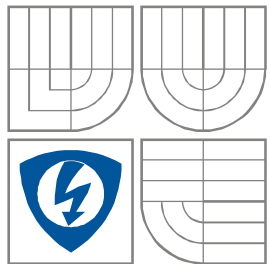




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# ŘÍZENÍ MATICOVÝCH SVĚTLOMETŮ S LED DIODAMI

CONTROL OF PIXEL FRONT LIGHTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Pavel Kostelník

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Jiří Matoušek, Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Bc. Pavel Kostelník

**ID:** 136545

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

**NÁZEV TÉMATU:**

## Řízení maticových světlometů s LED diodami

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Podrobně se seznamte s integrovanými obvody NCV78703, NCV78723 a především NCV78247 firmy ON Semiconductor - inteligentní budič LED světlometu v automobilovém průmyslu. Navrhněte základní obvodové zapojení řídicího obvodu pixelů NCV78247, zařízení realizujte a ověřte jeho funkčnost vhodným měřením jednotlivých parametrů budiče.

Zaměřte se zejména na algoritmy pro řízení maticových světlometů. Jedná se o ovládání směru a intenzity světla s optimalizací stmívání jednotlivých LED diod. LED diody zapojené v sérii jsou buzeny zdrojem proudu tvořeným DC/DC měničem a paralelně ke každé LED diodě je zapojen zkratovací spínač, pomocí kterého je možné s využitím PWM modulace ovládat intenzitu generovaného světla. Cílem je navrhnout a optimalizovat algoritmy pro řízení PWM modulace jednotlivých LED diod, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování intenzity generovaného světla.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FRÝZA T., FEDRA Z., ŠEBESTA J. Mikroprocesorová technika, Laboratorní cvičení. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 51s. ISBN: 978-80-214-3756-2.

[2] NXP Semiconductors. LPC407x datasheet. 2013. 139s. [cit. 9.5.2014], Dostupné z WWW: <[http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/LPC408X\\_7X.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC408X_7X.pdf)>.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 21.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## **ABSTRAKT**

Tato práce pojednává o novém trendu v automobilovém osvětlení – maticovém LED světlometu. Práce obsahuje pojednání o konstrukci světlometu, obecných funkcích nového typu světlometu a možnosti řízení novým integrovaným obvodem společnosti ON Semiconductor. Cílem této práce je návrh algoritmů zajišťujících správnou funkci integrovaného obvodu. Součástí je také návrh a sestavení demonstrační aplikace s tímto obvodem, která bude sloužit k prezentaci integrovaného obvodu pro zákazníky.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Světlomet, neoslňující světlomet, LED, PWM, řízení LED, RTX RTOS, dimming algoritmus

## **ABSTRACT**

This master's thesis presents new tendency in automotive lighting – matrix LED headlamp. This thesis consists of description of matrix headlamp construction, main functions of matrix headlamp and controlling by using new integrated circuit, developed by ON Semiconductor Company. The aim of this project is concept of algorithm, which provides correct function of integrated circuit. A part of this thesis is to develop and assembly evaluation kit with this integrated circuit, which will be use to present integrated circuit for customers.

## **KEYWORDS**

Headlamp, glare-free headlamp, LED, PWM, LED controller, RTX RTOS, dimming algorithm

KOSTELNÍK, P. *Řízení maticových světlometů s LED diodami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 62 s., 14 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Matoušek, Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Řízení maticových světlometů s LED diodami jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucím diplomové práce Ing. Jiřímu Matouškovi a Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Výzkum popsáný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených projektem Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX); registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Seznam obrázků</b>  | <b>X</b>    |
| <b>Seznam tabulek</b>  | <b>XIII</b> |
| <b>Úvod</b>  | <b>1</b>    |
| <b>1 Maticový LED světlomet</b>                              | <b>2</b>    |
| 1.1 Topologie zapojení LED diod v maticovém světlometu ..... | 2           |
| 1.1.1 Řízení paralelně spojených LED diod .....              | 3           |
| 1.1.2 Řízení sériově spojených LED diod .....                | 3           |
| 1.2 Funkce maticového LED světlometu.....                    | 4           |
| 1.3 Konstrukce maticového LED světlometu .....               | 6           |
| 1.3.1 Počet LED diod.....                                    | 6           |
| 1.3.2 Audi Matrix Headlight.....                             | 6           |
| 1.3.3 Osram Matrix Modules .....                             | 8           |
| 1.3.4 Mercedes-Benz Multibeam Headlamp .....                 | 9           |
| 1.4 Diskrétní řešení budiče LED světlometu .....             | 10          |
| 1.5 Integrovaný budič LED světlometu .....                   | 11          |
| 1.5.1 SPI komunikace .....                                   | 11          |
| 1.5.2 Řízení spínačů pomocí PWM .....                        | 12          |
| 1.5.3 Konfigurace LED diod.....                              | 13          |
| 1.5.4 Diagnostika .....                                      | 14          |
| 1.5.5 Tepelné ztráty v integrovaném obvodu .....             | 14          |
| <b>2 Návrh hardwarové části</b>                              | <b>16</b>   |
| 2.1 Návrh plošného spoje evaluační desky .....               | 16          |
| 2.2 Návrh desky plošného spoje s LED diodami.....            | 18          |
| 2.3 Návrh mikrokontrolérové desky plošného spoje .....       | 20          |
| <b>3 Řešení softwarové části</b>                             | <b>22</b>   |
| 3.1 Firmware mikrokontroléru.....                            | 23          |
| 3.2 Software pro počítač .....                               | 24          |
| 3.2.1 Záložka Pixel light .....                              | 25          |
| 3.2.2 Záložka NCV78247 .....                                 | 26          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2.3    | Záložka SPI.....  | 27        |
| 3.2.4    | Záložka Pixel functions .....   | 28        |
| <b>4</b> | <b>Měření parametrů integrovaného budiče a evaluačního kitu</b>         | <b>30</b> |
| 4.1      | Spotřeba obvodu .....   | 30        |
| 4.2      | Odpor spínačů .....   | 31        |
| 4.3      | Měření synchronizační frekvence .....                                   | 32        |
| 4.4      | Průběhy napětí a proudu na spínači .....                                | 32        |
| 4.5      | Měření teplot navrhnutých desek.....                                    | 34        |
| <b>5</b> | <b>Algoritmy pro řízení maticových světlometů</b>                       | <b>37</b> |
| 5.1      | Dimming algoritmy.....  | 37        |
| 5.1.1    | Algoritmus s konstantním posuvem fáze.....                              | 39        |
| 5.1.2    | Jednoduchý algoritmus s překrýváním .....                               | 41        |
| 5.1.3    | Jednoduchý algoritmus s překrýváním a kompenzací přes více period<br>43 |           |
| 5.1.4    | Pokročilý algoritmus s překrýváním.....                                 | 44        |
| 5.1.5    | Porovnání jednotlivých algoritmů .....                                  | 49        |
| 5.2      | Aproximace při pohybu světla .....                                      | 52        |
| 5.3      | Funkce světlometu .....   | 53        |
| 5.3.1    | Wiping blinker .....  | 53        |
| 5.3.2    | Dark zone .....   | 55        |
| 5.3.3    | Bending light.....  | 57        |
| <b>6</b> | <b>Závěr</b>  | <b>58</b> |
|          | <b>Literatura</b>   | <b>59</b> |
|          | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>                                 | <b>60</b> |
| <b>A</b> | <b>Podklady k desce plošného spoje k evaluační desky</b>                | <b>63</b> |
| A.1      | Obvodové zapojení evaluační desky.....                                  | 63        |
| A.2      | Deska plošného spoje evaluační desky– top (strana součástek).....       | 64        |
| A.3      | Deska plošného spoje evaluační desky– bottom (strana spojů).....        | 65        |
| A.4      | Seznam součástek evaluační desky.....                                   | 65        |
| <b>B</b> | <b>Podklady k desce plošného spoje LED desky</b>                        | <b>67</b> |
| B.1      | Obvodové zapojení LED desky .....                                       | 67        |
| B.2      | Deska plošného spoje LED desky – top (strana součástek).....            | 68        |



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| B.3      | Deska plošného spoje LED desky – bottom (strana spojů) .....       | 69        |
| B.4      | Seznam součástek LED desky .....                                   | 70        |
| <b>C</b> | <b>Podklady k MCU desce plošného spoje</b>                         | <b>71</b> |
| C.1      | Obvodové zapojení mikrokontrolérové desky .....                    | 71        |
| C.2      | Deska plošného spoje MCU desky – top (strana součástek) .....      | 72        |
| C.3      | Deska plošného spoje MCU desky – bottom (strana spojů).....        | 72        |
| C.4      | Deska plošného spoje MCU desky – Mid1 (První vnitřní vrstva).....  | 73        |
| C.5      | Deska plošného spoje MCU desky – Mid2 (Druhá vnitřní vrstva) ..... | 73        |
| C.6      | Seznam součástek MCU desky .....                                   | 73        |
| <b>D</b> | <b>Komunikační protokol</b>  | <b>75</b> |
| D.1      | Část 1/2 .....   | 75        |
| D.2      | Část 2/2 .....   | 76        |

# SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1.1 Příklady umístění LED diod v maticovém světlometu v řezu.....                                 | 2  |
| Obr. 1.2 Paralelní zapojení LED diod s jejich ovládním .....   | 3  |
| Obr. 1.3 Sériové zapojení LED diod s jejich ovládním .....   | 4  |
| Obr. 1.4 Kresby předních světlometů v různých situacích [2] .....                                      | 5  |
| Obr. 1.5 Porovnání standardních světlometů a maticových světlometů bránících oslnění řidičů [4] .....  | 5  |
| Obr. 1.6 Rozklad maticového LED světlometu Audi Matrix Headlight [5].....                              | 7  |
| Obr. 1.7 Hlavní část světlometu Audi Matrix Headlight – Matrix Beam [4].....                           | 7  |
| Obr. 1.8 LED modul pro maticové LED světlometry společnosti Osram [6].....                             | 8  |
| Obr. 1.9 Příklad možné aplikace Osram LED modulů s optikou [8].....                                    | 8  |
| Obr. 1.10 Popis světlometu Mercedes-Benz Multibeam Headlamp [9].....                                   | 9  |
| Obr. 1.11 Maticový LED modul světlometu Mercedes-Benz Multibeam Headlamp [10] .....                    | 9  |
| Obr. 1.12 Blokové schéma diskrétního řešení budiče maticového LED světlometu .....                     | 10 |
| Obr. 1.13 Obecný průběh SPI rámce [14] .....   | 11 |
| Obr. 1.14 Průběh jedné periody čítače pro dva spínače.....   | 12 |
| Obr. 1.15 Prodloužení signálu při změně ve stejný čas .....  | 13 |
| Obr. 1.16 Příklady konfigurací LED diod s různými maximálními proudy.....                              | 14 |
| Obr. 2.1 Blokové schéma evaluačního kitu .....   | 16 |
| Obr. 2.2 Ochrana proti přepólování a přepětí .....   | 17 |
| Obr. 2.3 Zapojení integrovaného budiče LED světlometu .....  | 17 |
| Obr. 2.4 Zapojení obvodu pro FAIL výstup .....   | 18 |
| Obr. 2.5 Fotografie hotové desky evaluačního kitu.....   | 18 |
| Obr. 2.6 Část schématu LED desky náležející jednomu spínači v integrovaném budiči LED světlometu ..... | 19 |
| Obr. 2.7 Nastavení LED desky pomocí propojek na pinových lištách.....                                  | 19 |
| Obr. 2.8 Fotografie hotové LED desky.....  | 20 |
| Obr. 2.9 Fotografie hotové mikrokontrolérové desky .....   | 21 |
| Obr. 3.1 Funkce firmwaru mikrokontroléru .....   | 24 |
| Obr. 3.2 Výchozí podoba programu po spuštění .....   | 25 |
| Obr. 3.3 Záložka NCV78247 v PC programu .....  | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 3.4 Záložka SPI v PC programu .....   | 28 |
| Obr. 3.5 Záložka Pixel functions v PC programu .....                                     | 29 |
| Obr. 4.1 Proudová spotřeba integrovaného budiče .....                                    | 31 |
| Obr. 4.2 Měření odporu kanálu tranzistoru $R_{DSON}$ .....                               | 31 |
| Obr. 4.3 Odchylka nastaveného synchronizačního kmitočtu .....                            | 32 |
| Obr. 4.4 Průběh jedné PWM periody pro dva spínače SW1 a SW2.....                         | 33 |
| Obr. 4.5 Sepnutí spínače SW2 .....   | 33 |
| Obr. 4.6 Průběh rozepnutí spínače SW2.....   | 34 |
| Obr. 4.7 Průběh proudu spínačem a LED řetězcem při sepnutí spínače SW1 .....             | 34 |
| Obr. 4.8 Měřicí bod (červená tečka) na měřených deskách.....                             | 35 |
| Obr. 4.9 Závislost teploty desky evaluačního kitu na proudu budičem.....                 | 35 |
| Obr. 4.10 Závislost teploty desky s LED diodami na proudu LED diodami.....               | 36 |
| Obr. 5.1 Kapacita na výstupu proudového zdroje .....                                     | 38 |
| Obr. 5.2 Ideální a reálný případ výsledku dimming algoritmu.....                         | 38 |
| Obr. 5.3 Ideální a reálný případ s použitím skryté LED diody.....                        | 39 |
| Obr. 5.4 Obecný výsledek algoritmu s konstantním posuvem fáze pro dvě skupiny jasů ..... | 39 |
| Obr. 5.5 Řešení přetečení při velkých střídacích .....                                   | 40 |
| Obr. 5.6 Řešení překrytí OFF časů .....  | 40 |
| Obr. 5.7 Vývojový diagram algoritmu s konstantním posuvem fáze .....                     | 41 |
| Obr. 5.8 Výsledek jednoduchého algoritmu s překrýváním .....                             | 42 |
| Obr. 5.9 Snížení určité střídy pro odstranění konfliktu překrytí dvou ON časů.....       | 42 |
| Obr. 5.10 Vývojový diagram jednoduchého algoritmu s překrýváním (nefunkční) .....        | 43 |
| Obr. 5.11 Řešení problému při překrytí více ON časů s kompenzací přes více period..      | 44 |
| Obr. 5.12 Řešení problému při seskládání pokročilým algoritmem .....                     | 44 |
| Obr. 5.13 Zaokrouhlení jasu SW4 dle dostupných timeslotů (šedé čáry) .....               | 45 |
| Obr. 5.14 Postup řešení pokročilého algoritmu s překrýváním .....                        | 46 |
| Obr. 5.15 Nejhorší případ při vkládání smyčky.....                                       | 46 |
| Obr. 5.16 Vývojový diagram pokročilého algoritmu s překrýváním .....                     | 48 |
| Obr. 5.17 Záznam přechodů, zleva OFF; ON; ON + OFF; ON + (OFF-1).....                    | 49 |
| Obr. 5.18 Ovlivnění DC nepřirazením TR vektoru .....                                     | 50 |
| Obr. 5.19 Pohyb světla bez aproximace (nahore) a s aproximací (dole) .....               | 52 |
| Obr. 5.20 Aproximační funkce lineární a exponenciální.....                               | 53 |
| Obr. 5.21 Ukázka funkce Wiping blinker.....  | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 5.22 Časování pro funkci wiping blinker ..... | 54 |
| Obr. 5.23 Ukázka funkce dark zone .....            | 56 |
| Obr. 5.24 Ukázka funkce bending light.....         | 57 |

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1 Rozdělení periody na časy sepnutí jednotlivých spínačů .....       | 40 |
| Tabulka 2 Počet timeslotů pro danou dimming frekvenci .....                  | 45 |
| Tabulka 3 Přehled nejhorších případů pro pokročilý algoritmus .....          | 47 |
| Tabulka 4 Porovnání rychlosti výpočtu algoritmu na různých platformách ..... | 51 |
| Tabulka 5 Paměťové nároky algoritmů s různou dimming frekvencí .....         | 51 |
| Tabulka 6 Porovnání dimming algoritmů pro dimming frekvenci 1 kHz .....      | 51 |

# ÚVOD

V dnešní době vlivem stálého vývoje dochází k mnoha změnám, zvláště v automobilovém průmyslu, ve kterém se výrobci předhánějí v množství funkcí jejich vozidel. Důležitou součástí automobilu, zvláště v noci, jsou světlomety. Tato práce si bere za cíl seznámit čtenáře s jedním z trendů vývoje světlometů, a to s využitím řízené matice LED diod, kde je možné regulovat jas a směr vyzařovaného světla, a navrhnout funkční ukázkové zařízení pro řízení LED světlometů.

