

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Řídící jednotka systému detekce barvy s autokalibrací**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**Fakulta elektrotechnická**  
**Akademický rok: 2012/2013**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

Jméno a příjmení: **Tomáš MASÁK**  
Osobní číslo: **E10B0076P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Řídicí jednotka systému detekce barvy s autokalibrací**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Navrhněte a realizujte hardware řídicí jednotky detektoru.
2. Navrhněte vhodné řídicí algoritmy pro detekci barvy.
3. Navrhněte algoritmy pro autokalibraci systému.
4. Implementujte algoritmy do řídicí jednotky a oživte systém.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Petr Beneš**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky


Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

  
Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.

děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

V této bakalářské práci je popsána řídicí jednotka systému detekce barvy s autokalibrací. Detektor barvy je složen z fotorezistoru, který je zapojen do série s rezistorem a RGB diody s předřadnými rezistory. Systém snímá předmět, a poté určí jeho barvu. Jedná se o základní barvy, tedy červenou, modrou a zelenou. Celý systém je řízen mikrokontrolérem ATmega32, naprogramovaným v jazyce C. Autokalibrace napomáhá k lepší funkčnosti systému a je součástí programu v mikrokontroléru. Celý systém je součástí dalšího hardwaru, který je plně automatizován.

## **Klíčová slova**

ATmega32, fotorezistor, LED dioda, RGB, rezistor, mikrokontrolér, detektor barvy, display LCD, TCS3200-DB, autokalibrace, Eclipse.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with a description of control unit of colour detection system with auto-calibration. The detector of colours is composed of a photoresistor which is connected in series with a resistor and RGB LEDs with ballast resistors. The system scans the object, and then determines its colour. There are three basic colours, namely red, blue and green. The whole system is controlled by microcontroller ATmega32 which is programmed in C. Auto-calibration helps to better functioning of the system and is also a part of the program in the microcontroller. The whole system is a part of the additional hardware which is fully automatized.

## **Key words**

ATmega32, photoresistor, LED, RGB, resistor, microcontroller, color sensor, LCD display, TCS3200-DB, autocalibration, Eclipse.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Tomáš Masák

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Benešovi, za nastínění problému, za pomoc při jeho řešení, zapůjčení potřebného hardwaru a za užitečné rady. Můj vděk patří všem, kteří se svými radami podíleli na vzniku této bakalářské práce. Rodině bych chtěl poděkovat za finanční a morální podporu během celého studia.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 DETEKTOR BARVY</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBCENÉ INFORMACE.....	10
<b>2 MIKROKONTROLÉRY ATMEL</b> .....	<b>13</b>
2.1 HISTORIE .....	13
2.2 ARCHITEKTURA MIKROKONTROLÉRŮ AVR .....	13
2.3 ŘADY MIKROKONTROLÉRŮ AVR.....	14
<b>3 HARDWARE</b> .....	<b>15</b>
3.1 SOUČÁSTI HARDWARU .....	15
3.1.1 Pásový dopravník.....	15
3.1.2 Zásobník míčků .....	16
3.1.3 Robotická ruka .....	16
3.1.4 Vývojový kit EvB 4.3 v4.....	16
<b>4 VLASTNÍ ŘEŠENÍ</b> .....	<b>18</b>
4.1 POPIS SOUČÁSTEK .....	18
4.1.1 Fotorezistor.....	18
4.1.2 Rezistor .....	22
4.1.3 LED.....	23
4.1.4 ATmega32 .....	25
4.2 PROGRAMOVACÍ PROSTŘEDÍ.....	26
4.2.1 Software .....	26
4.2.2 Programovací jazyk C.....	28
4.3 ALGORITMUS DETEKCE BARVY .....	30
4.4 ALGORITMUS AUTOKALIBRACE.....	32
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>35</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>37</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>39</b>



## Úvod

V průmyslu se detekce barvy využívá velmi často. Pokud se jedná o průmysl s vysokým stupněm automatizace, je barva jedním z kritérií pro rozpoznávání nebo třídění výrobků. Dalšími kritérii mohou být hmotnost, tvar, rozměry a materiál. Barva produktů, obalů, štítků či popisků může být detekována pomocí systému detekce barvy, a to s velmi vysokou přesností. Tyto systémy velice usnadní práci i čas, a tím pádem koncovému uživateli i peníze, protože je plně automatizován a není zde potřeba vyškolených pracovníků. Detektory barev dokáží rozlišit i velmi malé rozdíly mezi odstíny jedné barvy. Co se týče spektra barev, detektory jsou plně schopny nahradit lidské oko.

Tato bakalářská práce se zabývá tématem řídicí jednotky systému detekce barvy. Jedná se vlastně o detektor, který dokáže rozpoznat jednu ze základních barev jako je červená, modrá a zelená. Celá aplikace spočívá v tom, že do již sestaveného hardwaru je implementován detektor barvy. Součástí hardwaru je pásový dopravník, který dopraví barevné kuličky pod detektor. Barevné kuličky jsou umístěny v zásobníku míčků. Pomocí robotického ramene jsou pod zásobník umisťovány krabičky, do kterých jsou vloženy barevné kuličky. Krabičky naplněné barevnými kuličkami jsou po detekci uchopeny dalším z robotických ramen. Podle určené barvy dochází k další manipulaci s krabičkou. Tento proces se opakuje.

Dále se tato bakalářská práce zabývá systémem autokalibrace. Při použití autokalibrace dochází k načtení potřebných dat, se kterými se pak dále pracuje. Kdyby nedocházelo k autokalibraci, funkčnost detekce barvy by byla velmi omezená, v některých případech by se nedala vůbec použít.

Řídicí jednotka systému detekce barvy je součástí aplikace, která spadá pod katedru elektromechaniky a výkonové elektrotechniky, a která slouží pro prezentaci fakulty elektrotechnické.

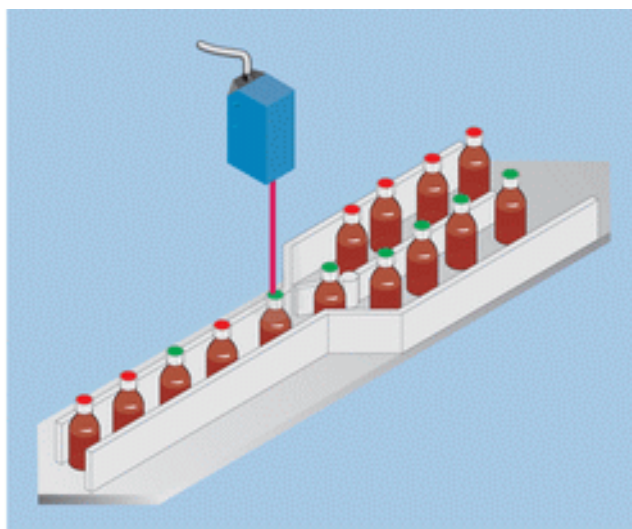
# 1 Detektor barvy

## 1.1 Obecné informace

Detektor barvy slouží k optickému snímání předmětu, díky čemuž lze zjistit jeho barvu. V mnoha průmyslech je potřeba rozlišovat různé výrobky. Rozlišování výrobků může být prováděno podle hmotnosti, velikosti, tvaru, ale také podle barvy. Detektor barev lze použít pro identifikaci jedné konkrétní barvy nebo třídění více barevných výrobků. Po detekci barvy je výsledek zpracován a následně zaslán například do řídicí jednotky linky, která podle toho provede následující operaci. Třídění pak lze provádět pomocí robota, který bude výrobky přesouvat na konkrétní místo, druhou možností je pak použití posuvného dopravníku. Detekci barvy lze použít například při třídění výrobků. Výrobky mohou být rozlišovány podle barvy víčka, lahve nebo barevné etikety. Detektor zjistí, o jaký výrobek se jedná a od toho se odvíjí další operace. Další operace jsou například balení a štítkování. [1]

Použití:

- *kontrola obsahu lahve podle barvy tekutiny,*
- *třídění barevných výrobků,*
- *počítání počtu kusů výrobku,*
- *vyřazení vadného výrobku,*
- *třídění zásilek pomocí barevné etikety,*
- *automobilový, papírenský, farmaceutický průmysl. [1]*



Obr. 1.1.1 Třídění výrobků podle barvy víčka [1]

Aby barva mohla být správně rozpoznána, je potřeba použít správný hardware. Je možné použít již zhotovené detektory barvy, jejichž cena se pohybuje řádově v desítkách tisíc korun. Jedním z výrobců barevných detektorů je firma SENSOPART (Obr. 1.1.2). Tyto senzory využívají barevných filtrů, přes které se daný předmět osvítlí, poté se vyhodnotí jeho barva.



Obr. 1.1.2 Detektor barvy firmy SENSOPART [2]

Dále je možné zakoupit detektor barvy pouze jako čip, který se dále implementuje do dalšího zařízení (Obr.1.1.3). Tyto čipy se dají pořídit řádově za jednotky tisíců korun.



Obr. 1.1.3 Detektor barvy jako čip pro implementaci [3]

Další z možností, jak řešit detekci barvy, je použití webové kamery. Webová kamera by při procesu snímala předmět, a poté by pomocí softwaru určila jeho barvu. Toto řešení je však

složité a musely by se provádět komplikované výpočty. Pro naši aplikaci to není příliš vhodné. Řešení by v tomto případě bylo spíše softwarové než hardwarové.

Naše aplikace je určena pro prezentaci elektrotechnické fakulty ZČU. Řešení, které bylo námi zvolené, vychází již z předem sestaveného hardwaru. Tento hardware se skládá z pásového dopravníku, který posouvá barevné předměty pod detektor barvy. Při snímání barvy je předmět osvětlen pomocí RGB diody. Po osvětlení se pomocí algoritmu detekce barvy vyhodnotí barva předmětu. Předmět je pásovým dopravníkem posunut ven z detektoru a je pomocí robotické ruky tříděn do připravených nádob podle barvy.

Detektor barvy využívá mikrokontrolér od firmy ATMEL. Námi zvolený mikrokontrolér má označení ATmega32. Jedná se o mikrokontrolér, který disponuje AD převodníkem, dostatečným počtem I/O bran a ALU (aritmeticko-logická jednotka), která dokáže provádět jednoduché výpočetní operace. Mimo to má poměrně vysokou FLASH paměť. Z tohoto důvodu je možné do programu přidat část, která se zabývá autokalibrací. AD převodník je potřebný pro snímání napětí. Napětí je snímáno na rezistoru, který je zapojen s fotorezistorem do série jako napěťový dělič. Napětí nelze snímat na fotorezistoru, protože je závislý na teplotě. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu levné realizace. Pro jednodušší řešení nebyl použit samotný mikrokontrolér ATmega32, ale přímo vývojový kit, který je tímto mikrokontrolérem osazen. Výhoda vývojového kitu spočívá v jednoduchosti a rychlosti zapojení, což lze měnit i za běhu programu. Vývojový kit nám umožní využívat další periferie, jako jsou tlačítka, LCD panel a potenciometry. Jelikož se jedná o prototyp, není zde důvod vyrábět pevný plošný spoj, který by byl osazen mikrokontrolérem. Pro připojování jednotlivých vývodů z mikrokontroléru jsou zde vyvedeny piny. Z vývojového kitu lze dále použít tlačítka, která jsou potřebná pro případný start detekce barvy nebo pro autokalibraci, dále LCD displej, na kterém se zobrazují informace, které jsou aktuálně mikrokontrolérem prováděny.

