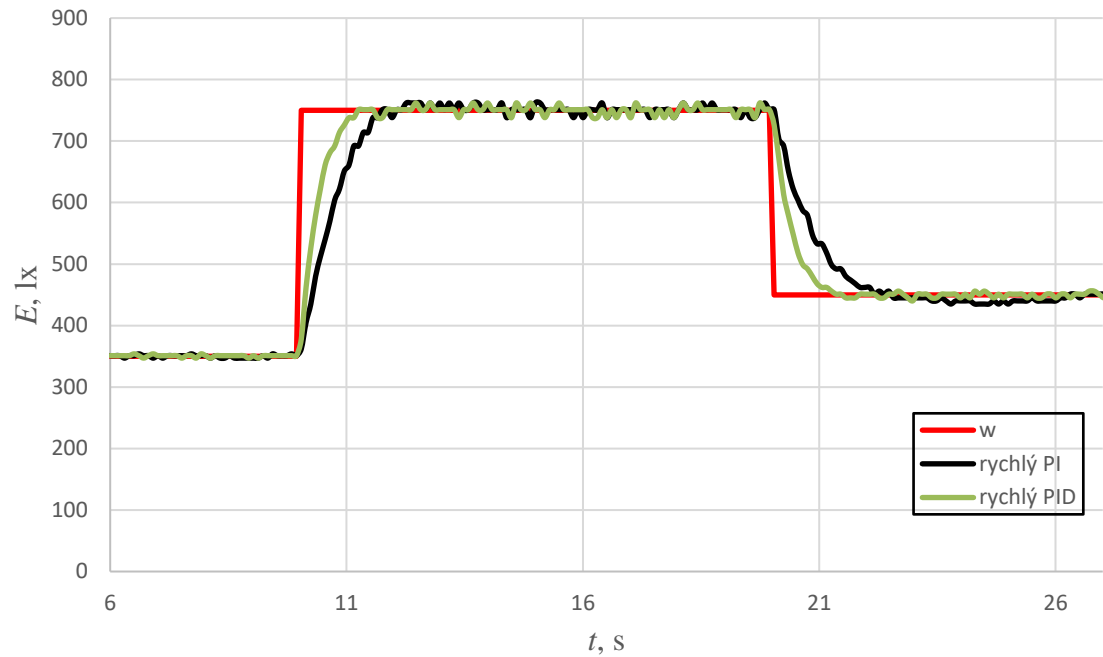
Tab. 3.1 – Nalezené parametry PID regulátorů

Regulátor	r_0	T_i	T_d
P	0,08		
PI normální	0,042	0,45	
PI rychlý	0,08	0,62	
PID normální	0,08	0,59	0,15
PID rychlý	0,17	0,71	0,17

3.3 OVĚŘENÍ CHOVÁNÍ REGULAČNÍHO OBVODU

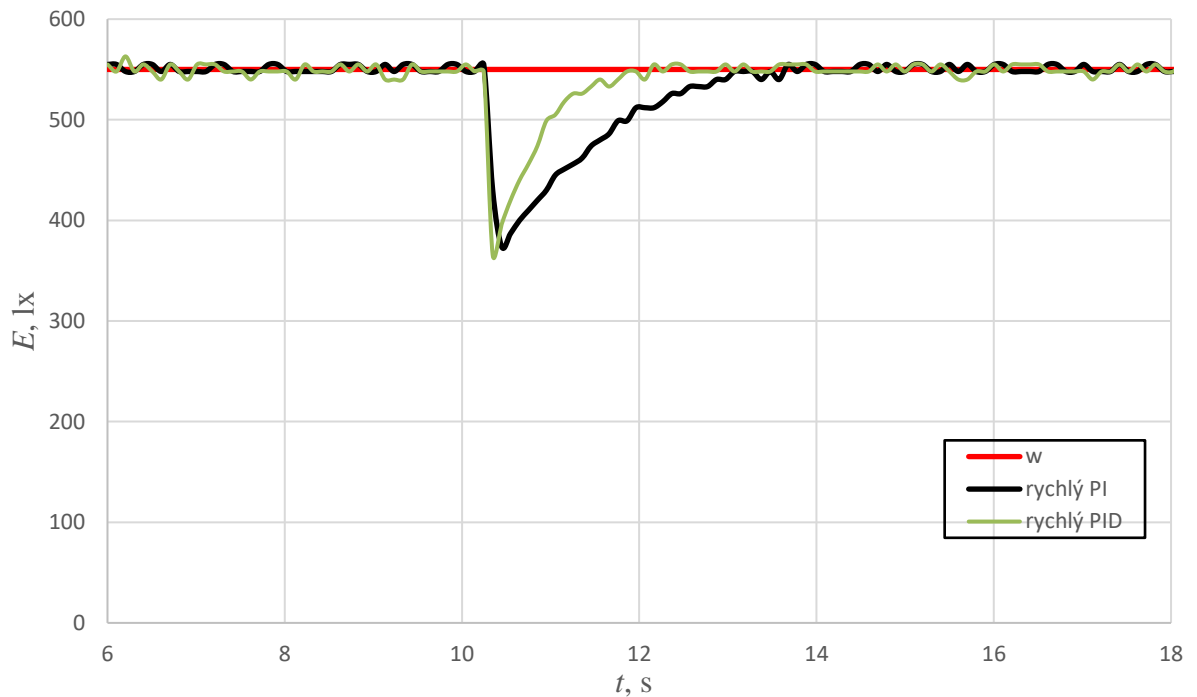
Tato kapitola se zabývá porovnáním chování regulačního obvodu při regulaci pomocí rychlého PI a rychlého PID regulátoru nastavených pomocí Kuhnovy metody. Správnost parametrů v tab. 3.1 byla ověřena několika experimenty. Regulátory byly nejdříve testovány na skokovou změnu žádané hodnoty a poté na regulaci poruchy. Řídicí program byl upraven tak, aby naměřená data zobrazovaná na displeji byla odesílána přes USB do počítače na sériový monitor v Arduino IDE. Data byla následně přenesena do tabulkového procesoru MS Excel a byly zpracovány regulační pochody pro sledování žádané hodnoty.