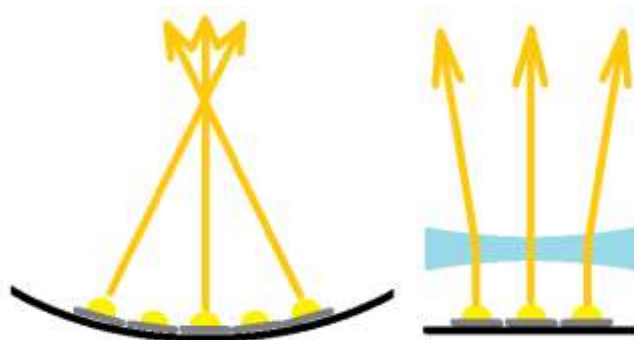
Tato práce vznikla ve spolupráci se společností ON Semiconductor, která vyvíjí pro tento trend vlastní řešení v podobě integrovaných obvodů. Konkrétně jsou to obvody zvyšujícího měniče NCV78703 (boost), snižujícího měniče NCV78723 (buck) a inteligentního budiče NCV78247 (pixel light). Tato práce navazuje na diplomovou práci Ing. Jiřího Christena, která se zabývala návrhem zdrojové části, tedy obvody zvyšujícího a snižujícího měniče. Hlavním tématem této práce je inteligentní budič NCV78247, zvláště pak návrh algoritmů, zajišťujících jeho správnou funkci, jejich naprogramování, otestování v reálném provozu a porovnání mezi sebou z hlediska funkčnosti, náročnosti a rychlosti výpočtu.

Následující text je členěn do pěti kapitol. První část práce obsahuje obecný popis maticového LED světlometu, jeho konstrukci a účel použití, dále také přehled některých aktuálně používaných maticových LED světlometů s rozbohem. Součástí kapitoly je také popis budiče LED světlometu. Následující část popisuje návrh hardwarové části, mezi kterou patří návrh potřebných desek plošných spojů. Desky jsou popsány z hlediska funkčnosti a vzájemné interakce. Třetí kapitola pojednává o návrhu softwarové části, která se skládá z řídicího programu pro počítač v jazyce C# a programu pro mikrokontrolér v jazyce C, fungujícím na operačním systému reálného času RTX. Předposlední kapitola popisuje měření a vyhodnocení parametrů integrovaného budiče LED světlometu s použitím navržených desek plošných spojů a napsaných programů. Poslední kapitola obsahuje řešení algoritmu, poskytující správnou funkci integrovaného budiče, a dalších podpůrných programových částí.

# 1 MATICOVÝ LED SVĚTLOMET

LED diody se v automobilovém průmyslu používají v poslední době běžně. Již skoro 20 let je můžeme nalézt v přístrojové desce a obecně v interiéru auta. LED světla pro denní svícení se dnes vyskytují na většině nových automobilů. Vlivem pokroku ve výrobě vysoce svítivých LED diod se již objevují první vlašťovky v použití LED diod v hlavním předním světlometu namísto původních halogenových žárovek nebo xenonových výbojek. Nevýhodou halogenových žárovek i xenonových výbojek je obtížnější modifikace směru vyzařování, který je dán parabolou, případně další optikou ve světlometu. Dnes se změna směru vyzařování děje pomocí natáčecího mechanismu a krokového motoru uvnitř světla. To není příliš výhodné z hlediska rychlosti změny směru, ceny takového světlometu a náchylnosti mechanické konstrukce. Z tohoto důvodu přišla společnost ON Semiconductor s vývojem vlastního řešení inteligentně řízeného maticového světlometu.

Nejprve bude vhodné čtenáře obeznámit, co je vůbec pod pojmem maticový LED světlomet myšleno. Jedná se o světlomet, který obsahuje pole LED diod. Pro rozšíření využití funkcí světlometu je navíc nutné, aby všechny LED diody nesvítily do jednoho směru, ale je třeba zajistit, že každá LED dioda bude mířit do jiného směru. Toho můžeme dosáhnout například umístěním LED diod na nerovnou plochu, nebo použitím optiky – čočky rozptylky. Viz Obr. 1.1 ve 2D.



Obr. 1.1 Příklady umístění LED diod v maticovém světlometu v řezu

Tímto bude zajištěno, že směr vyzařujícího světla bude možné ztmavnutím nebo úplným zhasnutím konkrétní LED diody do daného směru snížit. Tento fakt by přinesl do oblasti předních světlometů další nové možnosti přizpůsobování světla a jejich paprsku měnícím se jízdními podmínkami a dovoloval by rychle na vzniklé situace reagovat. Jakým způsobem lze jednotlivé LED diody řídit popisuje další kapitola. O konkrétním využití a funkcích takovýchto světlometů pojednává kapitola 1.2.

## 1.1 Topologie zapojení LED diod v maticovém světlometu

V současné době, kde se LED diody využívají pro vnější osvětlení hlavně v zadních světlech a světlech pro denní svícení, zatím nebývá potřeba jas světla nijak regulovat, je

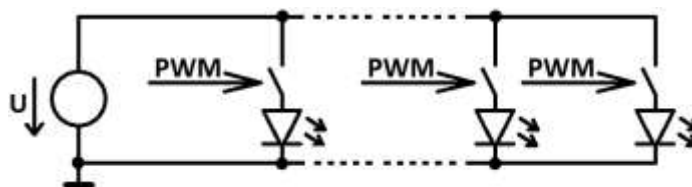
definován konstrukcí a zapojením světlometu. Zvláště pak regulace jasu samotných LED diod nezávisle na ostatních postrádala zatím smysl. Ovšem v kombinaci s maticovým LED světlometem, jak už bylo naznačeno, je to jedna z cest, kudy by se mohl ubírat vývoj předních světlometů. Je tedy nutné zajistit regulaci více LED diod nezávisle na sobě.

Existují dva přístupy k řešení tohoto problému, a to použití LED diod spojených sériově nebo paralelně [1]. Dále jsou tyto dva přístupy podrobněji rozebrány.

### 1.1.1 Řízení paralelně spojených LED diod

Paralelní spojení [1] jistě není nutné představovat, pro představu je však schéma, doplněné o spínače, uvedeno na obrázku. Spínače zde hrají důležitou funkci. Umožňují zapnout či vypnout danou LED diodu. Navíc použitím pulsně šířkové modulace (PWM) je možné řídit jas jednotlivých LED diod.

Je evidentní z Obr. 1.2, že se zde používá napěťový zdroj s nízkým výstupním odporem. Vzhledem k účinnosti je ideální použít spínaný zdroj, konkrétně například snižující měnič (buck).



Obr. 1.2 Paralelní zapojení LED diod s jejich ovládním

Použití této topologie má své výhody i nevýhody. K výhodám patří použití LED diod se společnou katodou. Dále použití pouze jednoho spínaného zdroje (bucku).

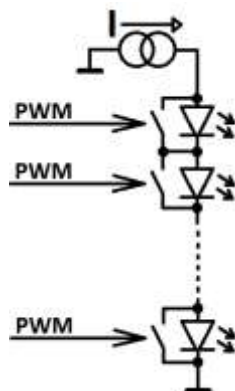
Naopak velkou nevýhodou této topologie, která velmi komplikuje její praktické použití, je náchylnost na mírné rozdíly ve V-A charakteristice použitých LED diod. Jinými slovy nejsou žádné dvě LED diody přesně stejné, a proto když se připojí na zdroj konstantního napětí, tak jednou LED diodou poteče větší proud, a druhou diodou menší proud, což způsobí nepatrný rozdíl v jejich svítivosti.

Další nevýhodou této topologie je příliš velký proud. Například při použití 12 LED diod s proudem 0,5 A je potřeba zdroj s proudem 6 A. Třetí nevýhodou je, že při vysokém jasu LED diod se teplo vytváří nejen v LED diodách, ale i ve spínačích.

### 1.1.2 Řízení sériově spojených LED diod

Druhou topologií, v praxi používanou, je sériové spojení LED diod a k nim paralelně zapojené spínače [1], jak je uvedeno na Obr. 1.3.





Obr. 1.3 Sériové zapojení LED diod s jejich ovládáním

Tato topologie využívá proudový zdroj, který dodává proud do LED řetězce. Jas se poté řídí paralelními spínači, kdy sepnutý spínač znamená zhasnutou LED diodu. Opět je zde možné využít PWM signálem řízené spínače k dosažení plynulé regulace jasu LED diod.

Tato topologie eliminuje nevýhodu paralelního zapojení, a to tím, že LED diody jsou napájeny konstantním proudem.

K nevýhodám této topologie patří složitější zdroj, který je možné nejlépe zkonstruovat ze zvyšujícího měniče, který vytvoří konstantní vysoké napětí, a snižujícího měniče, který již pracuje jako proudový zdroj a dodává potřebný proud do LED řetězce.

Tuto topologii si vybrala i společnost ON Semiconductor pro svoje řešení řízení maticového LED světlometu, které bude představeno dále.

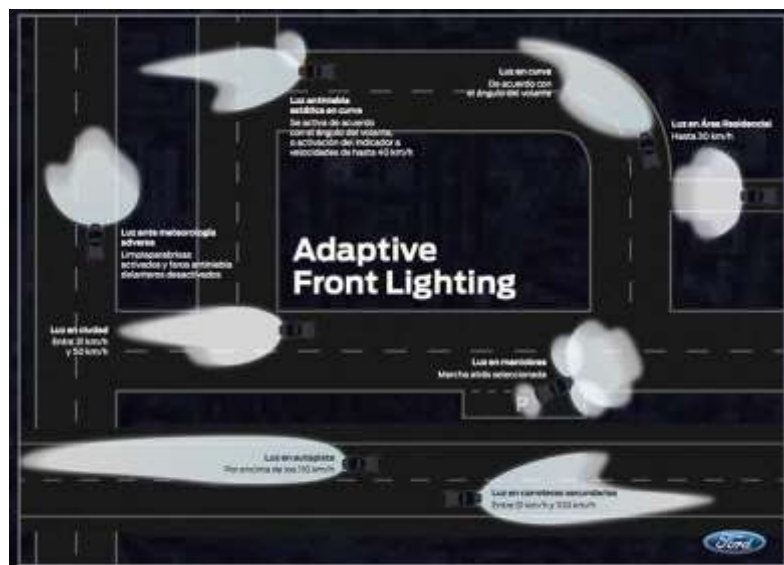
## 1.2 Funkce maticového LED světlometu

Aktuálním trendem v nejnovějších světlometech různých výrobců je přizpůsobování světla a jejich vyzařování aktuálním jízdám a okolním podmínkám. Tyto světlometry používají prakticky všichni velcí výrobci automobilů, ovšem obvykle pouze ve vyšších řadách automobilů, nebo jako příplatkovou výbavu. Různé světlometry různých výrobců mají různé funkce, i když ve výsledku jsou si dost podobné. Na Obr. 1.4 lze vidět grafiku pro světlometry společnosti Ford.

Je zde vidět například, že při zvyšující se rychlosti automobilu se prodlužuje paprsek světla, aby případný problém byl osvětlen dříve a řidič měl více času zareagovat.

Další možností je natáčení světlometů do zatáček, které samo o sobě není úplná novinka. Jedním z prvních automobilů, který umožňoval natáčení světlometů do zatáček, byl Citroen DS již od roku 1967 [3], kde byly světlometry natáčeny podle natočení volantu.

Jistě příjemné je také přisvícení při odbočování, například na vedlejší cestu, nebo při manévrech na parkovišti. Systém také rozpoznává průjezd obcí a mimo obcí, podle čehož také upravuje vyzařovací paprsek.



Obr. 1.4 Kresby předních světlometů v různých situacích [2]

Celý tento systém je možné také synchronizovat s mapovými podklady a družicovou navigací. Díky tomu bude auto o nadcházející zatáčce vědět dopředu a včas natočí světlomet daným směrem, ještě než řidič začne točit volantem.

Idea maticového LED světlometu však jde ještě dále. Všechny výše uvedené funkce není problém implementovat, přesto však lze využít potenciálu maticových LED světel ještě více. Díky tomu, že lze ztlumit libovolnou část paprsku, tak vhodnou kombinací s kamerou s rozpoznáváním obrazu je možné zabránit například oslnění protijedoucího řidiče tím, že světlo svítící jeho směrem se utlumí. Viz Obr. 1.5. Díky tomu je možné použít jasnější světlo tam, kde se žádné auto nevyskytuje a nehrozí oslnění žádného řidiče a tím zlepšit celkovou viditelnost v noci.