Všem zde popsaným součástkám - pásovému dopravníku, zásobníku míčků a robotické ruce - budou věnovány další kapitoly, ve kterých budou podrobněji rozepsány jejich vlastnosti.

## 2 Mikrokontroléry ATMEL

### 2.1 Historie

První zmínka o mikroprocesorech sahá až do sedmdesátých let minulého století. Tehdejší výrobci ještě neměli téměř žádné zkušenosti s integrovanými obvody. Z počátku se vývoj dělil na dvě části. V první části se výrobci zabývali pamětí. Šlo jim převážně o to, aby měl mikroprocesor co největší paměť i rychlost. Mohli jsme se setkat s 16, 32 dokonce i 64-bitovými mikroprocesory. V druhé části se výrobci zabývali spojením mikroprocesoru s pamětí a dalšími obvody I/O do jednoho pouzdra. Toto pouzdro se nazývalo mikrokontrolér. Ve spojení s mikrokontrolérem se naskytlo několik možností řešení. První možností bylo spojení paměti pro program a paměti dat do jedné. Tomuto spojení se říká von Neumanovská architektura. Druhou možností bylo oddělení paměti dat a paměti programu. Nazývalo se to Harwardská architektura. [4]

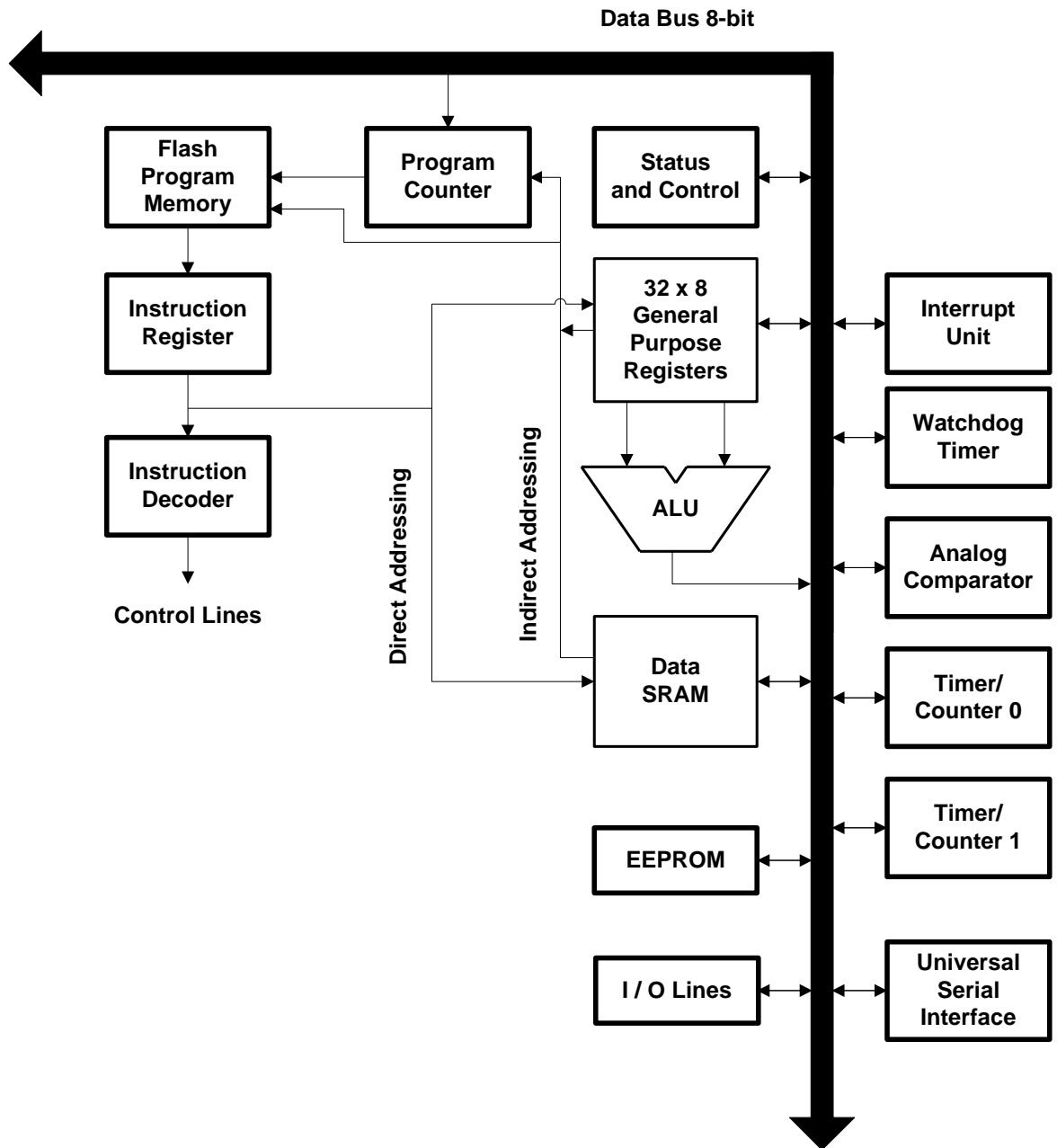
### 2.2 Architektura mikrokontrolérů AVR

Jádro AVR je složeno ze 32 stejných 8-bitových registrů. Tyto registry mohou obsahovat jak adresy, tak i data. Architektura AVR má pět adresových módů. [4]

Adresové módy pro datovou paměť:

- *adresování přímé,*
- *adresování nepřímé,*
- *adresování nepřímé s posunutím,*
- *adresování nepřímé s inkrementací (po vykonání instrukce),*
- *adresování nepřímé s dekrementací (před vykonáním instrukce). [4]*

AVR mikrokontroléry využívají oddělenou paměť pro program a paměť pro data. (viz výše zmíněná Harwardská architektura). Principem provádění programu je, že při vykonávání jedné instrukce je následující instrukce přesouvána z programové paměti. Při programování mikrokontroléru dochází k tomu, že jakmile je připojeno programovací napětí, dochází k nahrání programu do programové paměti. Jakmile toto napětí klesne, dojde k přepnutí vývodů na datové a adresové vývody. Tyto vývody jsou propojeny s vnitřní pamětí programu a my můžeme mikrokontrolér začít využívat. Vnitřní architektura AVR je zobrazena na obrázku 2.2.1. [4]



Obr. 2.2.1 Vnitřní architektura AVR [5]

### 2.3 Řady mikrokontrolérů AVR

Firma ATMEL vyrábí AVR mikrokontroléry v těchto řadách:

- *Základní: většinou mají 118 instrukcí (např.: AT90S1200 pouze 89 instrukcí, AT90S2313, AT90S4433, AT90S8515);*
- *ATtiny: charakteristická 90 instrukcemi optimalizovanými do portů i do počtu funkcí (např.: ATtiny11, ATtiny12, ATtiny15, ATtiny28, ATtiny26 – 118 instrukcí);*
- *ATmega: jsou realizovány převážně se 130 instrukcemi, jejich provedení umožňuje maximum funkcí, mají velký počet přeprogramování - až 10 000. Novější typy mají*

*možnost ladění softwaru přímo při aplikaci. Tomuto vybavení se říká JTAG (např.: ze starší řady ATmega103, ATmega161, ATmega163; z novější řady ATmega8, ATmega16, ATmega32, ATmega64). [4]*

## 3 Hardware

### 3.1 Součásti hardwaru

Aby celý systém mohl fungovat bez zásahu člověka, jsou zde použity další nezbytné části, které jsou plně automatizované. Jedná se o pásový dopravník, zásobník míčků a robotickou ruku. Každá z těchto částí má svůj účel. Dohromady tvoří celek, tudíž pokud jedna z částí nebude fungovat správně, povede to ke špatné funkčnosti celého systému. [6]

Kuličky jsou nejdříve promíchány v míchačce, aby došlo k náhodnému detekování barvy. Robotická ruka připraví krabíčku pod míchačku barev, do které je potom umístěn barevný míček z míchačky. Dále se zde nachází komora, jejíž součástí jsou dvě závory. Po otevření jedné závory se míček zarazí o druhou závoru. Když se otevře druhá závoru, tak je první uzavřena, aby z míchačky nevyjelo více míčků. Pomocí pásového dopravníku je krabíčka s míčkem dopravena až k detekci barvy. Po zjištění barvy detektorem, je krabíčka vysunuta pomocí pásového dopravníku ven z detektoru. Druhá robotická ruka převezme krabíčku a podle detekované barvy vysype její obsah do větší krabíčky, která je určena pro konkrétní barvu. [6]

#### 3.1.1 Pásový dopravník

Pásový dopravník slouží k posunu krabíčky s míčkem od zásobníku pod detektor barvy. Po detekci barvy slouží současně i pro vysunutí krabíčky z detektoru. [6]

Pás se skládá z polymetylmakrylátu jinak známým jako plexisklo. Pás je posouván pomocí dvou hřídelí, které jsou zhotoveny z oceli a skládají se ze čtyř ložisek. Napnutí či prověšení pásu se dá nastavit pomocí čtyř šroubků, které jsou umístěny u bočnic. Nastavení pásu se provádí na straně, kde není pás připojen k pohonu, jelikož jsou zde uložena pohyblivá ložiska. [6]

Pohon pásového dopravníku je tvořen stejnosměrným motorem a převodovkou. Motor pásu je napájen pomocí obvodu L6203. [6]

### 3.1.2 Zásobník míčků

Hlavní funkcí zásobníku je přesun míčků do připravených krabiček, které jsou dále posouvány pásovým dopravníkem k detektoru. Zásobník míčků současně zajišťuje i promíchání různě barevných míčků. Jinými slovy zajišťuje, aby nedocházelo k tomu, že míčky budou za sebou posílány k detektoru neustále jen v jedné barvě. [6]

Celý zásobník je tvořen ze stejného materiálu jako pásový dopravník. Míchání míčků je zajištěno kotoučem, který je na dně zásobníku a je poháněn stejnosměrným motorem. Otvor pro dávkování míčků má dvě závory. Jedna závora propustí míček z míchačky a druhá závora ho vypustí do krabičky. Pokud je jedna závora otevřená, pak je druhá zavřená. [6]

### 3.1.3 Robotická ruka

Robotická ruka slouží k tomu, aby vložila krabičku pod zásobník míčků. Po detekci barvy vezme krabičku s míčkem a podle barvy ji přesune na určené místo podle toho, o kterou barvu se jedná. [6]

Použity jsou dvě robotické ruce LYNX 6. Jedná se o šesti-osového robota, který slouží pro studijní účely. K řízení robota jsou použita serva HITEK. [6]

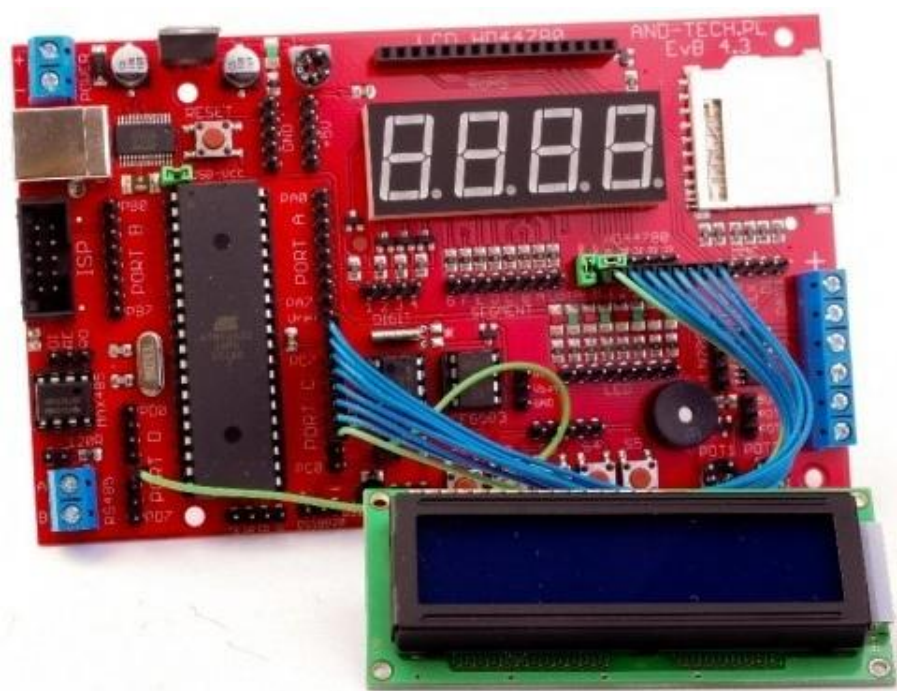
### 3.1.4 Vývojový kit EvB 4.3 v4

Po dohodě s vedoucím této bakalářské práce Ing. Petrem Benešem byl použit vývojový kit. Hlavním důvodem byla jednoduchost zapojení a možnost využití jiných periférií, které tato deska nabízí. Deska má také výhodu v tom, že se funkčnost programu mohla testovat bez jakékoliv manipulace s mikrokontrolérem. Mohlo se tedy bezproblémově přistupovat k okamžitému testování programu a i ke změně zapojení během funkce programu. Jelikož se nejedná o sériovou výrobu, nebylo potřeba vyrábět plošný spoj.

Pro nahrávání programu do mikrokontroléru a jeho ozkoušení byl používán vývojový kit EvB 4.3 v4 (Obr. 4.2.3). Jedná se o hardware, na němž je implementován mikrokontrolér ATmega32. Dále jsou zde umístěny: čtyři 7-segmentové displeje, pět tlačítek, osm diod LED,



dva potenciometry, teplotní senzor, možnost připojení displeje 2 řádky x 16 znaků, napájecí piny a piny GND. [7]



Obr. 3.1.1 EvB 4.3 v4 [8]

Vývojový kit je napájen 5 V pomocí USB (v tomto případě musí být zkratovaná propojka USB-Vcc). Přes toto USB se může i programovat nebo se pro naprogramování použije tzv. ISP. [7]

Pro propojování jednotlivých částí vývojového kitu se používají upravené kablíky, které jsou připojeny na jednotlivé piny, které jsou z jednotlivých součástek vyvedeny. [7]

Pro naši potřebu byl nejvíce využit LCD displej 2x16 (Obr.4.2.4), tlačítka, uzemňovací a napájecí piny a mikrokontrolér ATmega32. [7]



Obr. 3.1.2 LCD displej HD44780 2x16, modré podsvícení [9]

## 4 Vlastní řešení

### 4.1 Popis součástek

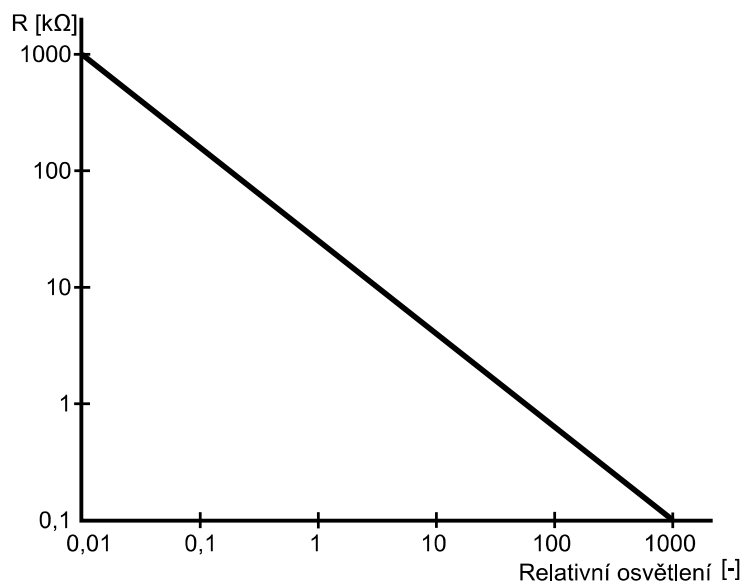
Jak bylo řečeno v první kapitole, pro detektor barvy byl použit fotorezistor, rezistor, RGB dioda a mikrokontrolér ATmega32. V této části budou dané součástky popsány podrobněji pro lepší pochopení problematiky. Hlavním problémem součástek je vliv teploty, která ovlivňuje správnost detekce barvy. Nejvíce je teplotou ovlivňován fotorezistor.

#### 4.1.1 Fotorezistor

Fotorezistor se řadí do pasivních měničů, a to z toho důvodu, že při detekci optického záření mění svůj odpor. Fotorezistor je polovodičová součástka, která nemá PN přechod. Hodnota elektrické vodivosti fotorezistoru je závislá na osvětlení. Při nízkém osvětlení je tato hodnota mnohokrát větší než při osvětlení nízkém. Energie fotonu, která musí být do materiálů dodána, aby vznikl pár elektron-díra, je dána velikostí zakázaného pásma. Pokud má materiál menší energii zakázaného pásu, tak jsou fotorezistory citlivé na optické záření delších vlnových délek. Nutno podotknout, že u materiálů s větší energií zakázaného pásu je tomu naopak. [10]

U fotorezistoru lze zjistit i jeho citlivost. Citlivost je dána vztahem mezi intenzitou optického záření, které dopadá na fotorezistor a mezi hodnotou velikosti odporu, která je vyvolána v důsledku dopadajícího optického záření. Citlivost se zobrazuje pomocí spektrálních charakteristik fototranzistoru pro různé materiály. [10].

Další závislost udává vztah mezi velikostí odporu a mezi osvětlením (Obr. 4.1.1). Tato závislost je nelineární, a proto se graf závislosti odporu na osvětlení udává v logaritmickém měřítku. Tento graf má poté charakter přímky. Z grafu je vidět, že při větším osvětlení klesá odpor fotorezistoru. [10]



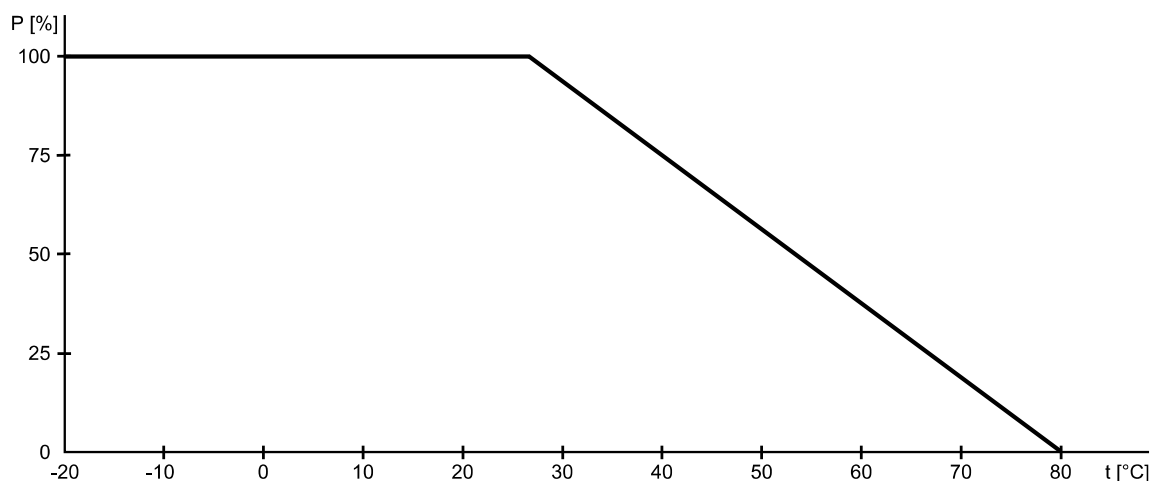
Obr. 4.1.1 Závislost odporu na osvětlení [11]

Teplotní závislost je u fotorezistoru považována za negativní vlastnost. Fotorezistory jsou velmi teplotně závislé. Teplotní závislost je větší při menším osvětlení nebo při větších vlnových délkách. Závislost teploty na výkon fotorezistoru je zobrazena na obrázku 4.1.2. [10]

Mezi další důležité parametry patří:

- $R_{10lx}$  – odpor pro osvětlení 10 lx při  $\vartheta = 25\text{ °C}$ ,
- $R_{min}$  – minimální velikost odporu, která se získá tak, že na fotorezistor působí osvětlení 10 lx a 5 sekund po ukončení osvětlení se změří velikost odporu,
- $P_{max}$  – ztrátový výkon, který udává, jak lze nejvíce fotorezistor zatížit, udáván pro  $\vartheta = 25\text{ °C}$ ,
- $U_{max}$  – maximální napětí, které lze přiložit na fotorezistor (za tmy), udáván pro  $\vartheta = 25\text{ °C}$ . [10]

Rychlost odezvy fototranzistorů při změně osvětlení je relativně pomalá. Rychlost odezvy se zvětšuje při vyšších vlnových délkách a při vyšším osvětlení. Závisí také na materiálu, ze kterého je fotorezistor vyroben. [10]

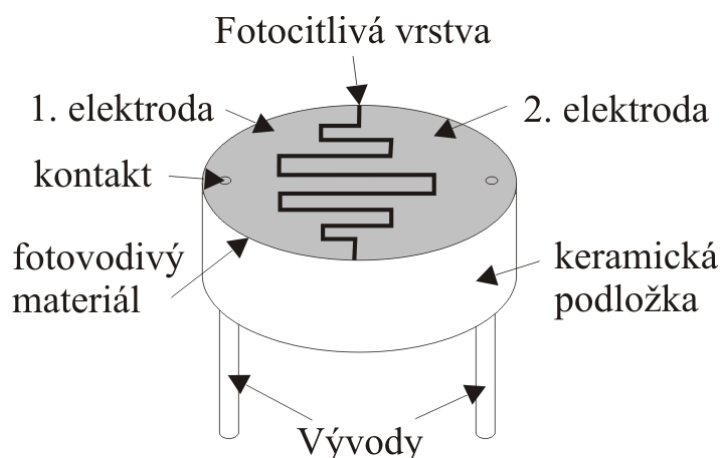
**Obr. 4.1.2 Vliv teploty na výkon fotorezistoru [11]**

Nejčastěji používanými materiály na výrobu fotorezistoru jsou CdS, CdSe, PbS, PbSe. Fotorezistory vyrobené z CdS mají spektrální charakteristiku, která je podobná citlivosti lidského oka. Tyto fotorezistory jsou obecně nejpoužívanější. [10]

Můžeme se setkat s fotorezistory, které mají různé provedení a tvary.

**Obr. 4.1.3 Různé provedení fotorezistoru [11]**

Vodivé cesty snímají foto-vodivé osvětlení. Tyto cesty lze vytvářet pomocí monokrystalu, metodou tenkých vrstev nebo metodou tlustých vrstev. [4]



Obr. 4.1.4 Konstrukce fotorezistoru [11]

Nevýhody fotorezistorů:

- *velmi závislé na teplotě;*
  - *dlouhá doba odezvy;*
  - *projevuje se stárnutí při provozu;*
  - *paměťový jev – omezuje se tím, že fotorezistor před použitím skladujeme na světle.*
- [10]

Výhody fotorezistorů:

- *nízká cena;*
- *snadné používání;*
- *značný rozdíl velikosti odporu fotorezistoru ve tmě a při osvětlení.* [10]

Jelikož by se napětí na fotorezistoru měřilo špatně, je v našem řešení k fotorezistoru navíc připojen ještě rezistor, a to především z důvodu proměnlivosti jeho odporu v závislosti na osvětlení. Tyto prvky jsou zapojeny sériově jako dělič napětí. Na tomto rezistoru dochází k měření napětí, které pak pomáhá k detekci barvy.

### 4.1.2 Rezistor

Rezistor (zastarale tzv. odporník) je pasivní elektrotechnická součástka, jejíž hlavní vlastností je elektrický odpor. Rezistor se v elektrických obvodech používá ke snížení protékajícího proudu (proud se vypočítá pomocí Ohmova zákona  $I = U/R$ ) nebo k získání úbytku napětí ( $U = R \cdot I$ ). [13,14]

Parametry, které udává výrobce, jsou: elektrický odpor, maximální příkon a tolerance (o kolik procent se maximálně liší jmenovitá hodnota od skutečné hodnoty). Jmenovitá hodnota včetně tolerance se na rezistoru může značit číselně (např.: 1k = 1k $\Omega$  , 5M6 = 5,6 M $\Omega$ ) nebo pomocí barevných proužků. [13,14]

Rezistor je velmi rozšířená součástka, bez které bychom se v praxi neobešli. Rezistory mají však i své nevýhody. Hlavní nevýhoda spočívá v tom, že jejich jmenovitá hodnota se liší od skutečné hodnoty. Dále jsou rezistory závislé na teplotě a mimo jiné vykazují elektrický šum. Při připojení na velmi vysoké frekvence dochází ke skin efektu. Lze je však použít jako topná tělesa, předřadníky nebo bočníky. [13,14]

Závislost elektrického odporu u rezistorů lze spočítat ze vztahu  $R = R_{20}(1 + \alpha\Delta t)$ , kde  $R_{20}$  je velikost odporu při teplotě 20 °C,  $\alpha$  je teplotní součinitel elektrického odporu (udává závislost velikosti odporu na teplotě) a  $\Delta t$  je teplotní rozdíl. [13,14]

Rezistory k sobě můžeme připojovat buď sériově, paralelně nebo sério-paralelně. V sériovém zapojení máme celkový odpor rezistorů dán jako součet odporů jednotlivých rezistorů. V paralelním zapojení je výsledný odpor, který se skládá ze dvou odporů, dán jako podíl součinu velikostí odporů jednotlivých rezistorů a součtu velikostí odporů jednotlivých rezistorů. [14]

Rezistor není použit pouze pro měření napětí k detekci barvy, ale používá se také jako předřadník u LED diod. Jelikož je určeno napájení vývojového kitu 5 V, je potřeba napětí na diodě snížit. Ale při připojení LED na plné napětí by došlo k jejímu zničení. Proto je na každé anodě u RGB diody připojen rezistor o potřebné velikosti.

### 4.1.3 LED

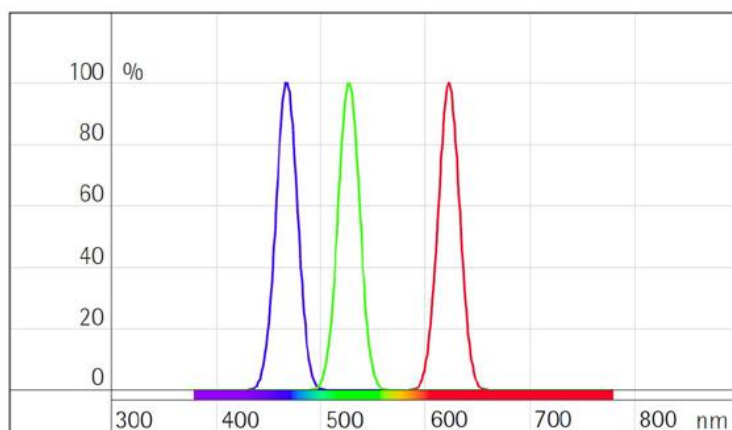
LED mají svůj název odvozen z Light Emitting Diode, což se dá volně přeložit jako dioda, která vyzařuje optické záření. LED je polovodičová součástka skládající se z PN přechodu. Druhy přechodů lze rozdělit na dva typy. Prvním je homogenní přechod, který je tvořen z jednoho materiálu. Tento materiál je poté dotován dalšími příměsemi typu P a N. Druhým typem přechodu je heterogenní přechod. Tyto přechody se skládají ze dvou polovodičových materiálů jako je například GaAs a AlGaAs. Oproti diodám s homogenním přechodem jsou dražší, výkonnější a mají složitější provedení. [10]

LED pracují na principu elektroluminiscence. Pokud k diodě přiložíme napětí v propustném směru, dochází k přenosu menšinových (minoritních) nosičů náboje přes PN přechod. Po přechodu dojde k rekombinaci páru elektron-díra. Podle stability stavu elektronu na vyšší hladině tam elektron setrvá po nějakou dobu. Tato doba se u každého elektronu liší. Když elektron opustí vyšší hladinu, dojde ke spontánní emisi záření. Světelné záření poté opustí destičku. K opuštění destičky dojde pouze ve směrech, které jsou pro něj průsvitné. [10]

Barva, kterou LED vyzařuje, je závislá na použitém materiálu a na poměru složek jednotlivých materiálů. Například červeně svítící LED má složení  $\text{GaAs}_{0,35}\text{P}_{0,65}$  a žlutě svítící má složení  $\text{GaAs}_{0,15}\text{P}_{0,85}$ . Pro modré barvy se používají materiály GaN, InGaN a SiC. [10]

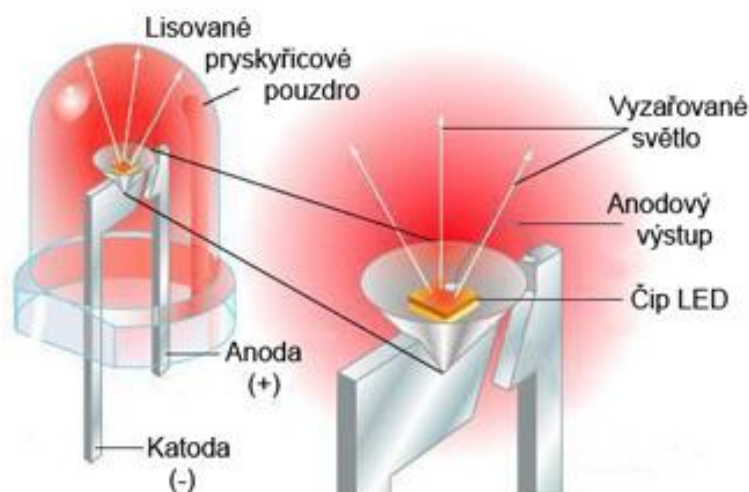
RGB diody jsou diody, které se skládají z barev červené (R - red), zelené (G - green) a modré (B - blue). RGB diody se vyrábí buď se čtyřmi vývody (R, G, B a společný vývod pro anodu nebo katodu) nebo se šesti vývody. RGB diody jsou sestrojovány k tomu, aby dokázaly vytvořit všechny barvy včetně bílé. Svítivost LED se udává pro konkrétní proud protékající diodou v propustném směru. Svítivost se většinou udává pro proud  $I_F = 20\text{mA}$ . Na obrázku je zobrazen příklad spektrální charakteristiky jednotlivých barev. [10]

Spektrální charakteristika je zobrazena na obrázku 4.1.5.



Obr. 4.1.5 Spektrální charakteristika jednotlivých barev RGB [15]

U LED se můžeme setkat se dvěma základními provedeními. V prvním případě se jedná o klasickou součástku, v druhém případě jde pak o SMD součástku. Klasické diody mohou mít průřez obdélníkový nebo kruhový. LED dioda se skládá ze dvou vývodů (A – anoda, K – katoda), pouzdra a LED čipu. [4]



Obr. 4.1.6 Provedení klasické LED [12]

Každá barva diody LED má různou V-A charakteristiku. Modrá LED ve srovnání se zelenou a červenou má větší napětí  $U_F$  (napětí mezi anodou a katodou). Toto napětí závisí na použitém materiálu, na konstrukci, na proudu  $I_F$  a na teplotě. Teplota ovlivňuje  $U_F$  tak, že při jejím zvýšení dojde ke snížení napětí  $U_F$ . [10]

Dalšími důležitými parametry LED jsou:

- $I_F$  stejnosměrný proud v propustném směru – trvalý proud, při kterém dioda svítí;
- $U_R$  napětí v závěrném směru;



- $P_m$  výkonová ztráta – tato ztráta ovlivňuje teplotu, a tím i její spolehlivost;
- $T_{OPR}$  rozsah provozních teplot – teploty, při kterých dioda pracuje, aniž by se výrazně ovlivnil proud  $I_F$ ;
- $\lambda$  vlnová délka – je to hodnota, při které má dioda největší intenzitu záření. [10]

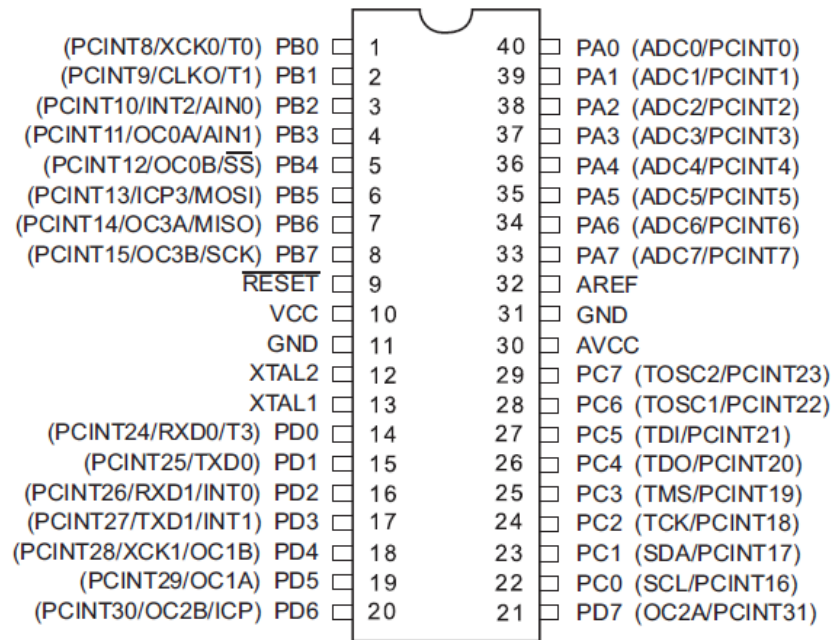
To, zda bude svítit modrá, zelená nebo červená dioda, je řízeno pomocí mikrokontroléru ATmega32. Tento mikrokontrolér také řídí čtení hodnoty napětí na rezistoru. Zde je využíváno funkce AD převodníku.

#### 4.1.4 ATmega32

ATmega32 je nízkopříkonový 8bitový mikrokontrolér založený na architektuře RISC. Tím, že provádí výkonné instrukce v jediném hodinovém cyklu, dosahuje 1 MIPS na 1 MHz. [16]

Jádro mikrokontroléru ATmega32 kombinuje až 131 instrukcí z 32 obecných registrů. Všechny tyto registry jsou připojeny přímo na aritmeticko-logickou jednotku (ALU). ATmega32 dále nabízí 32KB programovatelné Flash paměti se schopností čtení i zápisu. Dále 2Kb SRAM, 1024 EEPROM, 32 I/O bran, 32 pracovních registrů, JTAG ladění, 10bitový A/D převodník, sériový port SPI, watchdog, PWM a RC oscilátor. [16]

ATmega32 se vyrábí ve dvou typech pouzder v PDIP (Obr.4.1.7) a TQFP/MLF. Hlavní rozdíl mezi těmito pouzdry je v počtu vývodů. Pouzdro TQFP/MLF má o čtyři vývody více. Jedná se o vývody 2x VCC a 2x GND. [16]



Obr. 4.1.7 Mikrokontrolér ATmega32 pouzdro PDIP [16]

Mikrokontrolér, který je součástí vývojového kitu, bylo nutné naprogramovat. K tomuto účelu jsme použili programovací jazyk C a program Eclipse. Pro nahrání programu do mikrokontroléru byl využit program AVR Burn-O-Mat.

## 4.2 Programovací prostředí

### 4.2.1 Software

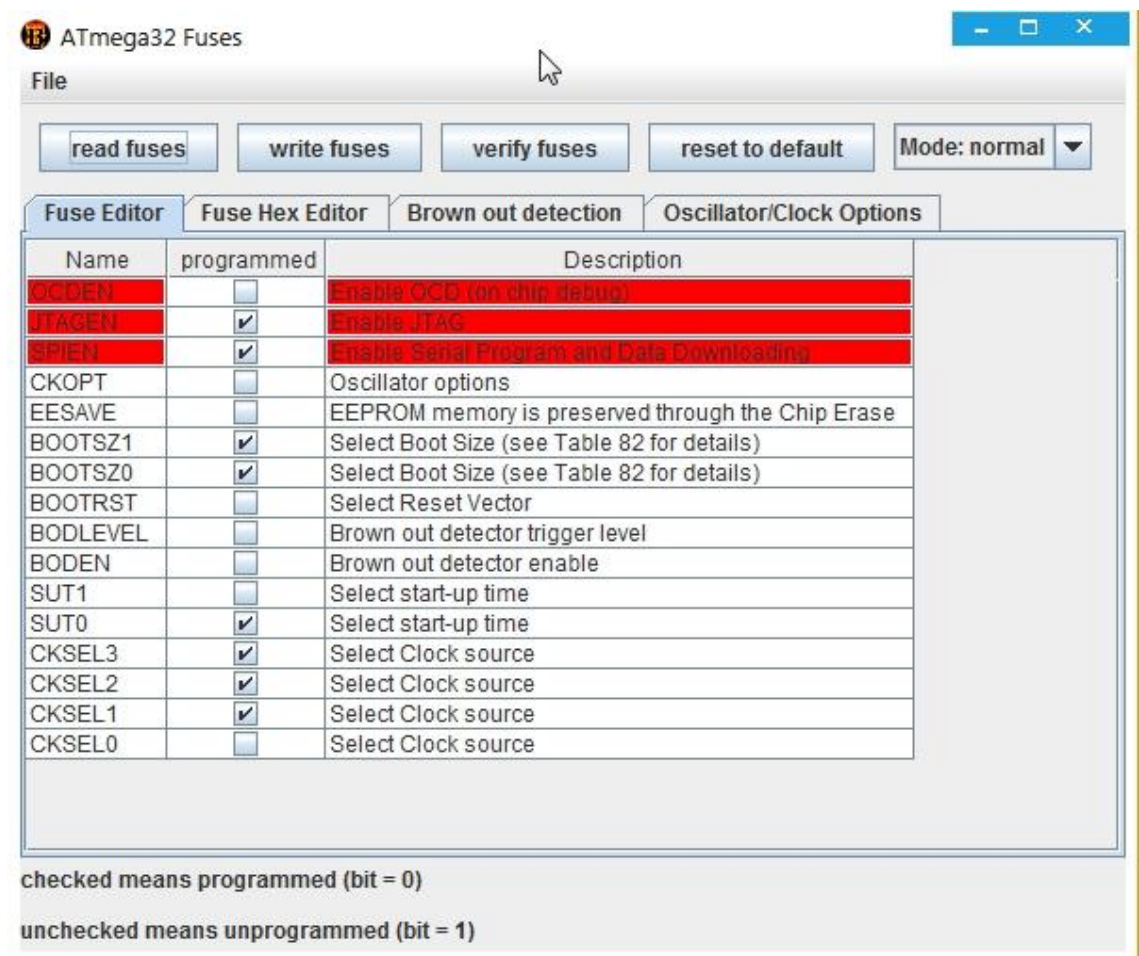
Jako software pro programování v jazyce C nám posloužil program Eclipse, do kterého byl implementován AVR plugin. Díky tomu byla možnost programovat přímo pro námi vybraný mikrokontrolér ATmega32. Další potřebnou věcí pro práci bylo stažení knihoven potřebných pro programování ATmega32.

Program Eclipse pochází od výrobce Eclipse Foundation. Patří do tzv. shareware programů, tedy programů, které jsou sice chráněny autorskými právy, ale jsou volně ke stažení.

Ovládání programu Eclipse je velmi jednoduché, neboť nabízí nápovědu a pomáhá i při vytváření nového programu. Umožňuje také krokování programu, překlad, a současně

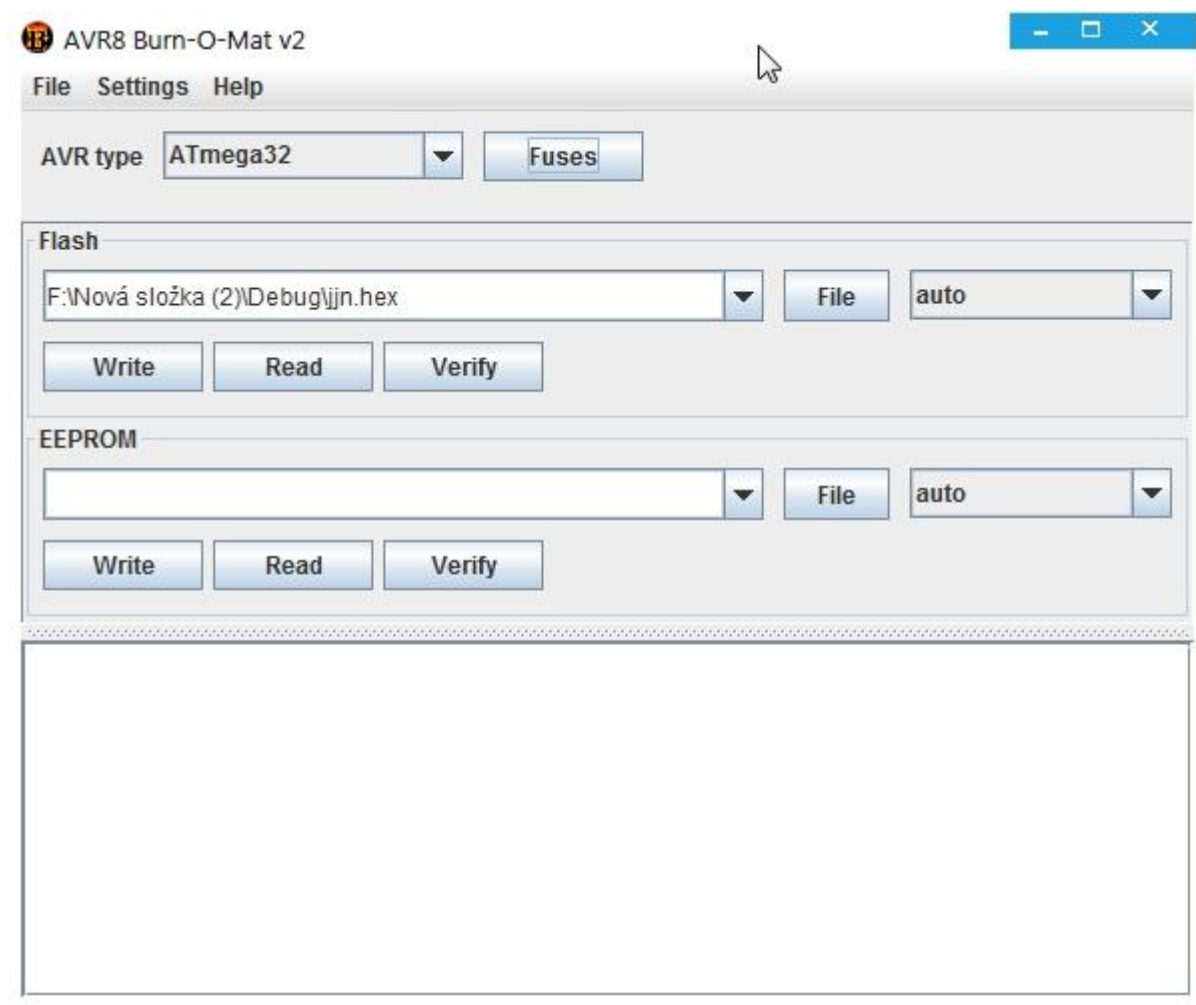
možnost nahrát námi vytvořený program pro ovládání ATmega32 přímo do mikrokontroléru. Tuto možnost jsme však nevyužili a místo toho jsme zvolili program AVR Burn-O-Mat v2.

AVR Burn-O-Mat v2 je jednoduchý program na ovládání. Tento program dokáže načíst fuses (read fuses) bity z mikrokontroléru. Umožňuje jiné nastavení pomocí Hex editoru nebo pomocí zaškrťovacích políček, a poté následné nahrání (write fuses) těchto bitů do mikrokontroléru.



Obr. 4.2.1 Ovládání fuses bitů

Program, který chceme nahrát do Flash paměti zvolíme pomocí File a následně zapíšeme (write) do paměti. Pokud potřebujeme přečíst program z mikrokontroléru, využijeme tlačítko read.



Obr. 4.2.2 Nahrání a čtení programu do/z flash paměti

Po nahrání programu jsou data zkontrolována. Pokud vše proběhlo úspěšně, uživatel je po dokončení nahrávání informován pomocí textu na obrazovce počítače. V opačném případě se zobrazí chybové hlášení a nahrávání se musí zopakovat. Pro to, aby se program mohl nahrát, musí být počítač propojen s vývojovým kitem EvB 4.3.

Pro naprogramování mikrokontroléru byl použit jazyk C. Tento jazyk byl zvolen z toho důvodu, že je velmi rozšířený, přehledný a existuje pro něj mnoho programovacích prostředí a překladačů.

#### 4.2.2 Programovací jazyk C

Programovací jazyk C byl především určen pro programování systémových aplikací pod systémem Unix. V dnešní době patří mezi nejrozšířenější programovací jazyky.

Nepoužívá se jen pro systémové aplikace, ale také pro programování mikrokontrolérů PIC či Atmel. [17]

Pro jeho správnou funkci potřebuje uživatel konkrétní knihovny. Například pro ovládání vstupů a výstupů u mikrokontroléru ATmega32 se používá knihovna io.h. Tyto knihovny obsahují příkazy, které uživateli usnadňují práci.

Každý, kdo se chce naučit programovat mikrokontroléry v jazyce C, by měl ovládat Assembler. Při prvním setkání s jazykem C většinou narazíme na jednoduché aplikace jako je například rozsvícení LED diody po stisknutí tlačítka.

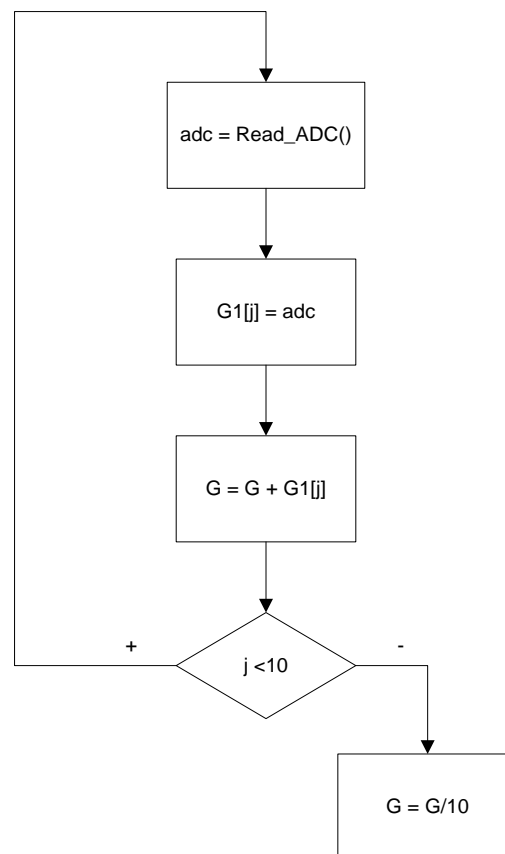
```
#include <avr/io.h>
int main (void){
  DDRB = 0xFF;
  DDRD = 0x00;
  PORTB = 0xFF;
  PORTD = 0x00;
  while (1){
    if(!(PIND&_BV(PD0)))
      PORTB =0xFF;
    else
      PORTB = 0x00;
  }
}
```

Pomocí příkazu DDRx nastavíme piny mikrokontroléru dle potřeby jako výstupní (0xFF) nebo jako vstupní (0x00). Nastavení můžeme provádět pomocí hexa kódu, který je zobrazen v příkladu nebo pomocí binárního kódu, kde lze vidět, jednotlivé bity např.: 0b01010100. Jedná se o zobrazení jednoho bajtu, který je složen z 8 bitů. Příkaz WHILE(1) nám zařizuje cyklus, jednička v závorce nám zařídí nekonečný cyklus. Pomocí PORTx nastavujeme stav, zda je pin uzemněn či nikoliv. Funkce IF slouží k zjištění, zda je tlačítko stisknuto. Pokud je tlačítko stisknuté, vykoná se příkaz PORTB = 0xFF, a pokud není, vykoná se příkaz za ELSE, tj. PORTB = 0x00.

### 4.3 Algoritmus detekce barvy

Detekce barvy spočívá ve srovnávání velikosti odraženého zeleného, modrého a červeného světla od barevného předmětu. Množství odraženého světla se zajišťuje pomocí AD převodníku, který je součástí mikrokontroléru ATmega32.

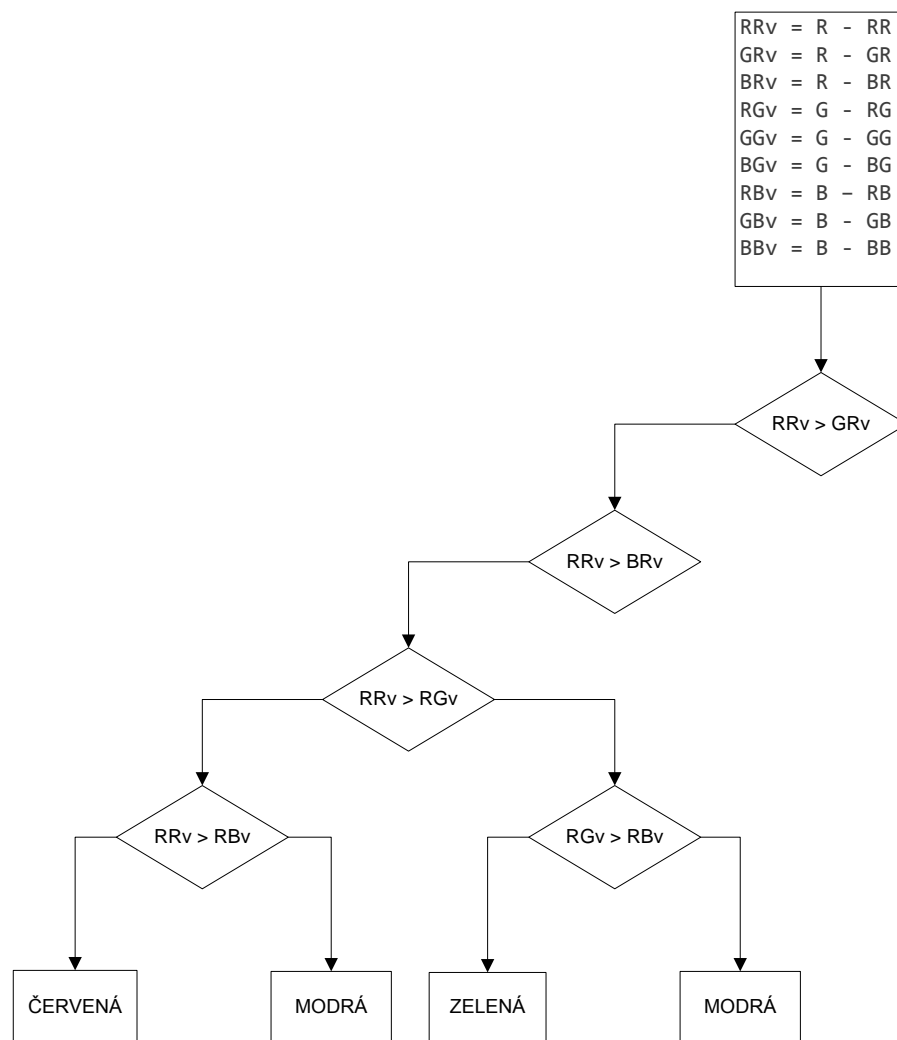
Detekci barvy mají na starost RGB diody a fotorezistor, který je zapojen do série s rezistorem, za pomoci mikrokontroléru ATmega32. Pomocí ATmega32 je měřeno napětí na rezistoru. Toto napětí je pak převedeno mikrokontrolérem na hodnotu odraženého světla. Zjištěné hodnoty jsou mezi sebou porovnány. Barva snímaného předmětu je dána největší hodnotou. Na obrázku 4.3.1 je ukázka algoritmu pro snímání zelené barvy.



Obr. 4.3.1 Ukázka algoritmu pro snímání zelené barvy

Na obrázku 4.3.2 je ukázka algoritmu pro rozpoznání barvy. Nejdříve je snímána červená barva, poté zelená a nakonec modrá. Každá barva je snímána 10x za sebou a z těchto hodnot je udělána průměrná hodnota. Poté se hodnoty upraví pomocí načtených hodnot z autokalibrace. Při každém z deseti snímání je každá barva snímána řádově tisíckrát, aby

došlo k řádnému ustálení napětí na fotorezistoru a rezistoru po změně z jedné barvy na další. Pokud by nedošlo k ustálení, odraz by měl jinou hodnotu, a tím pádem by zde byla možnost, že barva bude vyhodnocena chybně.