Kvalita regulačního pochodu byla zkoumána pouze na základní kritéria, jako je maximální překmit a doba regulace. Maximální překmit je hodnota, kdy regulovaná veličina dosáhne svého maxima, udává se v %. Doba regulace je doba, která udává čas, kdy regulovaná veličina vstoupila do pásma $\pm 5\%$ žádané veličiny a už z něj nevystoupila.



Obr. 3.5 – Reakce systému na změnu žádané hodnoty

Na obr. 3.5 je vidět skoková změna žádané hodnoty z $w = 350$ lx na $w = 750$ lx v čase $t = 10$ s a v čase $t = 20$ s byla provedena skoková změna žádané hodnoty z $w = 750$ lx na $w = 450$ lx. Oba regulační pochody jsou bez překmitu. Z vyobrazeného průběhu je patrné, že rychlý PID regulátor má oproti rychlému PI regulátoru kratší dobu regulace a to 0,85 s. Zatímco regulátor PI vykazuje dobu regulace 1,36 s.



Obr. 3.6 – Reakce systému na poruchu

Na obr. 3.6 je zobrazen regulační pochod s poruchou. Úkolem regulátoru je tuto poruchu co nejrychleji eliminovat a pokračovat ve sledování žádané hodnoty. Chyba byla způsobena jiným zdrojem osvětlení, které bylo přibližně v čase 10,5 s vypnuto. V tomto případě znovu u obou regulačních pochodů nedochází k překmitu žádané veličiny. Rychlý PID regulátor vykazuje kratší dobu regulace a to 0,94 s. Zatímco rychlý PI regulátor vykazuje dobu regulace 1,95 s.

Oba dva navržené regulátory stabilně regulují reakci na skokovou změnu žádané hodnoty, stejně tomu je tak i v případě regulace poruchy.

4 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla věnována problematice týkající se zpětnovazební regulace. Byl vytvořen regulační obvod, který se skládá ze senzoru osvětlení, zdroje osvětlení, zobrazovací jednotky a řídicího systému. Regulační obvod byl realizován na univerzálním plošném spoji.

Dále byla identifikována regulovaná soustava. Po získání její statické charakteristiky byla zvolena lineární oblast, kde byla změřena přechodová charakteristika. Na základě změřené přechodové charakteristiky bylo zjištěno, že se jedná o soustavu prvního řádu bez dopravního zpoždění.

Nastavení regulátoru bylo provedeno pomocí Kuhnovy metody na základě znalosti přechodové charakteristiky. Bylo provedeno porovnání rychlého PID a rychlého PI regulátoru nastavených pomocí Kuhnovy metody. Regulátory byly nejdříve testovány na skokovou změnu žádané hodnoty a poté na poruchu způsobenou jiným zdrojem osvětlení. Podle získaných regulačních pochodů bylo ověřeno vhodné nastavení regulátoru. Tím bylo zjištěno, že Kuhnova metoda je vhodná i pro systémy, které trpí šumem. Kvalita regulace získaných regulačních pochodů byla vyhodnocena pomocí doby regulace. Nejkratší dobu regulace vykazoval rychlý PID regulátor nastavený pomocí Kuhnovy metody. Ověřením principů zpětnovazební řízení byly splněny všechny cíle bakalářské práce.