Obr. 1.5 Porovnání standardních světlometů a maticových světlometů bránících oslnění řidičů [4]

Maticový LED světlomet lze také využít k upozorňování řidiče v noci před chodci na silnici nebo náhodně probíhající zvěří. Světlomet společnosti Audi, zmíněný

v kapitole 1.3.2, má implementovanou funkci, pokud je na silnici rozpoznán kamerou chodec, dojde k blikání paprsku směrem na chodce, a tím je řidič upozorněn. Je samozřejmě nutné svítit chodci spíše na jeho dolní polovinu těla, nikoliv na hlavu, aby nedošlo k jeho oslnění.

### **1.3 Konstrukce maticového LED světlometu**

Většina současných vylepšených světlometů s těmito možnostmi využívá v různé míře také mechanické součásti, jako například natáčení různých dílů pomocí krokových motorů a podobně. Tento systém má své nevýhody, jako například náchylnost na mechanické poškození, pomalejší reakce a také vyšší cenu. Obecným trendem je odstranění mechanických součástí, což by vedlo k vyšší spolehlivosti a při výrobě ve srovnatelném objemu také nižší ceně.

#### **1.3.1 Počet LED diod**

Ideálem z hlediska minima mechanických součástí by byl plně statický maticový LED světlomet. Zásadní otázka u tohoto typu světlometu směřuje k počtu použitých LED diod. Počet LED diod definuje „rozlišení“ světlometu, tedy jak moc jemně dokáže upravovat vyzařované světlo. Počet LED diod není nikterak daný a výrobci zatím ještě ani nemůžou moc vycházet ze zkušeností, protože se jedná relativně o novinku na trhu.

Nízký počet LED diod by vedl k tomu, že by vyzařované světlo bylo možno regulovat ve velmi hrubých krocích, což by například už při dvou protijedoucích autech mohlo znamenat zhasnutí všech LED diod dálkových světel a svícení pouze tlumenými světly, takže efekt maticového LED světlometu by se minul účinkem.

Teoreticky to svádí k tvrzení, že čím víc LED diod v maticovém LED světlometu, tak tím lépe. Ovšem z pohledu výrobce automobilů tomu tak není. Z ekonomické stránky, kdy je třeba každou LED diodu zvlášť řídit, je velké množství LED diod komplikací jak ve vývoji, tak v ceně finálního produktu.

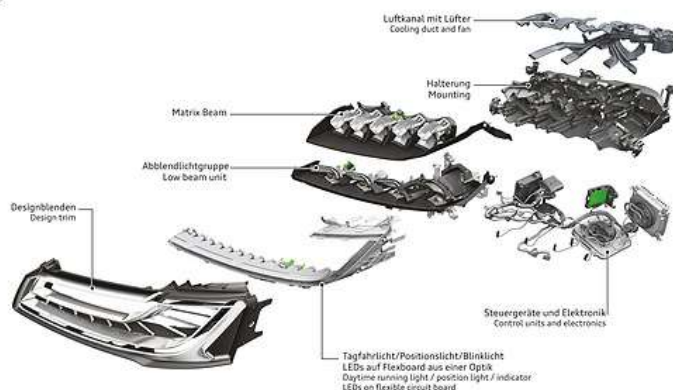
Je tedy třeba najít nějaký kompromis. Aktuálně se výrobci maticových LED světlometů pohybují zhruba v rozmezí 20 – 35 LED diod. Dva světlometry, které budou nadále konkrétněji zmíněny v kapitolách 1.3.2 a 1.3.4 využívají shodně 25 LED diod na jeden světlomet pro část dálkových světel. Efekt maticového LED světlometu je u nich již pěkně vidět. Na druhou stranu moduly společnosti Osram určené pro maticové LED světlometry uvedené v kapitole 1.3.3 počítají s počtem až 100 LED diod na jeden modul. Je evidentní, že otázka počtu LED diod ještě zodpovězena není a sami výrobci si nejsou příliš jistí.

#### **1.3.2 Audi Matrix Headlight**

Ideu zcela statického světlometu přenesl do praxe již zmíněný výrobce automobilů Audi ve spolupráci s výrobcem světlometů Hella ve světle nazvaném Audi Matrix Headlight. Jedná se o první světlomet v komerčním využití, který v sobě implementuje řízené maticové pole LED diod pro dálková světla. Audi tato světla již nyní používá ve svých prémiových modelech Audi A6, A7 a A8 jako příplatkovou výbavu. Rozbor tohoto světla je vidět na Obr. 1.6.

### Audi Matrix LED-Scheinwerfer

Audi Matrix LED headlight  
10/13



Obr. 1.6 Rozklad maticového LED světlometu Audi Matrix Headlight [5]

Při pohledu zleva vidíme nejprve kryt světlometu. Dále proužek LED diod pro denní svícení a blinkr současně. Implementace blinkru není úplně běžná, jak ji dnes známe, ale jedná se o tzv. wiping blinkr, tedy že se celý proužek nerozsvítí najednou, ale rozsvícení probíhá po jednotlivých LED diodách směrem od středu vozu do kraje. Další část tvoří skupina LED diod pro tlumená světla.

Hlavní část světlometu je zde nazvaná Matrix Beam. Jedná se o maticově řízená dálková světla. Jejich konstrukce je velmi zajímavá, proto stojí za to si ji přiblížit na Obr. 1.7. Konstrukce modulu se skládá z pěti segmentů, z nichž každý segment se skládá z chladiče, pěti LED diod a reflektoru. Pět samostatně říditelných LED diod v každém segmentu směřuje na reflektor, od něhož se odráží do prostoru. Celkem tento modul obsahuje tedy 25 říditelných LED diod.

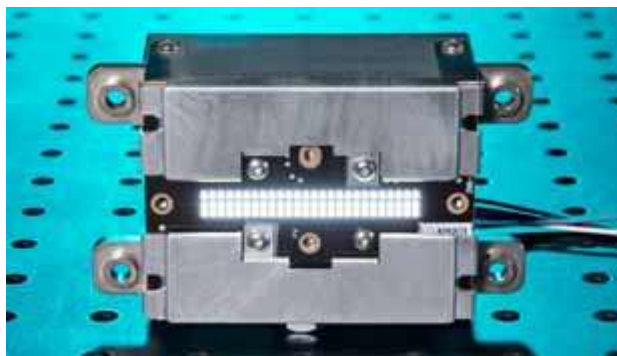


Obr. 1.7 Hlavní část světlometu Audi Matrix Headlight – Matrix Beam [4]

Světlomet dále obsahuje ještě řídicí jednotku a elektroniku, starající se o řízení LED diod a upevňovací část, na které jsou všechny části namontované. Vzhledem k zahřívání výkonných LED diod je do světla nainstalován i ventilátor.

### 1.3.3 Osram Matrix Modules

Vlastní řešení maticového LED světloometu přináší také německá společnost Osram. Jejimi produkty nejsou přímo hotové světlometry, ale moduly, které je možné ve světlometu použít. Jeden modul je možné vidět na následujícím obrázku Obr. 1.8.

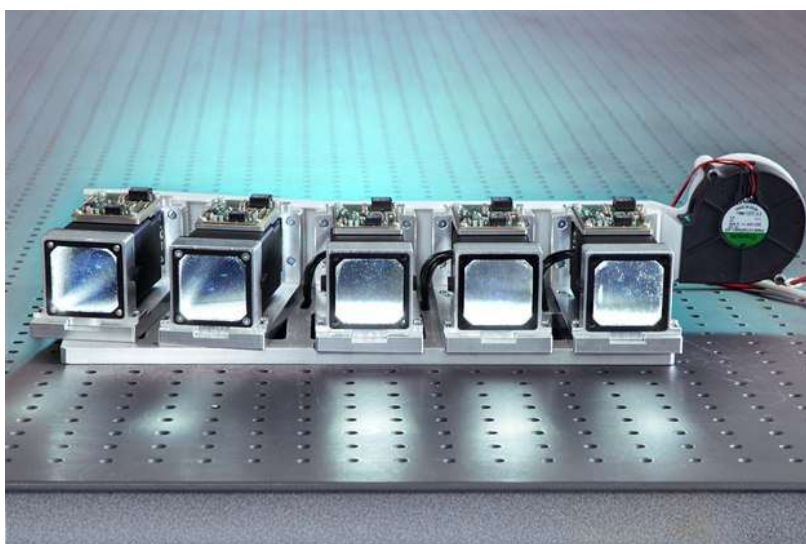


Obr. 1.8 LED modul pro maticové LED světlometry společnosti Osram [6]

Tyto moduly [6] byly představeny na konferenci ISAL 2013 (Mezinárodní symposium automobilového osvětlení) v Darmstadtu. Modul obsahuje až 100 LED diod, z nichž každá vydává světelný tok 130 lm. Pro srovnání běžná halogenová žárovka H7 55W vydá asi 1500 lm [7].

Každou LED diodu je možné samostatně stmívat na 256 úrovní. Ke komunikaci s tímto modulem je možné využít CAN nebo LIN rozhraní.

Na dalším obrázku Obr. 1.9 je možno vidět použití více modulů dohromady spolu s optikou. Jak je vidět na obrázku, i zde, stejně jako ve světlometu Audi, bylo nutné použít ventilátor ke chlazení.



Obr. 1.9 Příklad možné aplikace Osram LED modulů s optikou [8]

### 1.3.4 Mercedes-Benz Multibeam Headlamp

Za pozornost jistě stojí také světlomet vyvinutý automobilkou Mercedes-Benz, nazvaný Mercedes-Benz Multibeam Headlamp. Tento světlomet je aktuálně nejpokročilejším světlometem zmíněné automobilky. Je možné jej vidět na Obr. 1.10. Řešení společnosti Mercedes-Benz již není zcela statické, jako tomu bylo u světlometu Audi Matrix Headlight, ale stále pro svůj pohyb využívá mimo jiné krokové motorky. Přesto jeho hlavní část tvoří maticový LED světlomet.



Obr. 1.10 Popis světlometu Mercedes-Benz Multibeam Headlamp [9]

Světlomet se opět skládá ze LED pásku pro denní svícení v kombinaci s blinkrem, dále dvou hlavních modulů, tří doplňkových světel a jednoho světla do strany. Tyto moduly se vzájemně doplňují. Tři doplňková světla se například starají o osvětlení těsné blízkosti vozu. Hlavní modul uprostřed v sobě skrývá maticový LED světlomet, jehož rozbor se nachází na obrázku Obr. 1.11. Druhý hlavní modul na okraji má na starost různé funkce v závislosti na jízdním režimu.

Z obrázku Obr. 1.11 lze vidět, že zde k problému rozptýření světla LED diod přistoupili z jiné strany, než konstruktéři Audi. Zde jsou paprsky LED diod rozptýleny pomocí jisté optické soustavy, nikoliv pomocí reflektoru.



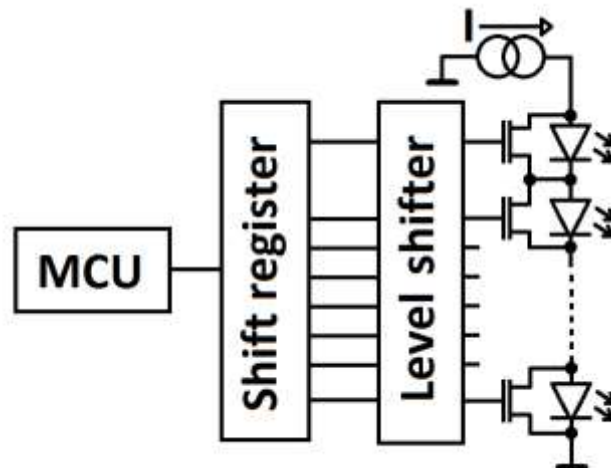
Obr. 1.11 Maticový LED modul světlometu Mercedes-Benz Multibeam Headlamp [10]

## 1.4 Diskrétní řešení budiče LED světloometu

Prozatím měl čtenář možnost se dozvědět, jak takový maticový LED světlomet vypadá, jak funguje, k čemu je možné jej použít, ale zatím bez vysvětlení řízení jednotlivých LED diod.

Na obrázku Obr. 1.12 je uveden případ při použití sériového spojení LED diod, který je pro praktické použití vhodnější [1]. Výchozí data vychází z řídicí jednotky sériově. V posuvném registru je tento sériový tok dat transformován na paralelní. Za posuvným registrem se nachází obvod Level shifter, který zvyšuje úroveň vstupních signálů. To je potřeba kvůli spínání MOS tranzistorů, které jsou použity jako spínače paralelně k LED diodám. Napětí na hradle gate musí být při sepnutí vyšší, než na drainu.

Toto diskrétní řešení má však určité nevýhody a také nedostatky. Mezi nevýhody patří určitě nutnost použití více součástek, zvláště velkého množství tranzistorů. Dále také žádná zpětná vazba při vzniklých problémech. Například se řídicí jednotka nedozví, pokud se náhodou přeruší přívod proudu, nebo pokud například dojde ke zkratu na nějaké LED diodě. Dále také je nutný vysoký kmitočet na sériové lince z řídicí jednotky, aby bylo možné zajistit nějakou rozumně vysokou PWM frekvenci na hradlech tranzistorů.



Obr. 1.12 Blokové schéma diskrétního řešení budiče maticového LED světloometu

Použití vysokých frekvencí vede na druhou stranu k tomu, že toto zařízení trpí různými neduhy, jako poblikávání LED diod či různé artefakty ve vyzařovaném paprsku. Proto není vhodné jej přímo použít v reálné aplikaci. Přesto idea tohoto zapojení je dobrá, a proto na jejím základě byl společností ON Semiconductor vytvořen integrovaný obvod s velmi podobnou funkcí, dále popsán v následující kapitole.

## 1.5 Integrovaný budič LED světlometu

Společnost ON Semiconductor pro svoje zákazníky vyvinula integrovaný obvod pro zajištění funkce LED světlometu [11], tedy Integrovaný budič sériového LED řetězce pro automobilový přední světlomet. Jedná se o samostatný integrovaný obvod, který obsahuje dvanáct řízených spínačů, dovolující řídit až dvanáct LED diod v sérii s proudem až 0,6 A. Je možné také například použít konfiguraci pro řízení šesti LED diod v sérii s proudem až 1,2 A nebo tří LED diod s proudem až 2,4 A.

Vzhledem k tomu, že se jedná o integrovaný obvod, který je stále ještě ve stadiu vývoje, přestože jsou již první vzorky dostupné, uvedené parametry nemusí být konečné a mohou se ještě během vývoje změnit. Navíc vzhledem k utajení před konkurencí společnosti ON Semiconductor nemohly být zveřejněny některé detaily integrovaného obvodu, proto je popis v kapitole 1.5 více obecný, bez větších detailů a podrobného popisu.

Integrovaný obvod funkčně vychází z předlohy diskrétního řešení, popsáno v kapitole 1.4. Díky integraci všech součástek na jeden integrovaný obvod došlo ke značnému vylepšení parametrů, na rozdíl od předlohy, která využívala univerzální dostupné prvky. Některé parametry obvodu byly změněny v kapitole 4.

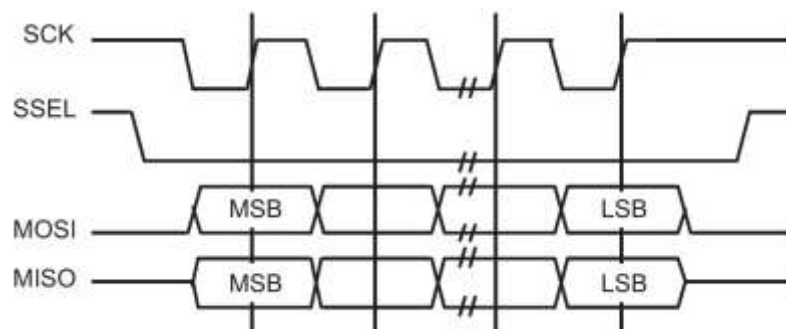
První testy integrovaného obvodu a pozorování funkčnosti ukazují, že obvod netrpí různými neduhy, které mělo diskrétní řešení budiče LED světlometu, a pracuje podle předpokladů.

### 1.5.1 SPI komunikace

Komunikace s integrovaným budičem LED světlometu probíhá po rozhraní SPI, po níž se posílají veškerá data a nastavení, a po níž integrovaný obvod zasílá informace o chybách. SPI rozhraní integrovaného budiče LED světlometu má následující parametry:

- Maximální kmitočet hodinového signálu 4 MHz
- Aktivní náběžná hrana hodinového signálu
- Velikost SPI rámce 32 bitů
- Pořadí bitů – nejprve MSB

Obecný průběh SPI rámce je znázorněn na obrázku Obr. 1.13. Podrobnější časové údaje lze vyčíst z datasheetu [11].



Obr. 1.13 Obecný průběh SPI rámce [14]



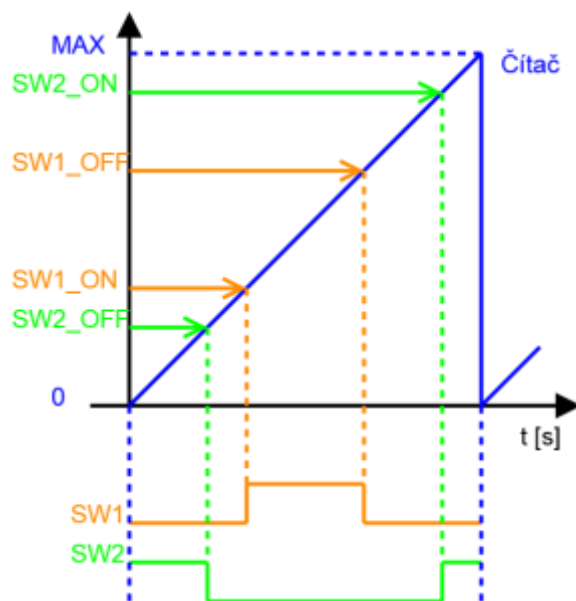
Pomocí SPI lze přistupovat ke všem registrům, z nichž do některých lze zapisovat i číst, z jiných lze pouze číst. Konkrétní registry jsou popsány v datasheetu [11]. V rámci jednoho SPI přenosu je možné zároveň zapsat informace do jednoho registru a zároveň také vyčíst hodnoty ze stejného nebo i jiného registru. Zároveň integrovaný obvod vždy odesílá informaci o svém stavu. Více informací o stavech v kapitole 1.5.4.

## 1.5.2 Řízení spínačů pomocí PWM

Jak již bylo zmíněno dříve, LED diody je možné řídit pomocí pulsně šířkové modulace (PWM). Kmitočet pro generování PWM (dimming frekvence) může pocházet buď z interního oscilátoru, který je dále dělen, nebo z externího zdroje. V případě použití interního oscilátoru je možné nastavit dimming frekvenci na hodnoty 125 kHz - 1 MHz. Dimming frekvence řídí 10 bitový čítač, který postupně počítá od 0 do 1023.

Pro řízení jednotlivých spínačů je třeba předem definovat pro každý spínač tři hodnoty – ON čas, OFF čas a prodloužení (TR).

ON čas znamená hodnota čítače v rozmezí 0 – 1023, kdy dojde k sepnutí spínače. OFF čas znamená hodnota čítače v rozmezí 0 – 1023, kdy dojde k rozepnutí spínače. Tyto události znázorňuje pro dva spínače Obr. 1.14.



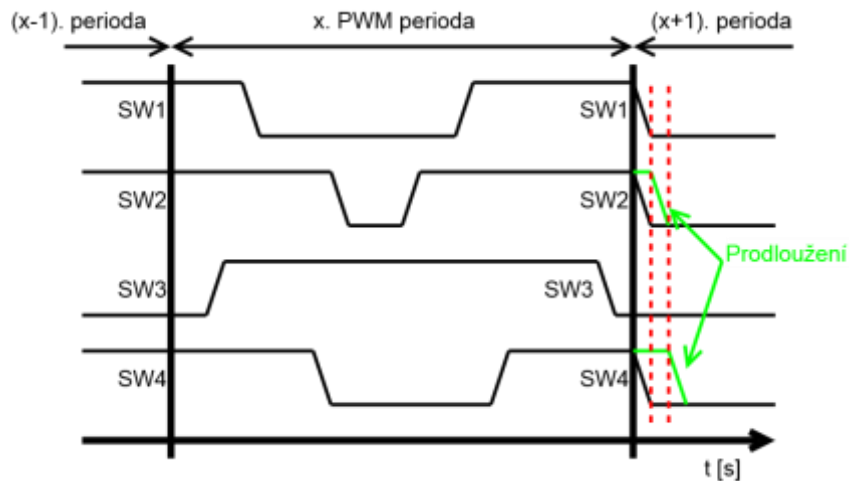
Obr. 1.14 Průběh jedné periody čítače pro dva spínače

Tímto je generován PWM signál, jímž jsou ovládány jednotlivé spínače. Zároveň je třeba pamatovat na to, že čím déle je spínač sepnutý, tím méně LED dioda svítí, a naopak.

V případě potřeby rozsvícení LED diody na plno je třeba nastavit ON a OFF čas na stejnou hodnotu, nejlépe ON = 0, OFF = 0. Pokud je třeba zhasnout LED diodu, je potřeba nastavit ON = 0, OFF = 1023.

Tento způsob generování PWM je vcelku jednoduchý a názorný. Přesto se zde však vyskytuje jeden problém, vycházející z topologie integrovaného obvodu, na který je třeba myslet a ošetřovat ho. Problém znamená sepnutí více spínačů ve stejný čas, například když chceme zhasnout více LED diod najednou. Tehdy se nastaví pro dané LED diody ON = 0 a OFF = 1023 a nastane překrytí ON časů, kde více než jedna LED dioda má stejný ON čas. Tento problém lze řešit využitím třetí definované hodnoty pro konkrétní spínač, a to transition vektor (TR vektor). Pokud je pro spínač nastaven transition vektor, dojde k prodloužení počátečního stavu a tím pádem k posunutí ON času, který se kryje s jiným ON časem. Tím se lze vyhnout stavu, kdy by došlo k sepnutí více spínačů najednou. Situaci, kdy je třeba použít prodloužení (transition vektor), znázorňuje Obr. 1.15.

Tyto problémy je třeba obejít použitím vhodného algoritmu (dimming algoritmus) pro úpravu ON, OFF a TR hodnot na odchozí straně, tedy buď v PC, nebo v mikrokontroléru, který bude s integrovaným obvodem komunikovat. Návrhy a realizaci dimming algoritmů se zabývá kapitola 5.1.



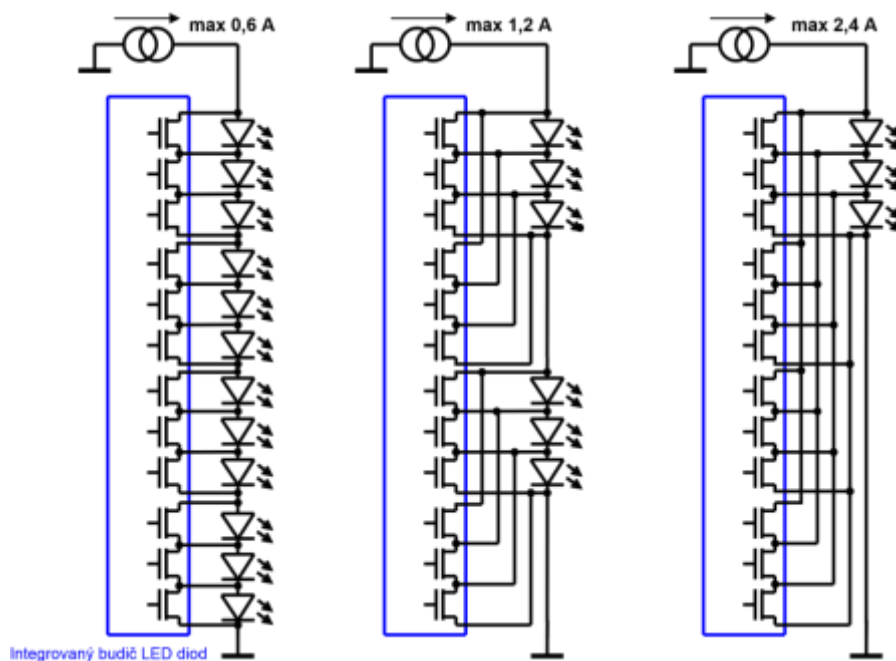
Obr. 1.15 Prodloužení signálu při změně ve stejný čas

Integrovaný budič LED světlometu umožňuje také přímé řízení spínačů pomocí jednoho SPI rámce, který každému spínači určí, zda bude sepnutý nebo vypnutý.

### 1.5.3 Konfigurace LED diod

Integrovaný budič LED světlometu byl navrhnout tak, aby byl univerzální a bylo možné u něj použít různé konfigurace LED řetězců. Spínače je možné paralelně spojovat a tím násobně zvyšovat jimi protékaný proud, který je 0,6 A na jeden spínač. Tedy dvěma paralelně spojenými spínači může téct proud až 1,2 A. Vybrané konfigurace LED diod jsou naznačeny na následujícím obrázku Obr. 1.16.

Při zapojení více spínačů paralelně na základě nastavené konfigurace jsou platné a použité pouze některé PWM signály tak, aby byly například dva paralelně spojené spínače řízeny pouze jedním PWM signálem.



Obr. 1.16 Příklady konfigurací LED diod s různými maximálními proudy

### 1.5.4 Diagnostika

Velkou výhodou integrovaného budiče LED světloometu je vlastní diagnostika. Integrovaný obvod je tedy schopen poskytnout zpětnou vazbu o tom, v jakém stavu se právě nachází, zda nenastala nějaká chyba, nebo třeba problémy na straně LED diod.

V kapitole 1.5.2 byla zmíněna nemožnost při použití stejných ON časů. V případě, že by přesto bylo do integrovaného obvodu zapsáno více stejných ON časů, diagnostika zaznamená chybu a sepne Fail výstup, který odvede proud z LED řetězce. Podobná situace nastane při použití stejných OFF časů. Při tomto stavu ovšem není sepnut Fail výstup a integrovaný obvod registruje pouze upozornění.

Chybu také obvod zaznamenává, pokud není připojen zdroj proudu k LED řetězci, nebo pokud je napájecí napětí příliš malé.

V případě, že dojde k přehřívání obvodu, obvod nejprve při zadané teplotě čipu reaguje upozorněním, a při dalším zvýšení teploty chybou, kdy je opět sepnut Fail výstup a proud z LED řetězce je odveden.

Integrovaný obvod dokáže také registrovat stavy na připojených LED diodách, a to například při zkratu LED diody, rozpojení LED diody nebo příliš vysokém proudu.

### 1.5.5 Tepelné ztráty v integrovaném obvodu

Při použití integrovaného budiče LED světloometu je třeba dbát na jeho dobré chlazení, protože integrovaný obvod obsahuje mimo jiné spínací unipolární tranzistory, které spínají proud LED diod, a tím v integrovaném obvodu vzniká větší množství tepla.

Maximální tepelné ztráty nelze z datasheetu [11] zjistit, a proto budou zde jednoduchou úvahou odhadnuty, aby bylo možné s touto hodnotou dále případně pracovat.

Z datasheetu [11] je možné zjistit maximální proudovou spotřebu obvodu  $I_C = 20 \text{ mA}$ . Při předpokladu napájení baterií v automobilu  $U_{BAT} = 12 \text{ V}$  je ztrátový výkon dán rovnicí 1.1.

$$P_{obv} = I_C U_{BAT} = 0,24 \text{ W} \quad (1.1)$$

Jak už bylo zmíněno, obvod dále obsahuje spínací unipolární tranzistory, v nichž vznikající energie pochází z proudu LED diodami. Z datasheetu byla vyčtena hodnota tranzistoru  $R_{DSON} = 0,9 \ \Omega$ . Maximální proud  $I_{max} = 0,6 \text{ A}$ . Výkonová ztráta na 12 tranzistorech je dána vztahem 1.2. Spínací ztráty byly pro zjednodušení zanedbány, protože spínací kmitočet není příliš velký, maximálně okolo  $1 \text{ kHz}$ , a ani v datasheetu další parametry spínacích tranzistorů uvedeny nejsou.

$$P_{tranz} = 12 R_{DSON} I_{max}^2 = 3,89 \text{ W} \quad (1.2)$$

Celkový ztrátový výkon, který je třeba uchladiť je pak dán rovnicí 1.3.