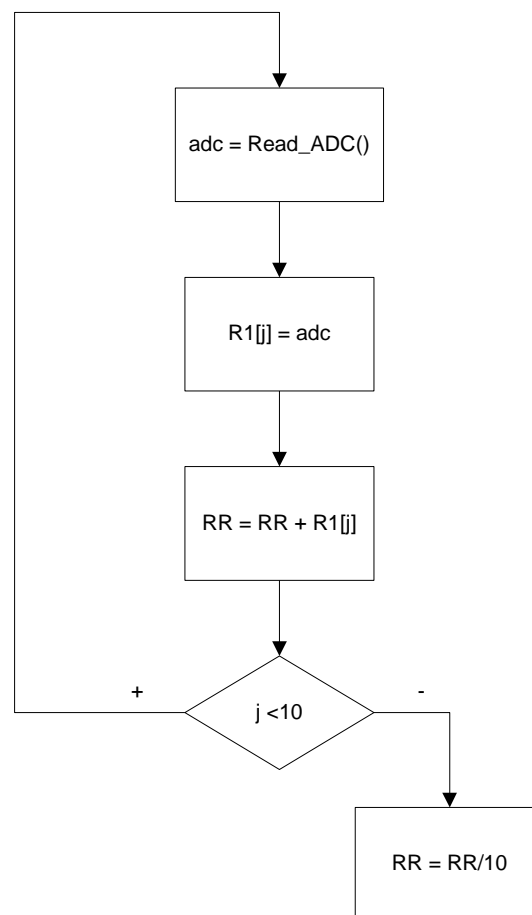


Obr. 4.3.2 Ukázka algoritmu pro rozpoznání barvy pomocí červené

## 4.4 Algoritmus autokalibrace

Autokalibrace je zde zavedena z důvodu závislosti fotorezistoru na teplotě. Jakmile se zvětší teplota v místnosti o pouhý 1 °C, detektor barvy funguje nesprávně. Autokalibrace funguje tedy tak, že před používáním detektoru barvy se nejdříve nasnímají hodnoty jednotlivých barevných kuliček. Není to však nutností. Při autokalibrace je barva snímané kuličky známa. Nejdříve vložíme červenou kuličku a z této kuličky změříme velikost odražené červené, zelené a modré barvy. Po červené kuličce následuje zelená a modrá.

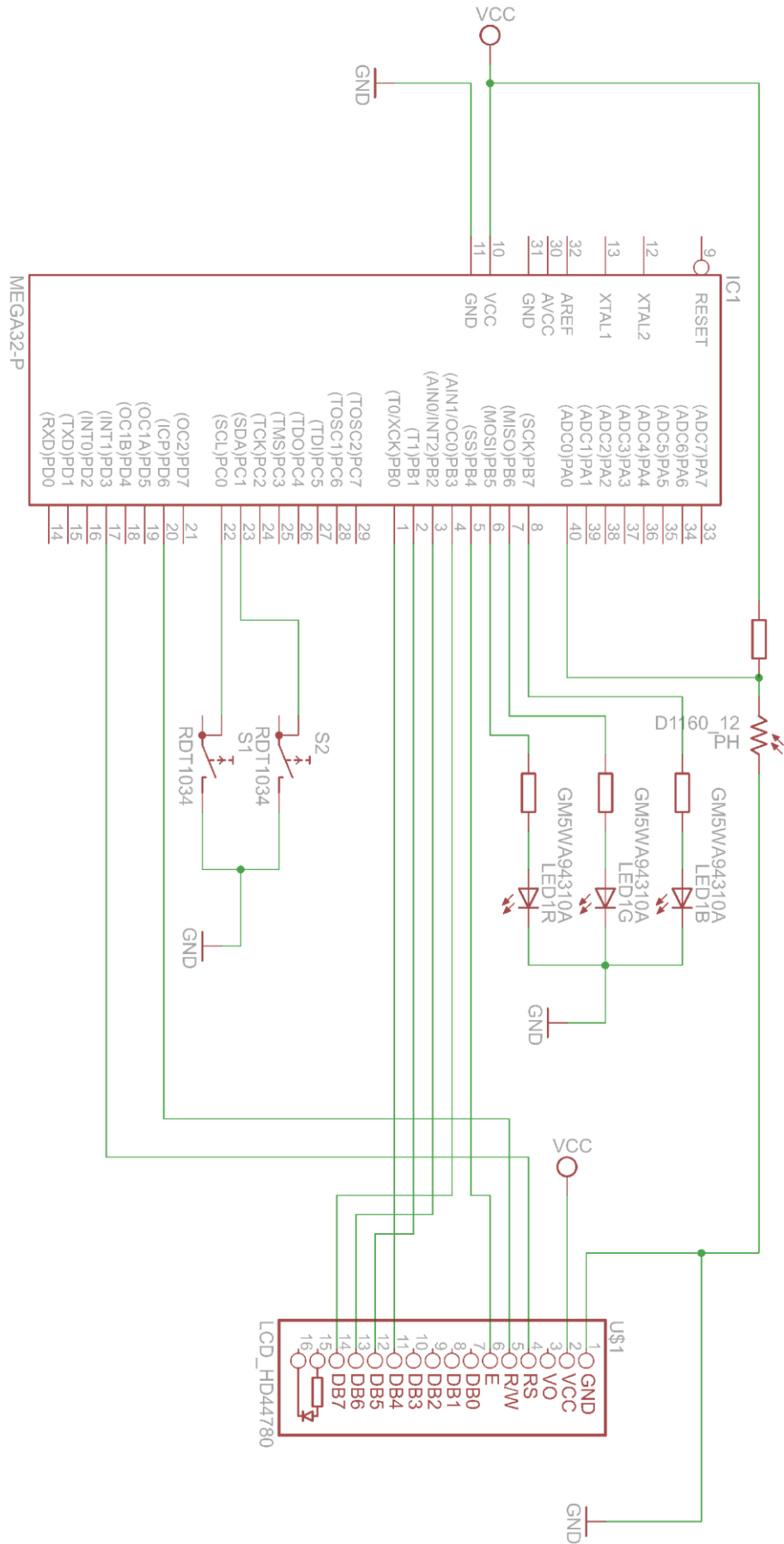
Stejně jako u detekce barvy je každá hodnota snímána pomocí AD převodníku v počtu 10-ti hodnot, ze kterých je poté udělána průměrná hodnota. Systém pracuje s hodnotami, které jsou zaokrouhleny na celá čísla, a to z toho důvodu, že rozdíly mezi hodnotami odraženého paprsku jsou řádově v desítkách a stovkách. Proces je pak zopakován stejně pro všechny barvy.



Obr. 4.4.1 Ukázka algoritmu pro autokalibrace, snímání červené barvy u červeného míčku



Schéma celého zapojení je zobrazeno na obrázku 4.4.2. Je zde ukázáno zapojení pro RGB diodu i pro tlačítka, kterými je vybrána jedna z voleb, jako jsou autokalibrace nebo detekce barvy. Dále je zde zapojen LCD display, na kterém se zobrazuje aktuální proces. Řídící program v jazyce C je uložen na CD ROM.



Obr. 4.4.2 Schéma zapojení

## 5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout, a poté realizovat řídicí jednotku pro systém detekce barvy s autokalibrací. Hlavním cílem bylo provést návrh algoritmu pro detekci barvy a pro autokalibraci a toto vše naprogramovat a oživit systém.

Práce byla rozdělena na hardwarovou a softwarovou část. Do hardwarové části patří návrh a následné zapojení součástek pro detekci barvy. Při prvotním řešení zde byly použity diody: červená, dvě modré a dvě zelené. Dvojnásobný počet modré a zelené diody byl použit z důvodu menší svítivosti než je tomu u diody červené. Toto řešení se ale ukázalo být nevhodným, protože každá dioda osvětlovala míček z jiného místa. Tím může docházet k chybnému snímání napětí na rezistoru a ke špatnému vyhodnocení barvy. V řešení diskutovaném v této bakalářské práci je použita pouze RGB dioda, takže jsou míčky osvětlovány z jednoho místa, čímž se zvýší správnost detekce barvy. RGB dioda byla vybrána tak, aby rozsah svítivosti jednotlivých barev byl přibližně stejný a nemohlo tak docházet k tomu, že jedna z barev osvítí míček větší intenzitou než ostatní barvy. Díky tomuto řešení se zvýšila přesnost detekce barvy. Dále byla vytvořena nová šachta, ve které je toto zapojení umístěno na univerzálním plošném spoji. Plošný spoj je k nahlédnutí v příloze na obrázku B a C. Celkové zapojení hardwarové části s vývojovým kitem a již dokončenou šachtou je ukázáno v příloze na obrázku A.

Do softwarové části patří samotné naprogramování mikrokontroléru, které může být rozděleno na dvě části. První část programu se zabývá detekcí barvy. Program řídí posloupnost rozsvěcování a zhasínání diod při detekci a mimo to řídí převod napětí naměřeného na rezistoru, který je zapojen v sérii s fotorezistorem.

Druhá část programu se zabývá autokalibrací. Při autokalibraci dochází k tomu, že jednotlivé barevné kuličky jsou vždy snímány každým světlem. Jednotlivé hodnoty jsou poté uloženy do proměnných (např.:  $GR_v$   $RR_v$ ,  $BG_v$ , kde první písmeno určuje barvu světla a druhé písmeno barvu kuličky). Díky tomuto řešení se pak při samostatném rozpoznávání vypočte rozdíl hodnot z autokalibrace a hodnoty nasnímané při detekci. Rozpoznání barvy je vztaženo k červené barvě. Při určování barvy je posléze zjištěno, která z hodnot  $RR_v$ ,  $GR_v$  a  $BR_v$  je větší. V případě, že bude největší  $GR_v$ , budou se dále porovnávat hodnoty  $GR_v$ ,

GGv a GBv. Nejvyšší hodnota pak odpovídá barvě kuličky. Proto bude ovlivnění teplotou detektoru barvy zanedbatelné, jelikož při autokalibraci se pracuje s aktuálními hodnotami, které jsme předtím naměřili a vypočetli. Autokalibrace však bude muset být prováděna při každé změně teploty, která ovlivňuje fotorezistor. Tuto situaci je možné vyřešit nainstalováním teplotního čidla, které by dalo mikrokontroléru signál a ten by autokalibraci provedl automaticky. Vývojový diagram tohoto programu je umístěn v příloze na obrázku D.

Algoritmus detekce barvy a algoritmus autokalibrace byl úspěšně navrhnout, a poté byl díky tomu i oživen celý systém, který úspěšně funguje. Po vytvoření nové šachty, jejíž vnitřek je natřen černou barvou, dochází k tomu, že se barva z diody odráží pouze od snímaného předmětu a ne od vnitřku šachty, protože černá barva paprsek pohltí a neodrazí ho zpět na fotorezistor. Tvorba šachty nebyla v zadání, ale byla navržena pro zvýšení účinnosti. Systém tedy pracuje za lepších podmínek s lepšími výsledky.