POUŽITÁ LITERATURA

- Arduino. ©2018a. What is Arduino? *arduino.cc* [online]. [cit. 2018-01-16]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Arduino. ©2018b. ARDUINO MINI 05. *arduino.cc* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-mini-05>
- Arduino. ©2018c. ARDUINO NANO. *arduino.cc* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- Arduino. ©2018d. ARDUINO MICRO. *arduino.cc* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-micro>
- Arduino. ©2018e. ARDUINO UNO REV3. *arduino.cc* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- Arduino. ©2018f. ARDUINO MEGA 2560 REV3. *arduino.cc* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>
- Arduino. ©2018g. ARDUINO ETHERNET SHIELD 2. *arduino.cc* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-ethernet-shield-2>
- CVEJN, J. 2016 *Automatizace I: Kap. 10 – Automatická regulace*. Přednáška. Pardubice. [cit. 2018-04-13]. Osobní sdělení.
- DISTRELEC. ©2018. Infračervená fotodioda 850 nm ~TO-5, BPX61, Osram Semiconductors. *distrelec.sk* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://www.distrelec.sk/sk/infracervena-fotodioda-850-nm-to-osram-semiconductors-bpx61/p/17510005>
- DOLEČEK, J. 2005. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 160 s. ISBN 80-7300-184-5.
- Gg1. 2014. Using photoresistors with Arduino. *xAppSoftware* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <http://www.xappsoftware.com/wordpress/2014/10/16/using-photoresistors-with-arduino/>
- KUHN, U. 1995 Eine praxisnahe Einstellregel für PID-Regler: Die T-Summen-Regel. *Automatisierungstechnische Praxis*, (5), s. 10 - 16. ISSN 2190-4111
- KOUTNÝ, J.; VLK, I. 2009a. Fotoodpor (fotorezistor). *ELUC* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/610>

- KOUTNÝ, J.; VLK, I. 2009b. Fotodioda. *ELUC* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/611>
- LED Solution. ©2018. Jak LED diody fungují. *eshop.ledsolution.cz* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://eshop.ledsolution.cz/led-diody-technicke-udaje/>
- MT. 2015a. Základní zapojení LED diod II – (Spojování). *Tajned* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2015/08/zakladni-zapojeni-led-diod-ii-spojovani/>
- MT. 2015b. Pulzně šířková modulace – PWM. *Tajned* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2015/06/pulzne-sirkova-modulace-pwm-2/>
- OFFICIAL ELECTRONIC. 2008?. Fototranzistor Kingbright L-53P3C. *official.cz* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://www.official.cz/z4146-fototranzistor-kingbright-l-53p3c>
- PIVOŇKA, P. 2003. *Vyšší formy řízení* [online]. [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/%C5%A0EP/PID%20Control/VFR03.pdf>
- PS electronic. 2010?. FR12/100K fotorezistor (fotoodpor). *pselectronic.cz* [online]. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <http://www.pselectronic.cz/k1001-362-fr12100k-fotorezistor-fotoodpor.html>
- REICHL, J.; VŠETIČKA M. ©2006–2018. Fotometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- RobotDyn. ©2014–2018. UNO R3 SMT ATmega328, USB-Serial CH340G, Micro-USB. *Robotdyn.com* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://robotdyn.com/uno-r3-smt-atmega328-usb-serial-ch340g-micro-usb.html>
- ŠVARC, I. 2011. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-4398-3.
- VODA, Z. 2014. SEZNÁMENÍ S ARDUINEM. *ARDUINO.CZ* [online]. 11. 10. 2014 [cit. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://arduino.cz/seznameni-s-arduino/>
- VODA, Z. 2015. *Průvodce světem Arduina*. Bučovice: Martin Stříž. ISBN 978-80-87106-90-7.

PŘÍLOHY

A - CD

B - Elektrické schéma zapojení

Příloha k bakalářské práci

Číslicový PI regulátor pro udržování zadané úrovně osvětlení

Lukáš Málek

CD

Obsah

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF
- 2 Zdrojový kód aplikace
- 3 Naměřená data

Příloha k bakalářské práci

Číslicový PI regulátor pro udržování zadané úrovně osvětlení

Lukáš Málek

ELEKTRICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ