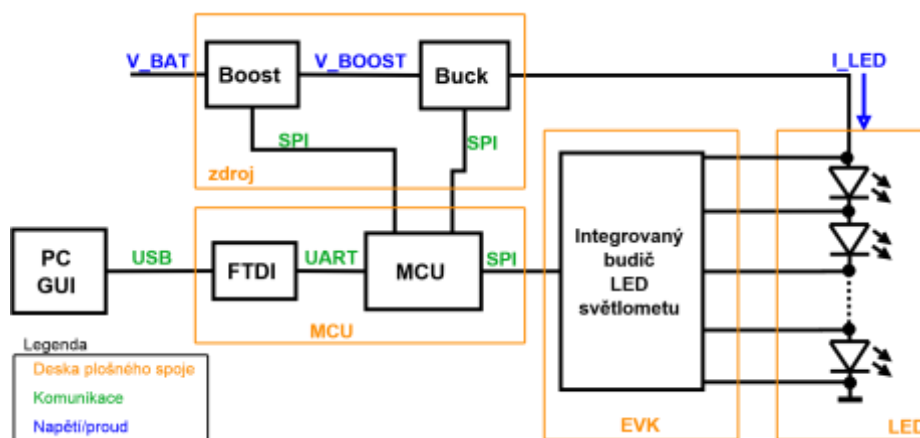
$$P_{celk} = P_{obv} + P_{tranz} = 4,13 \text{ W} \quad (1.3)$$

Aby bylo možné takový ztrátový výkon integrovaného obvodu uchladiť, je v integrovaném obvodu použita na spodní straně chladicí ploška (exposed pad [12]), která je připájená k desce plošného spoje a pomocí ní je teplo odváděno.

## 2 NÁVRH HARDWAROVÉ ČÁSTI

Cílem této práce je mimo jiné návrh a sestavení evaluačního kitu, sloužícího k prezentaci zákazníkům. Z předcházející diplomové práce [15] studenta Ing. Jiřího Christena je k dispozici plošný spoj se zdrojovou částí (zvyšující a snižující měnič NCV78703 a NCV78723) a mikrokontrolérem (NXP LPC4074FBD80). Bylo rozhodnuto o rozdělení desky na zdrojovou a mikrokontrolérovou desku z důvodu větší univerzality. Zdrojová deska byla navržena jinou skupinou společnosti ON Semiconductor a nebude v práci rozebrána.

Blokové schéma evaluačního kitu je znázorněno na Obr. 2.1. Skládá se z již zmíněného zdroje, mikrokontrolérové desky, dále pak z desky s integrovaným budičem a desky s LED diodami. V následujících kapitolách jsou jednotlivé desky popsány podrobněji.



Obr. 2.1 Blokové schéma evaluačního kitu

### 2.1 Návrh plošného spoje evaluační desky

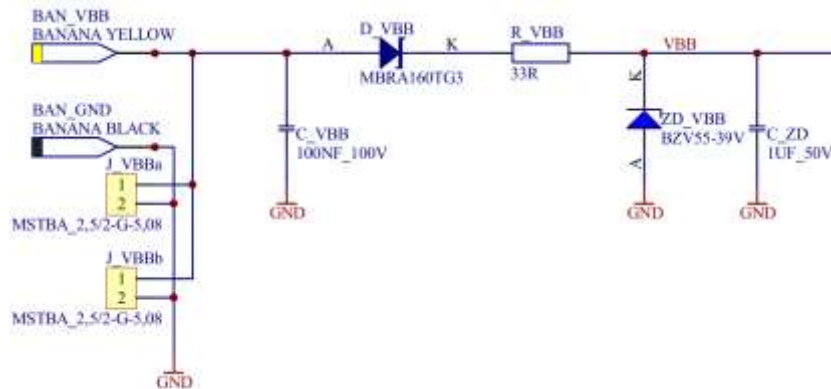
Za účelem praktického vyzkoušení integrovaného budiče LED světlometu a následné prezentace pro zákazníky byla navržena a vyrobena evaluační deska (značeno L247\_EVK) s dvěma integrovanými obvody.

Požadavky na tuto desku byly z velké části dané:

- Rozměry 130 x 90mm s montážními otvory
- Použití dvou obvodů budiče LED světlometu
- 24 pinový konektor na okraji delší strany s definovaným zapojením
- Logika, vybírající ze čtyř signálů Slave Select a jednoho Master/Slave pro řízení SPI komunikace
- Konektor pro zapojení Arduina Micro [13]
- Nezávislost na zvolené konfiguraci LED řetězce

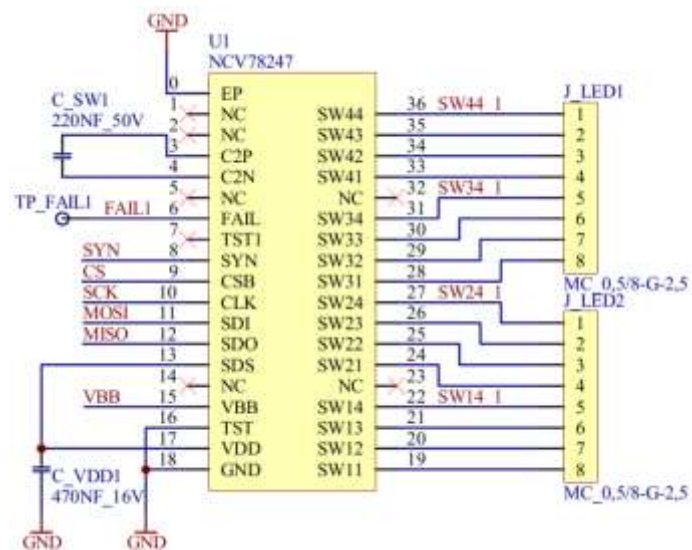
Evaluační deska byla navržena v programu Protel 99 jako dvouvrstvá a pro zjednodušení s osazením součástek pouze z horní strany.

V napájecí větvi byla zavedena ochrana proti přepólování D\_VBB a také stabilizátor R\_VBB a ZD\_VBB jako ochrana proti přepětí, což je vidět na Obr. 2.2.



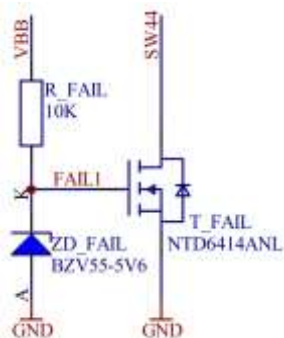
Obr. 2.2 Ochrana proti přepólování a přepětí

Zapojení integrovaného budiče LED světloometu je jednoduché a vyžaduje pouze minimum okolních součástek. Velmi důležitý je externí kondenzátor nábojové pumpy C\_SW. Vše je vidět na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Zapojení integrovaného budiče LED světloometu

Zapojení obvodu je vhodné doplnit o Fail výstup, který v případě chybového stavu odvede proud z řetězce do země. Zde jsou pro dosažení univerzality a nezávislosti na vybrané konfiguraci osazeny 4 FAIL tranzistory, pro každou skupinu spínačů zvlášť



Obr. 2.4 Zapojení obvodu pro FAIL výstup

Vzhledem k tomu, že integrovaný obvod má v sobě integrované spínače, kterými může procházet relativně velký proud, tak v integrovaném obvodu může vznikat velké množství přebytečného tepla, které je třeba z čipu odvést. Proto se na obdobných typech integrovaných obvodů používá tzv. Exposed Pad. Ten se nachází na spodní straně integrovaného obvodu a je velmi vhodné ho připájet k desce plošného spoje, čímž selepší chlazení.

Na této navržené EVK desce bylo také z hlediska lepšího chlazení přistoupeno k odkrytí nepájivé masky v okolí integrovaných obvodů, aby se zlepšil přestup tepla z desky do okolí. Výslednou podobu desky evaluačního kitu je možno vidět na Obr. 2.5.



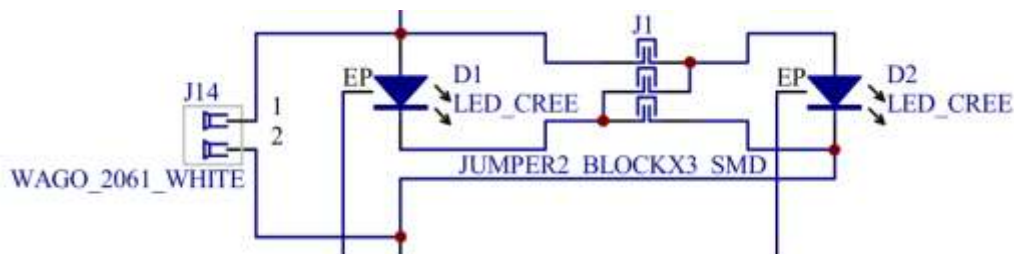
Obr. 2.5 Fotografie hotové desky evaluačního kitu

Kompletní schéma a podklady k výrobě evaluační desky se nachází v příloze A.

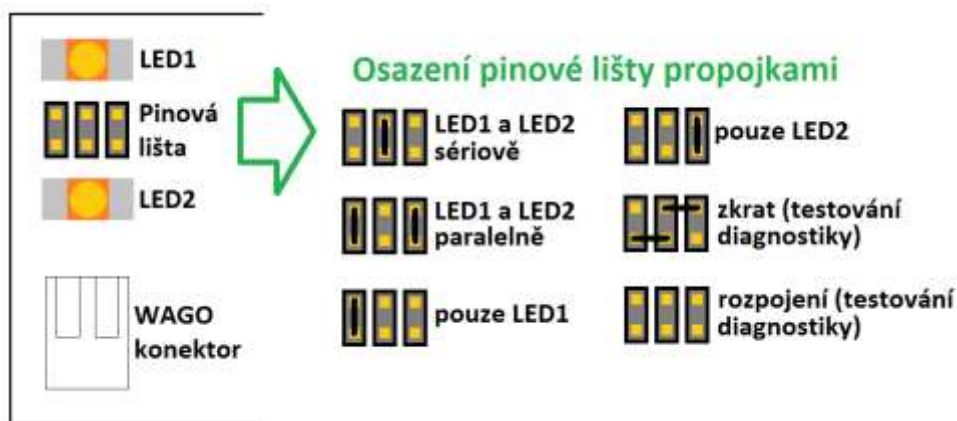
## 2.2 Návrh desky plošného spoje s LED diodami

Pro potřeby prezentace evaluační desky s integrovaným budičem LED světlometu byla navržena deska plošného spoje s LED diodami (značeno L247\_LED). Deska obsahuje celkem 24 LED diod, kde vždy 2 LED diody je možné zapojit paralelně, sériově, nebo využít jen jednu z nich. K tomu byla použita pinová lišta 2 x 3 pinů, kde jednotlivé

konfigurace lze volit použitím zkratovacích propojek (jumperů). Ukázka schématu dvou LED diod, které náležejí jednomu spínači v integrovaném budiči, je na následujícím obrázku Obr. 2.6. Grafické znázornění kombinací propojek je vyobrazeno na Obr. 2.7. Kromě čtyř kombinací pro zapojení LED diod je možné LED desku využít taky k otestování diagnostiky integrovaného obvodu, a to konkrétně při zkratu na LED diodě (Short) a rozpojení LED diody (Open).



Obr. 2.6 Část schématu LED desky náležející jednomu spínači v integrovaném budiči LED světloometu



Obr. 2.7 Nastavení LED desky pomocí propojek na pinových lištách

LED diody byly použity od společnosti CREE s pouzdrem 3,3 x 3,3 mm. Exposed pady všech LED diod jsou spojeny. LED diodami může procházet proud až 1,5 A a proto bylo nutné zajistit dostatečné chlazení. V exposed padu LED diod i okolí LED diod je umístěno velké množství prokůvů, které se starají o přenos tepla na druhou stranu desky, která neobsahuje nepájivou masku. Díky osazení součástek jen z jedné strany a použití součástek pro povrchovou montáž se na spodní straně desky nenachází žádné vývody ani součástky a proto může být tato deska přimontována přímo na chladič. To je nezbytně nutné v případě použití vyšších proudů, kdy se již deska neúměrně zahřívá. K desce je doporučen chladič [19], na který jsou navrženy montážní otvory. Konektory byly vybrány od firmy Wago [20] kvůli povrchové montáži, jednoduchému připojování kabelu a nízkému profilu. Fotografie hotové LED desky se nachází na Obr. 2.8. Podklady pro výrobu této desky se nachází v příloze B.





Obr. 2.8 Fotografie hotové LED desky

## 2.3 Návrh mikrokontrolérové desky plošného spoje

Mikrokontrolérová deska vznikla oddělením části obsahující mikrokontrolér z původní desky se zdroji, která vznikla při předchozí diplomové práci [15], z důvodu větší univerzality. Mikrokontrolérová deska převzala z velké části stejné zapojení z desky předchozího studenta, přesto došlo k několika změnám, hlavně v osazení konektorů. Jako hlavní je zde použit tzv. Arduino konektor, což bylo požadováno. Ten se zapojuje do evaluační desky a tuto desku řídí. Druhý důležitý konektor ve formě dvouřadé pinové lišty je vyveden z boku. Ten je možné využít pro řízení zdrojové části, tedy k řízení zvyšujícího a snižujícího měniče. Třetí konektor (J4) slouží k programování mikrokontroléru přes SWD (Serial Wire Debug). Z původní desky byly odstraněny nepoužívané součástky a vyměněn izolátor U3 za verzi bez spínaného zdroje a tedy levnější [21]. Dále bylo přidáno několik výstupů mikrokontroléru, aby bylo vyhověno požadavkům pro řízení. Návrh plošného spoje bylo tedy třeba udělat celý znova.

Samotná deska pracuje pouze spolu s evaluační deskou, protože přes Arduino konektor je přiváděno napájení 12 V, které se na mikrokontrolérové desce snižuje stabilizátorem na obvyklých 3,3 V.

Samotnou desku se podařilo zmenšit na rozměry 55 x 47 mm, takže ji lze rozumně umístit na evaluační desku. Bylo ovšem nutné použít čtyřvrstvou desku kvůli velkému množství spojů. Výslednou fotografii mikrokontrolérové desky lze najít na Obr. 2.9. Podklady k výrobě se nachází v příloze C.



Obr. 2.9 Fotografie hotové mikrokontrolérové desky

### 3 ŘEŠENÍ SOFTWAREVÉ ČÁSTI

Kromě návrhu hardwarové části bylo třeba také vyřešit část softwarovou, a to ovládací program pro počítač a firmware mikrokontroléru. Vzhledem k tomu, že tato práce navazuje na diplomovou práci Ing. Jiřího Christena a jeho výrobek využívá, bylo rozhodnuto nevytvářet softwarové vybavení zcela od začátku, ale pokračovat v již hotových programech, jak pro počítač, tak ve firmwaru.