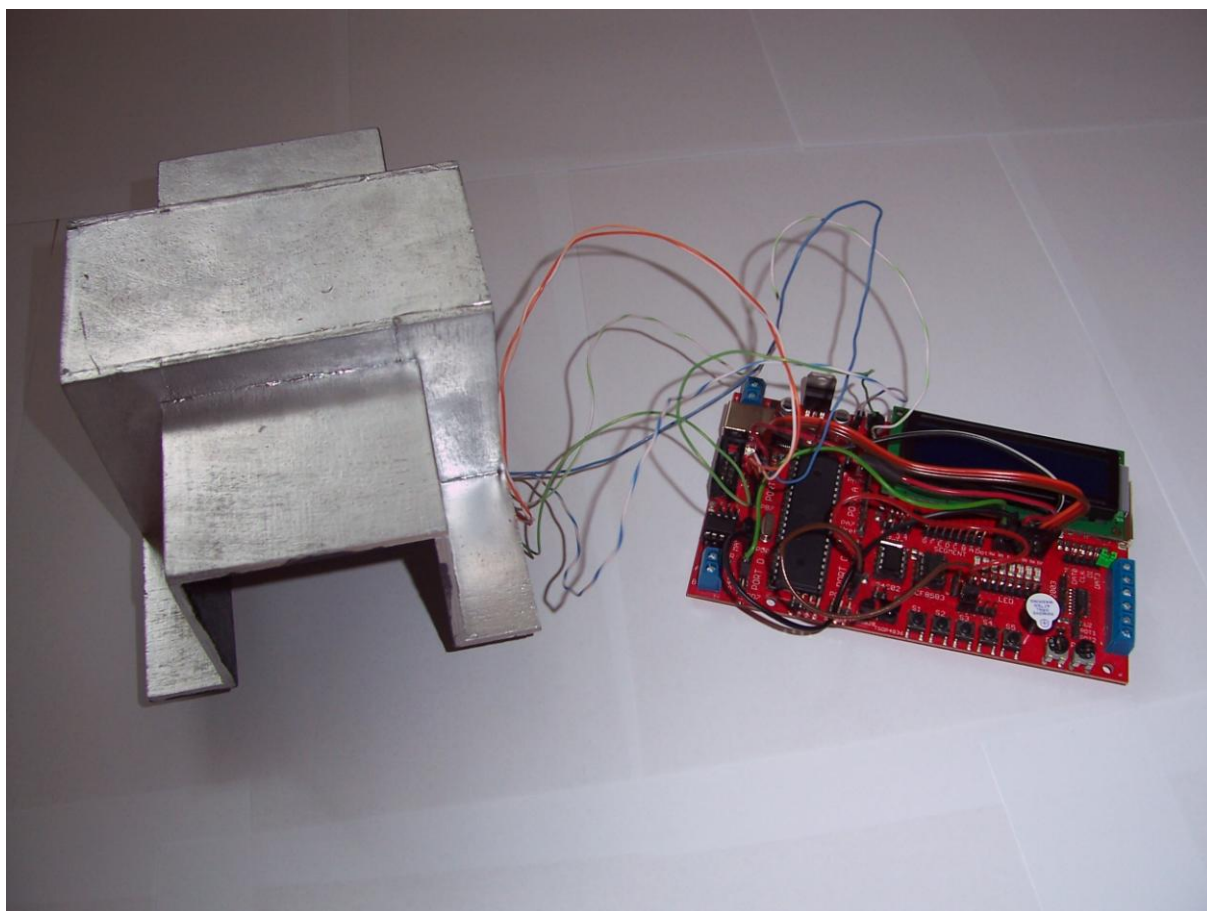
Jiným řešením pro autokalibraci by bylo to, že při každé sté detekci by se systém sám kalibroval. Na základě toho by mohla fungovat samovolně, nebylo by tudíž potřeba systém kalibrovat ručně.

## Seznam použité literatury a informačních zdrojů

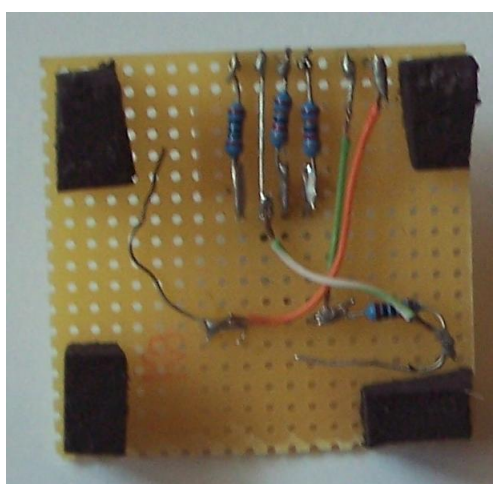
- [1] VOJÁČEK, Antonín. Detektory barvy = Colour sensors. 2006[online]. [cit. 2013-03-01]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006012001>
- [2] Sensopart: Through-beam photoelectric sensor. [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/sensopart/through-beam-photoelectric-sensors-9202-796457.html>
- [3] TCS3200-DB Color Sensor. [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.parallax.com/Store/Sensors/ColorLight/tabid/175/ProductID/429/List/0/Default.aspx?SortField=ProductName,ProductName>
- [4] VÁŇA, Vladimír. *ARM pro začátečníky*. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 195 s. ISBN 978-80-7300-246-6.
- [5] ROBENEK, Jan. RISCuj s napájením 0.7 V!. [online]. 2009 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/soucastky/riscuj-s-napajenim-07-v.html>
- [6] BENEŠ, Petr. *Mechatronické modely výrobních procesů*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [7] Návod k použití: Vývojový kit EvB 4.3 v4 [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/752/752-446/czn.752-446.1.pdf>
- [8] CodevisionAVR + EvB 4.3 v4 M32[online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.parallax.com/Store/Sensors/ColorLight/tabid/175/ProductID/429/List/0/Default.aspx?SortField=ProductName,ProductName>
- [9] LCD 16x2 2x16 ZN. MODRÝ HD44780 | Arduino AVR PIC. [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://archiv.aukro.cz/lcd-16x2-2x16-zn-modry-hd44780-arduino-avr-pic--i3074794054>
- [10] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
- [11] Fotorezistor. [online]. 2013 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotorezistor>
- [12] Fotorezistor. [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~houlec/www/htm/fotorezistor.htm>
- [13] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 342 s. ISBN 80-730-0146-2.
- [14] Rezistor. Rezistor [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://bastleni.skovstudio.cz/index.php?stranka=soucastka01&id=3>
- [15] MURTINGER, Karel. Jak snížit spotřebu energie v budovách?: Výhody LED osvětlení. [online]. 2011 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/stavba/jak-snizit-spotrebu-energie-v-budovach.aspx>

- [16] 8-bit Microcontroller with 32KBytes In-System Programmable Flash: ATmega32 [online]. 2011[cit.2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.cs.ubbcluj.ro/~alibal/Teaching/Microcontrollers/atmega32.pdf>
  
- [17] Historie a vývoj jazyka C (od C až po C#): Programovací jazyk C. [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003p/xcernoh1.htm>

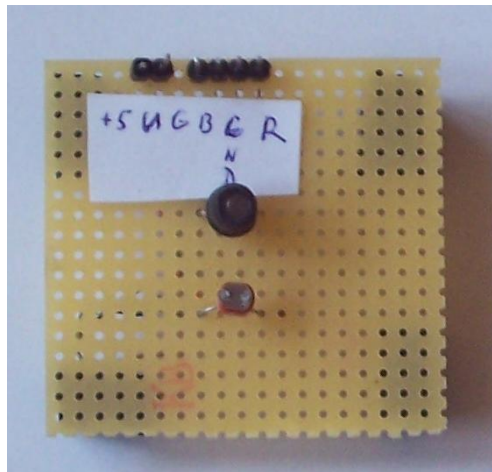
## Přílohy



Obr.: A – Zapojení snímací šachty s vývojovým kitem EvB 4.3 v4

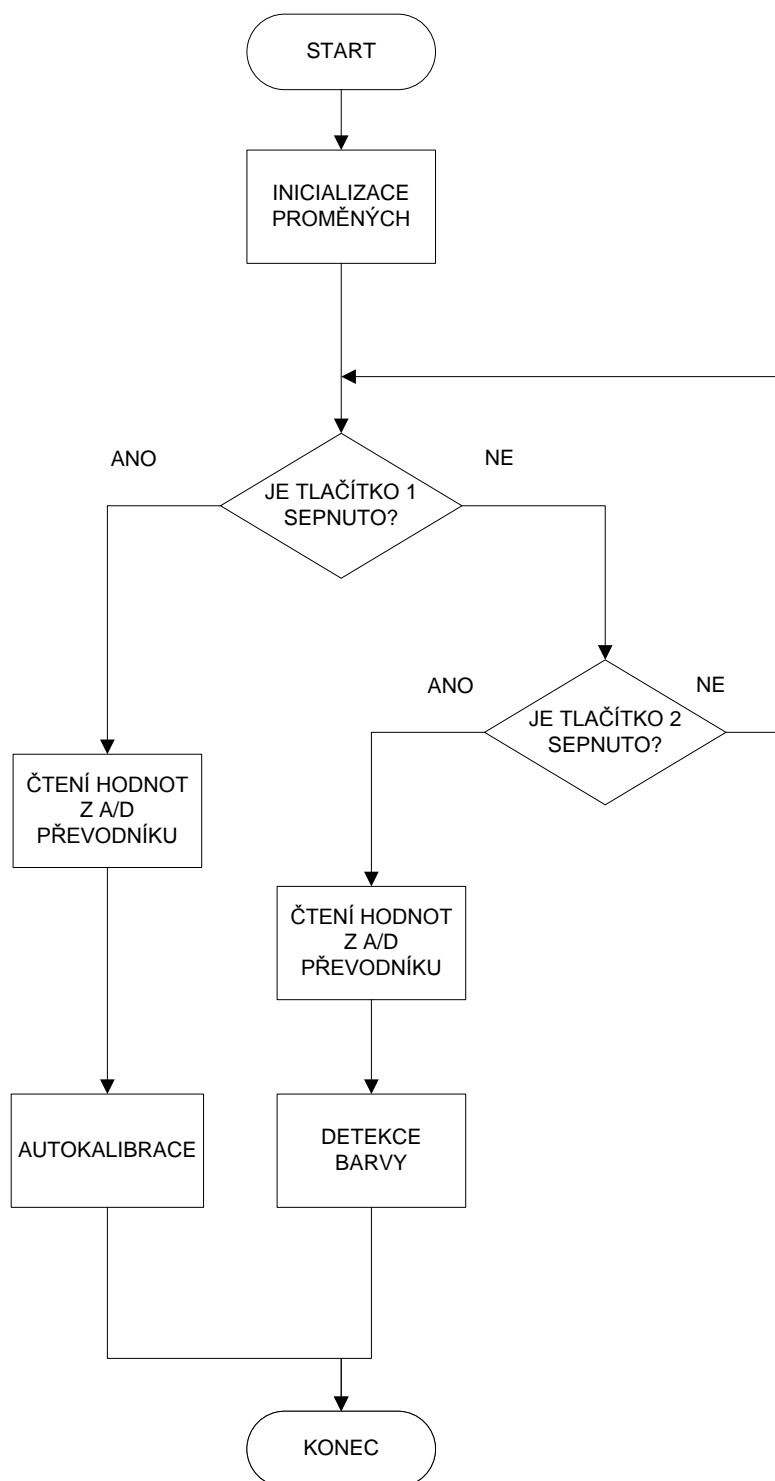


Obr.: B – Zapojení HW části detektoru barvy (zakrytá část detektoru)



Obr.: C – RGB dioda a fotorezistor ve funkčním zapojení (viditelná část detektoru)





Obr.: D – Vývojový diagram