Mezi počítačem a mikrokontrolérem je třeba zajistit komunikaci. Pro komunikaci je využita sériová linka. Vzhledem k tomu, že dnes jsou počítače se sériovou linkou skoro raritou, obzvláště notebooky, byl na mikrokontrolérovou desku přidán známý čip společnosti FTDI, konkrétně FT232RL, který po připojení do USB rozhraní počítače v něm vytvoří virtuální sériový port. Programy v počítači pak k tomuto portu přistupují jako k běžnému sériovému portu. Teoreticky by bylo možné místo převodníku FT232RL použít mikrokontrolér, USB připojit přímo na něj, a jeho USB periférii nastavit tak, aby se mikrokontrolér tvářil jako USB Device. Tímto by bylo možné komunikovat i bez převodníku, ale nastavení USB periférie a její zprovoznění není zrovna jednoduché. Navíc je nutné pro USB Device definovat identifikátory Vendor ID (VID) a Product ID (PID), které musí být jedinečné, jinak by mohlo dojít ke kolizi s jiným zařízením. Navíc se v novějších verzích operačního systému Windows vyskytuje problém s ovladači. V případě prototypu to nebývá problém, ale vzhledem k faktu, že se zařízení bude rozesílat zákazníkům, bylo od tohoto řešení upuštěno a je použit zmíněný spolehlivý obvod FTDI.

Dále bylo třeba komunikaci podrobněji definovat, aby PC i mikrokontrolér komunikaci rozuměli. Mezi to patří nejprve nastavení sériové linky. Rychlost linky je 19200 Bd/s, dále 8 bitů dat, přenos bez zabezpečení paritou a přenos končí jedním stop bitem.

Komunikace tedy probíhá po rámcích o velikosti 8 bitů. Při přenosu však bude třeba přenášet delší zprávy, proto byl zadefinován protokol komunikace, podle kterého se musí obě strany řídit. Protokol byl převzat z předchozí diplomové práce [15] a doplněn o zprávy potřebné pro komunikaci s integrovaným budičem LED světlometu. Celý protokol je uveden v příloze D.

Komunikace vždy začíná bytem, který definuje prováděnou operaci. Například byte 0x01 popisuje SPI přenos. Další byte definuje obvod, se kterým se bude komunikovat a případně operaci čtení nebo zápisu. Například druhý byte 0x03 znamená komunikaci s integrovaným budičem LED světlometu. Třetí byte definuje adresu registru pro čtení a zápis v integrovaném obvodu, poslední tři byty obsahují data k zápisu do integrovaného obvodu.

Nově obsahuje protokol příkaz prvním bytem 0x08, který definuje přenos nastavených jasů (střída PWM) všech LED diod pro jeden integrovaný obvod najednou. Druhý byte obsahuje cílový obvod budiče LED světlometu. Třetí až sedmáctý byte obsahují postupně všechny nastavené střídy o velikosti 10 bitů pro 12 LED diod, tedy dohromady 120 bitů, což je 15 bytů.

Ostatní příkazy, komunikující hlavně se zdrojovou částí, jsou podrobně popsány v předchozí diplomové práci [15].

### 3.1 Firmware mikrokontroléru

Původní verze firmwaru z předchozí diplomové práce Ing. Jiřího Christena byla tvořena jednou nekonečnou smyčkou. Vybraný mikrokontrolér zůstal zachován, ale pro dosažení větší flexibility byl implementován operační systém reálného času RTX. Původní část firmwaru obsahující funkční podporu zdrojové části se zvyšujícím a snižujícím měničem tedy musela být upravena a navíc byl firmware rozšířen o podporu inteligentních budičů LED světlometů, komunikujících přes SPI. Informace o firmwaru lze najít také v odkazu [26].

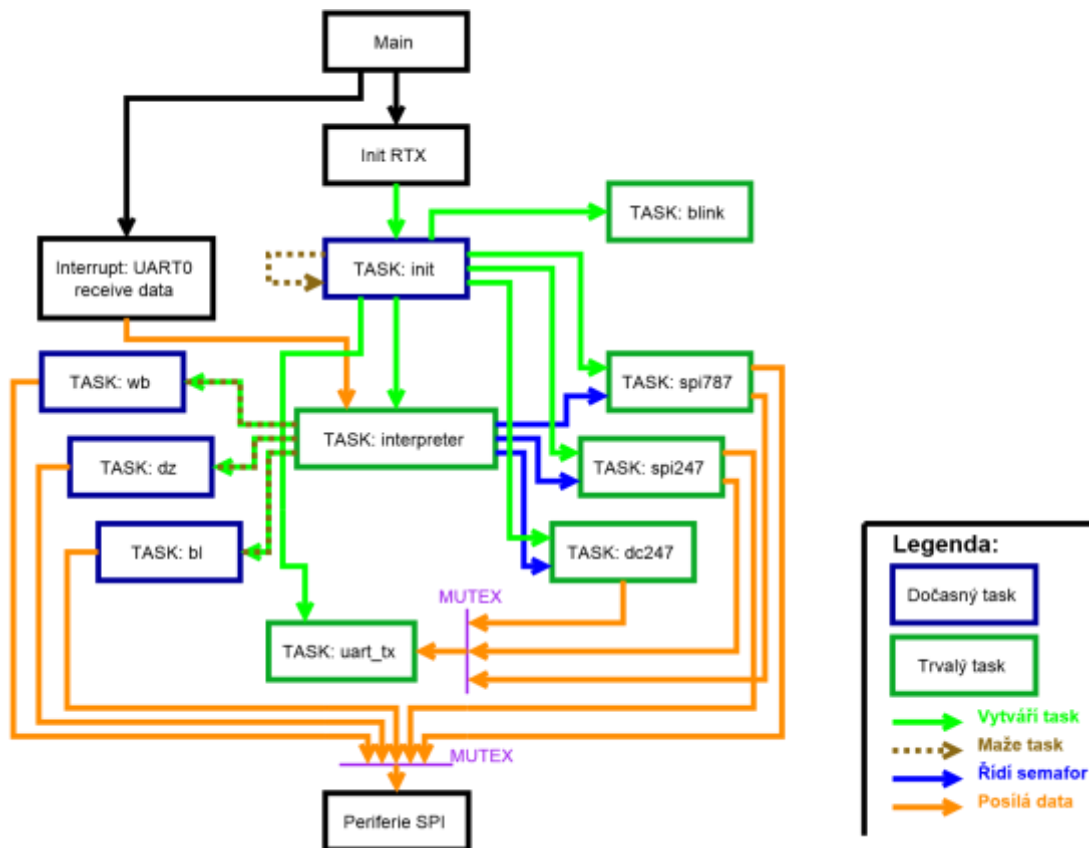
Firmware pro mikrokontrolér LPC4074 společnosti NXP je napsán v jazyce C ve vývojovém prostředí Keil  $\mu$ Vision 5, které obsahuje i podporu pro RTX RTOS. Pro programování byl využit programátor LPC-Link2 taktéž od NXP. Výrobce na svých webových stránkách nabízí dostatečnou podporu v podobě různých ovladačů k různým vývojovým prostředím, včetně použitého prostředí Keil  $\mu$ Vision 5. Taktovací kmitočet mikrokontroléru byl zvolen na maximum 120 MHz, protože jsou od něj odvozeny kmitočty pro řízení zdrojů, které mohou dosáhnout až 1 MHz. Základem programu je operační systém reálného času RTX, který je pro zjednodušení provozován v konfiguraci Round – Robin, což znamená, že všechny tasky mají stejnou prioritu a k přepínání tasků dochází cyklicky. Perioda přepínání je nastavena na 1 ms.

Dále bylo třeba nastavit použité periferie. Ve firmwaru jsou použity periferie UART, SSP, PWM a GPIO. Vzhledem k tomu, že vše již bylo připraveno předchozím studentem, byla provedena inicializace periferie SSP2, přes kterou probíhá komunikace s integrovaným budičem LED světlometu. Nastavení SSP2 se liší od SSP1, protože integrovaný budič používá jinou konfiguraci SPI rámce než NCV78703 a NCV78723. Vzhledem k popisu v kapitole 1.5.1 bylo použito nastavení rámce délky 16b, protože mikrokontrolér nepodporuje délku 32 bitů. Budou tedy vždy použity dva přenosy za sebou. Rychlost SPI byla nastavena na 1 MHz a časování CPOL = 1, CPHA = 1. Také nastavení přerušování po dokončení přijetí SPI rámce.

Všechny periferie jsou již tedy nastavené a je možné přistoupit k samotnému vykonávanému kódu. Celková funkce programu v systému RTX RTOS je znázorněna na Obr. 3.1. Po startu programu ve funkci main dojde k inicializaci systému RTX, nastavení periferií a povolení přerušování od periferie UART0 při příjmu dat. Následně je spuštěn dočasný inicializační task, ve kterém jsou spuštěny všechny trvalé tasky, inicializovány semaforey a mutexy. Po provedení těchto operací se inicializační task sám smaže. Při obvyklém běhu programu je spuštěno 6 tasků, z nichž dva běží neustále – task blink a interpreter, ostatní trvalé tasky čekají na semafor. Task blink pouze bliká jednou LED diodou na desce s periodou 1 s pro signalizaci běhu programu. Task interpreter přebírá přijatá data po lince UART z počítače a dále je třídí na základě požadované operace, případně danou operaci sám provede. Například pokud je požadována operace komunikace po SPI s obvodem zdroje, task interpreter pošle data do příslušného bufferu a zašle semafor tasku spi787, který tím odblokuje, a task spi787 vykoná příkaz, který mu byl předán příslušným bufferem. Po vykonání příkazu task spi787 odešle výsledná data do počítače přes UART linku tím, že přepošle data tasku uart\_tx, který se postará o jejich korektní odeslání. Dále firmware obsahuje tři dočasné tasky, které se vytváří a mažou dynamicky v případě, že je daný efekt potřeba. Konkrétně jsou implementovány funkce Wiping Blinker, Dark Zone a Bending Light, popsané v kapitole 5.3. Například pokud přijde z počítače povel pro efekt Dark Zone,

task interpreter vytvoří nový task dz, který se už sám stará o odesílání příslušných dat do SPI periferie. Task s efektem se maže opět příkazem z počítače. V jednu chvíli je možné mít spuštěných i více kopií stejného tasku, které obsluhují různé obvody integrovaného budiče.

Součástí firmwaru je také algoritmus, který se stará o přepočítání požadovaných jasů LED diod na hodnoty časů ON a OFF a hodnoty TR, se kterými pracuje integrovaný budič. Tento algoritmus je nazýván dimming algoritmus a podrobně se jím zabývá kapitola 5.1.



Obr. 3.1 Funkce firmwaru mikrokontroléru

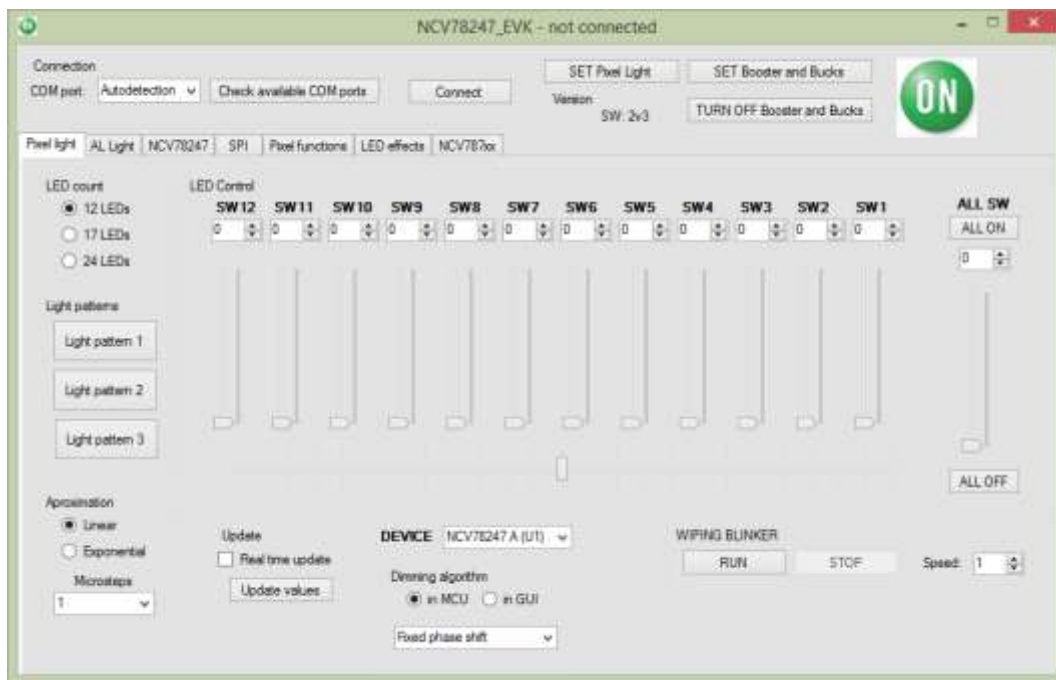
## 3.2 Software pro počítač

Software pro počítač k evaluačnímu kitu byl vyvinut ve vývojovém prostředí společnosti Microsoft Visual Studio Professional 2013. Software je napsán v jazyce C# na platformě .NET Framework. Uživatelské rozhraní aplikace využívá pro svou funkci obvyklé řešení pomocí tzv. formuláře (Windows Form). Aplikace je přeložena s .NET Frameworkem 4.0, který je podporován od Windows XP po Windows 8. V některých starších verzích Windows je třeba jej doinstalovat.

Výchozí podoba programu po spuštění je zobrazena na obrázku Obr. 3.2. V případě, že je připojena mikrokontrolérová deska a správně napájena, je možné stisknout tlačítko Connect. Tím dojde k připojení k mikrokontroléru a navázání

komunikace. V případě, že připojení neproběhne správně, je třeba zkontrolovat, že je ovladač virtuálního sériového portu správně nainstalován a že je správně připojena mikrokontrolerová deska.

Pro rychlé nastavení všech připojených obvodů do funkční konfigurace je možné využít předpřipravených tlačítek SET Booster and Bucks a SET Pixel Light. V případě jejich stisknutí dojde k aktivaci zdrojové části, která začne dodávat proud, a integrovaný budič LED světlotetu nastaví plný jas u všech připojených LED diod. Připojené LED diody se tedy rozsvítí.



Obr. 3.2 Výchozí podoba programu po spuštění

Program se skládá z pěti záložek. Záložky „LED effects“ a „NCV787xx“ byly přímo převzaty z programu z předchozí diplomové práce [15] a proto zde nebudou popisovány. Záložka „SPI“ byla z části upravena, byla doplněna o komunikaci s integrovaným budičem LED světlotetu. Zbývající tři záložky „Pixel light“, „NCV78247“ a „Pixel functions“ jsou zcela nové.

### 3.2.1 Záložka Pixel light

Obrázek Obr. 3.2 zobrazuje záložku „Pixel light“. Ta slouží k nastavování jasu jednotlivých LED diod a testování dalších efektů, které s LED diodami souvisí. Vlevo nahoře v rámečku Light patterns je možné nastavit jeden z předdefinovaných tvarů jasu. Níže v rámečku Update je možné zvolit režim, v jakém bude probíhat odesílání jasů. Je možné odesílat data při stisknutí tlačítka Update values nebo automaticky při změně jakéhokoliv jasu.

Uprostřed v rámečku je možné volit jednotlivé jasy LED diod, buď pomocí posuvné lišty, nebo zadáním numerické hodnoty v rozmezí 0 – 1023. Pomocí posuvné lišty vpravo je možné nastavovat jas všech LED diod najednou. Nastavené jasy LED

diod lze posouvat horizontálním směrem na vedlejší LED diody pomocí horizontální posuvné lišty. Ve výchozím stavu je nastaven posuv po skocích o celé pozice LED diod. Použitím rámečku Approximation vlevo dole je možné nastavit meziskoky při horizontálním pohybu a tím dosáhnout plynulého pohybu světla na LED diodách. Je možné vybírat z lineární a exponenciální aproximace a počtu 1 – 32 mezikroků mezi celými pozicemi LED diod. Exponenciální aproximace byla vybrána z důvodu přiblížení fyziologickým vlastnostem lidského oka.

Roletové menu Device dole uprostřed slouží k výběru cílového obvodu integrovaného budiče. Deska evaluačního kitu obsahuje dva integrované obvody, mezi kterými je možné průběžně přepínat.

Do programu byl implementován také efekt s LED diodami, tzv. Wiping blinker. Jedná se o reálně používaný efekt pro blinkery automobilů, aktuálně použitý například ve světlometu Audi Matrix Headlight, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.2. Efekt se spouští tlačítkem Start, končí tlačítkem Stop, lze také nastavit jeho rychlost. Efekt spočívá v postupném spínání LED diod v řadě.

### **3.2.2 Záložka NCV78247**

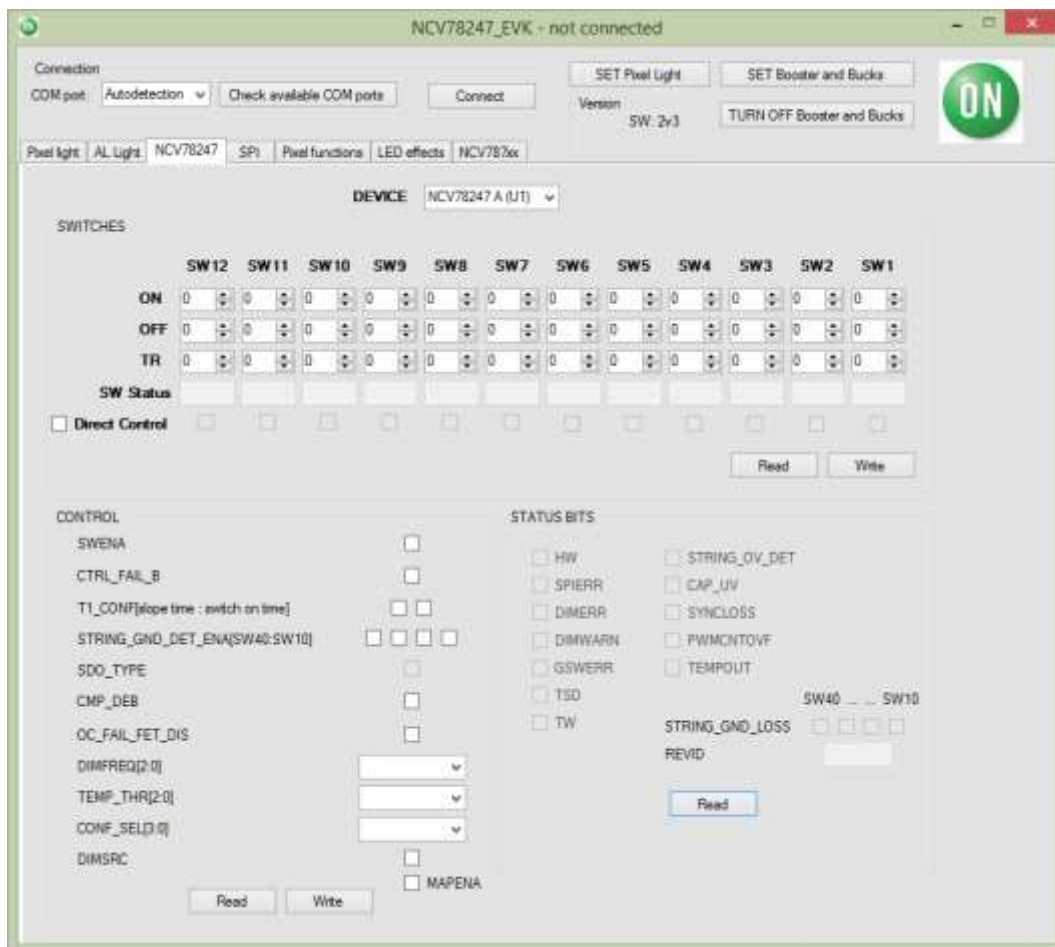
Další záložkou je „NCV78247“, znázorněna na Obr. 3.3. Tato záložka slouží pro přímý přístup do registrů v integrovaném budiči LED světlometu.

Nejprve je třeba vybrat cílové zařízení v roletovém menu Device. Deska evaluačního kitu obsahuje dva integrované obvody. Ve výchozím stavu v programu je vybrán první z nich.

Rámeček SWITCHES nabízí přístup k hodnotám ON, OFF a TR pro všech 12 spínačů. Hodnoty ON a OFF mohou nabývat hodnot 0 – 1023. Hodnoty TR pak 0 – 15. Hodnoty je možné vyčíst tlačítkem Read nebo zapsat vlastní hodnoty tlačítkem Write. Je třeba však mít na paměti, že je třeba dodržovat zásady dané v kapitole 1.5.2. Mimo jiné například není možné zadávat stejné hodnoty ON a OFF časů pro více spínačů najednou.

Rámeček CONTROL umožňuje přístup do kontrolních registrů integrovaného budiče LED světlometu. V případě použití tlačítka SET Pixel light je rámeček předvyplněný zapsanými hodnotami. Tyto hodnoty je opět možné vyčíst tlačítkem Read nebo zapsat vlastní tlačítkem Write. Volba hodnoty SDO\_TYPE je vždy nastavena na hodnotu nula a nelze ji změnit. Je to dáno konstrukcí desky evaluačního kitu, který obsahuje dva integrované budiče LED světlometu. Pokud mají dva tyto integrované obvody komunikovat pomocí jednoho MISO spoje, je třeba u nich použít konfiguraci výstupu SPI jako otevřený kolektor. V případě nastavení výstupu jako Push-pull by došlo k vzájemnému ovlivňování.

Třetí rámeček nazvaný STATUS BITS obsahuje informační registry, které informují o stavu integrovaného obvodu a jeho chybách. V případě správného nastavení jsou všechny bity v nule s výjimkou bitu PWMCNTOVF.



Obr. 3.3 Záložka NCV78247 v PC programu

### 3.2.3 Záložka SPI

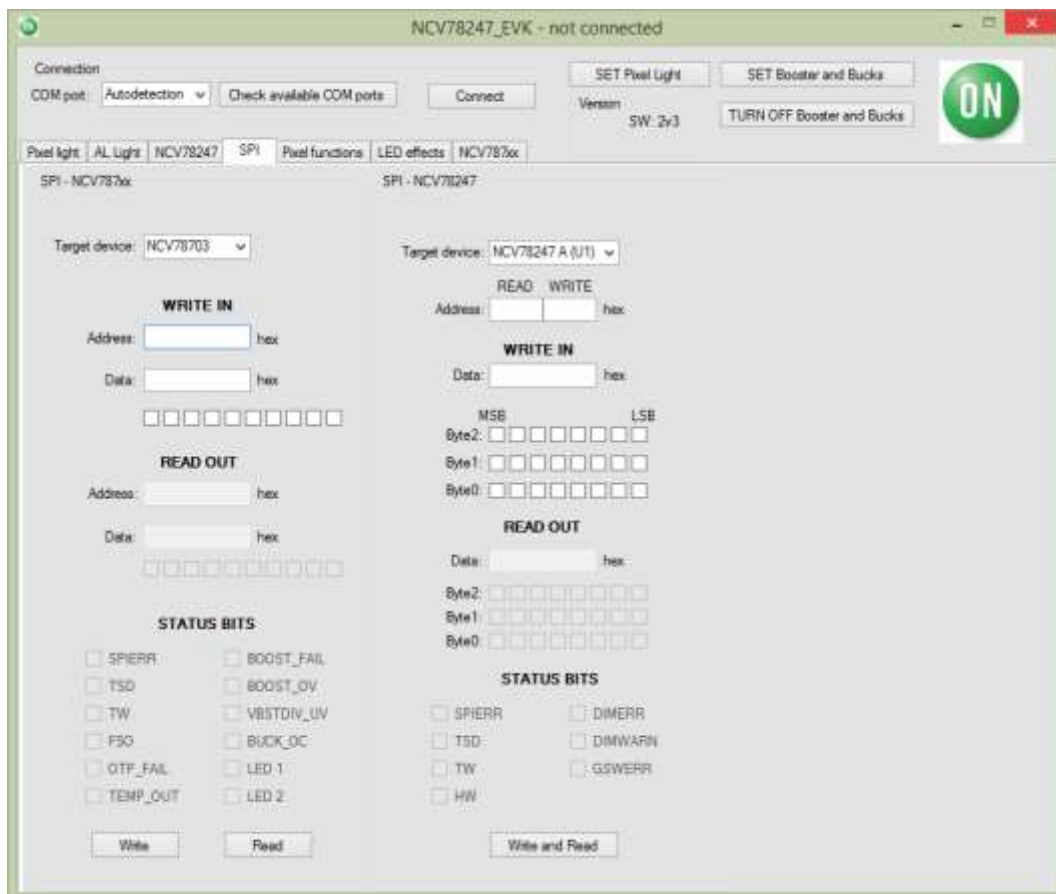
Třetí záložka v programu je nazvaná SPI a jak už název vypovídá, umožňuje přímo ovládat SPI komunikaci s jednotlivými integrovanými obvody. Levá půlka této záložky, umožňující komunikaci s integrovanými obvody zdroje, je převzata z předchozí diplomové práce. Pravá půlka záložky, zprostředkující komunikaci s obvodem integrovaného budiče je nová a bude následně popsána.

Nejprve je nutné opět vybrat cílový integrovaný obvod. Následně se vyplní registry, že kterých je požadováno čtení a zápis. Jeden z nich je možné nechat nevyplněný v případě, že daná operace není požadovaná. Například pokud chceme pouze číst z registru C, vyplní se pouze kolonka READ. Do SPI přenosu se automaticky doplní adresa WRITE registru, který je pouze pro čtení a žádný zápis se tedy neprovede.

K zápisu je možné využívat dvě formy, které jsou vzájemně synchronizované, a to zadávání dat k zápisu v hexadecimálním formátu, nebo zadávání dat po jednotlivých bitech.

SPI přenos se spouští tlačítkem Write and Read. Během každého SPI přenosu jsou přenášeny i informační bity, které jsou následně vyplněny do příslušných kolonek v rámečku.

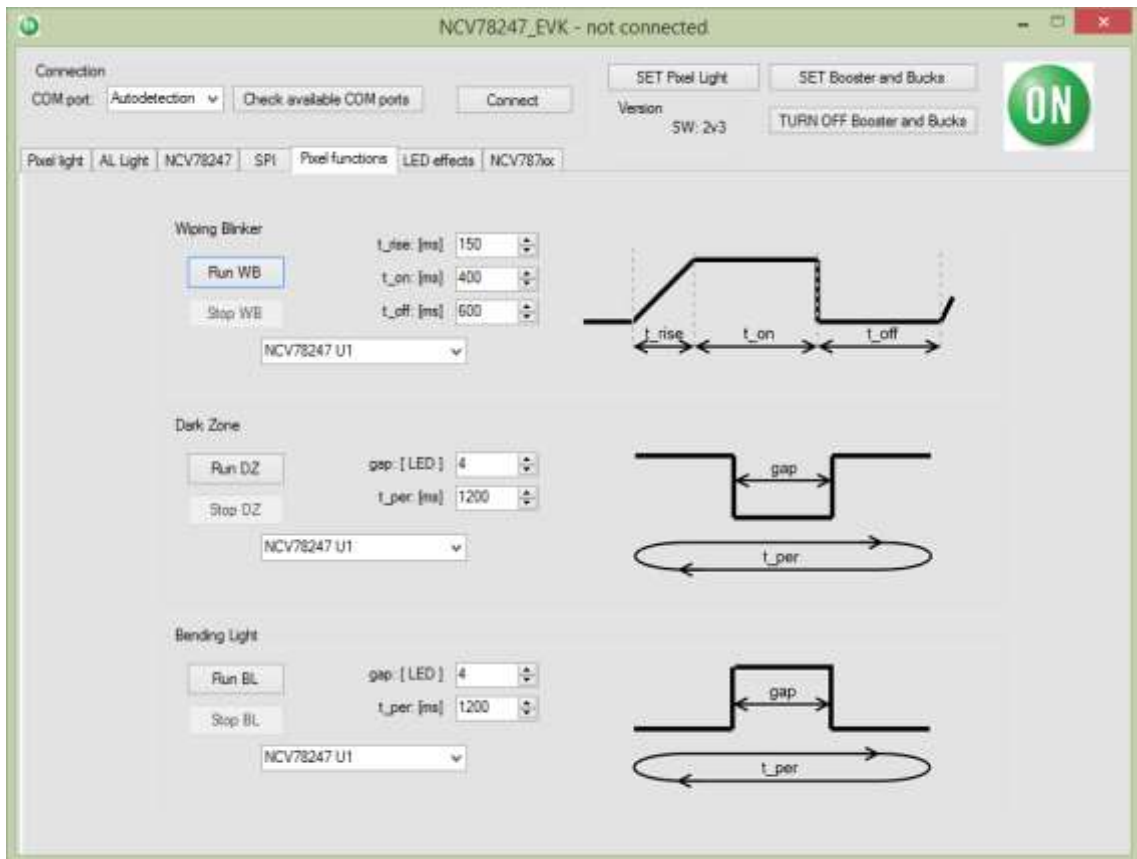




Obr. 3.4 Záložka SPI v PC programu

### 3.2.4 Záložka Pixel functions

Poslední zde představená záložka nese název Pixel functions a obsahuje tři ukázkové funkce pro maticový LED světlomet, popsané v kapitole 5.3. Každá funkce je spustitelná tlačítkem Run. Zastavit vykonávání funkce lze tlačítkem Stop u příslušné funkce. U každé funkce lze také nastavit cílový obvod, na kterém se má funkce vykonat. Každá funkce má své určité parametry, které je možné nastavit. Funkce wiping blinker obsahuje tři, ostatní funkce dva parametry. Všechny parametry jsou ve výchozím stavu nastavené tak, aby bylo možné efekt ihned spustit.



Obr. 3.5 Záložka Pixel functions v PC programu

## 4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ INTEGROVANÉHO BUDIČE A EVALUAČNÍHO KITU

V rámci diplomové práce bylo provedeno měření některých parametrů integrovaného budiče společnosti ON Semiconductor a desek evaluačního kitu v provozu. Vzhledem k faktu, že integrovaný budič je stále ještě ve fázi vývoje, nemusí být některé naměřené parametry konečné a mohou se změnit. Zároveň nebylo možné vzhledem k utajení před konkurencí změřit a zveřejnit všechny parametry obvodu, a proto byly vybrány a změřeny jen některé zajímavé.

Pro měření byly použity tyto měřicí přístroje:

- Osciloskop: Agilent DSO7140A
  - Časové průběhy, měření frekvence
  - Sériové číslo: MY48250015
- Proudová sonda k osciloskopu 2x: Agilent 1147B
  - Časové průběhy proudů LED diodami
  - Sériové číslo 1: JP53020261
  - Sériové číslo 2: JP53020852
- Napěťový zdroj: Agilent 3614A
  - Sériové číslo: MY40001543
- Multimetr: Mastech M890G
  - Měření napětí a proudu
- Multimetr: UNI-T UT-50D s termoelektrickým článkem
  - Měření teploty

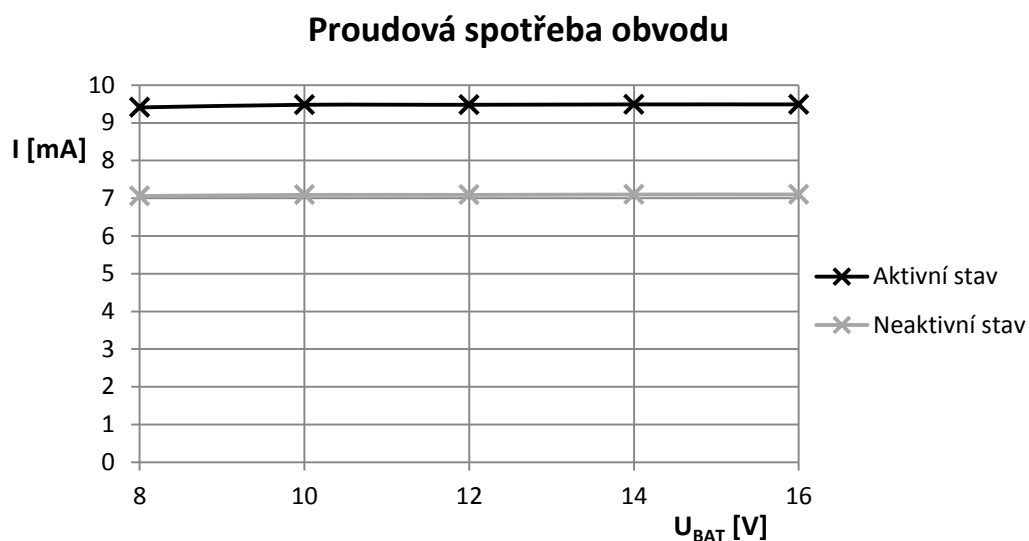
### 4.1 Spotřeba obvodu

Nejprve byla změřena proudová spotřeba samotného obvodu. Proudová spotřeba byla změřena pro jeden samotný integrovaný obvod zároveň s napájením jeho vlastní SPI buňky, která má externí napájení.

Napájecí napětí se pohybovalo v rozmezí 8 – 16 V. Není to plný rozsah napájecího napětí, který integrovaný budič dovoluje, ale tento rozsah byl limitován použitým proudovým zdrojem a navíc se jedná o rozmezí napětí, které se může objevit v palubní síti automobilu. Graf naměřených hodnot je zobrazen na Obr. 4.1.

Změřeny byly vždy dvě hodnoty. Jedna pro aktivní stav, kdy bylo aktivní generování PWM signálů a spínání tranzistorů, a druhá pro neaktivní stav bez spínání tranzistorů a generování PWM.

Z grafu spotřeby je jasné, že odebíraný proud ze zdroje se prakticky nemění v závislosti na napájecím napětí.

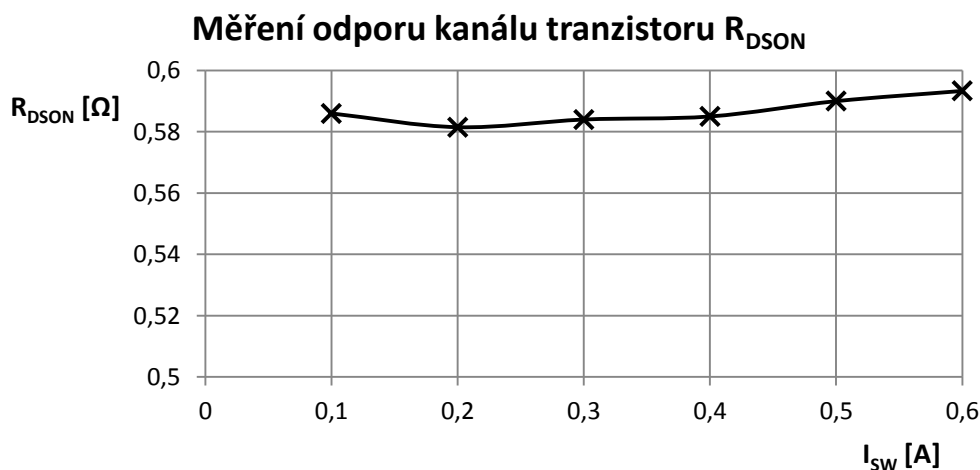


Obr. 4.1 Proudová spotřeba integrovaného budiče

## 4.2 Odpor spínačů

Dalším měřeným parametrem byl sériový odpor kanálu v sepnutém stavu ( $R_{DSON}$ ) použitých MOS tranzistorů v integrovaném budiči.

Sériový odpor  $R_{DSON}$  byl měřen pro jeden tranzistor, který byl nastaven, aby byl stále sepnut. Tranzistorem protékal definovaný stejnosměrný proud  $I_{SW}$  a bylo na tranzistoru měřeno napětí. Výsledný graf závislosti  $R_{DSON}$  na procházejícím proudu je zobrazen na Obr. 4.2.

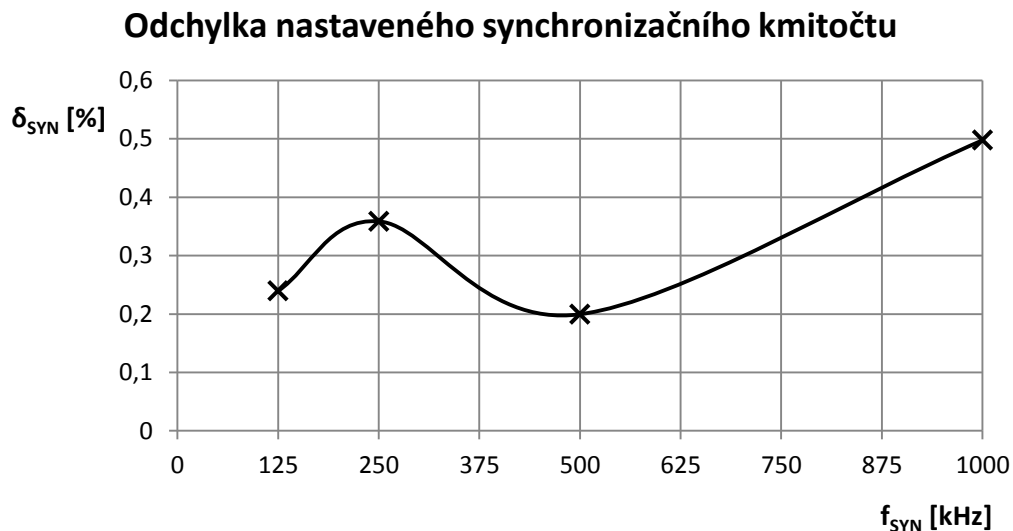


Obr. 4.2 Měření odporu kanálu tranzistoru  $R_{DSON}$

Z grafu je možné vidět, že hodnota odporu kanálu tranzistoru se podle předpokladu se změnou procházejícího proudu příliš nemění.

### 4.3 Měření synchronizační frekvence

Synchronizační frekvence (SYN) slouží ke generování PWM signálu tím, že přímo inkrementuje čítač, generující PWM. Kmitočet SYN je možné použít z interního oscilátoru. Následující měření ukazuje relativní odchylku synchronizačního kmitočtu od nastaveného kmitočtu.



Obr. 4.3 Odchylka nastaveného synchronizačního kmitočtu

Z grafu naměřených hodnot vyplývá, že nastavená hodnota synchronizačního kmitočtu je přesná, relativní odchylka je velmi malá.

### 4.4 Průběhy napětí a proudu na spínači

Podrobnější pohled na chování spínače v čase přináší tato kapitola. Jsou zde měřeny průběhy na dvou spínačích v řetězci nejbližše země se zapojenými LED diodami.

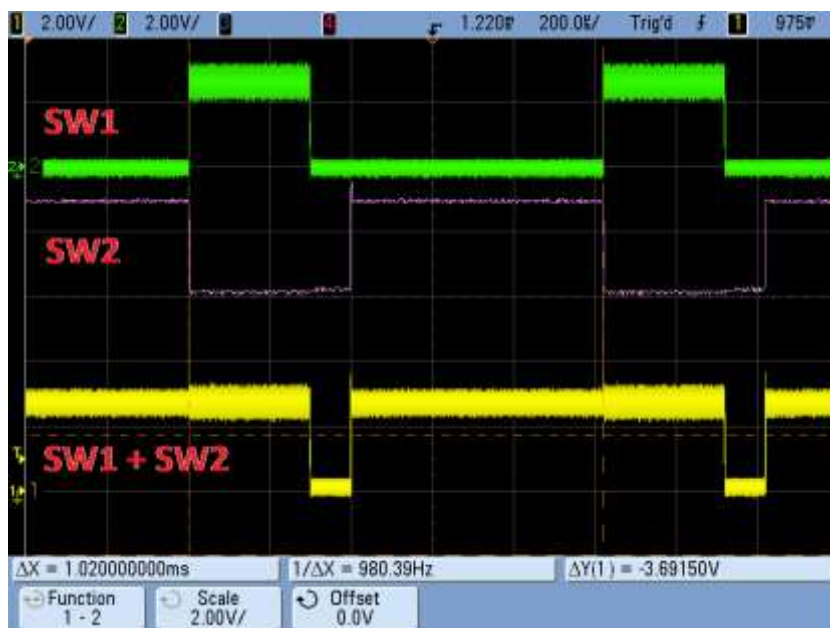
Nejprve byly nastaveny následující parametry obou spínačů:

- SW1: ON = 300; OFF = 1023
- SW2: ON = 0; OFF = 400

Na Obr. 4.4 je vidět průběh jedné PWM periody, ohraničený kurzory. Osciloskopem byl změřen průběh napětí na spínači SW1 a průběh napětí na dvou spínačích zároveň SW1+SW2. Výsledný průběh na spínači SW2 byl proveden matematickou operací. Velké zvlnění napětí způsobuje použitý spínaný proudový zdroj, jehož zvlnění způsobilo zvlnění napětí.

Další průběhy popisují průběh hran při sepnutí (Obr. 4.5) a rozepnutí (Obr. 4.6) spínače. Z grafů je evidentní, že rozepnutí spínače je znatelně rychlejší než sepnutí. Je to dáno definovanou strmostí v integrovaném budiči.

Poslední graf Obr. 4.7 popisuje změnu celkového proudu  $I_{LED}$ , procházející celým LED řetězcem a proudu  $I_{SW1}$ , procházející spínačem SW1 při sepnutí spínače SW1. Z grafu je zřejmé, že sepnutí spínače nezpůsobí znatelný překmit proudu, což je výhodné, protože to znamená žádný parazitní efekt ve svitu ostatních LED diod. Zhasnutí jedné LED diody tedy nemá vliv na svit ostatních LED diod. Tento překmit velmi závisí na použité výstupní kapacitě spínaného zdroje. Čím větší kapacita na výstupu, tím lze předpokládat vyšší překmit proudu při sepnutí spínače. Zde je použita velmi malá kapacita – 10 nF.



Obr. 4.4 Průběh jedné PWM periody pro dva spínače SW1 a SW2



Obr. 4.5 Sepnutí spínače SW2



Obr. 4.6 Průběh rozepnutí spínače SW2

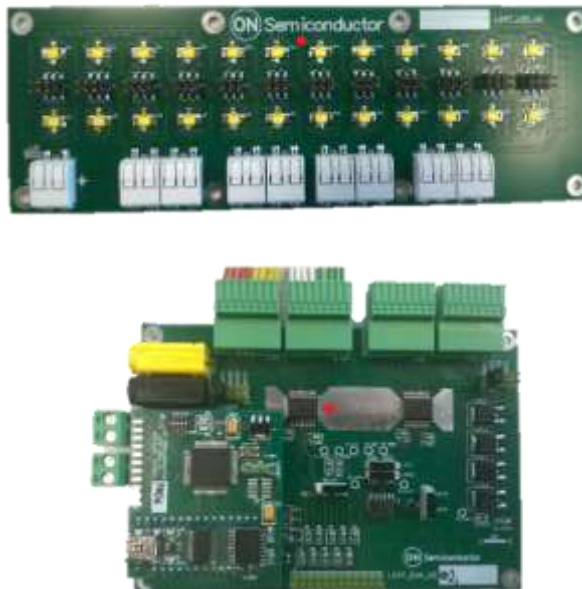


Obr. 4.7 Průběh proudu spínačem a LED řetězcem při sepnutí spínače SW1

## 4.5 Měření teplot navrhnutých desek

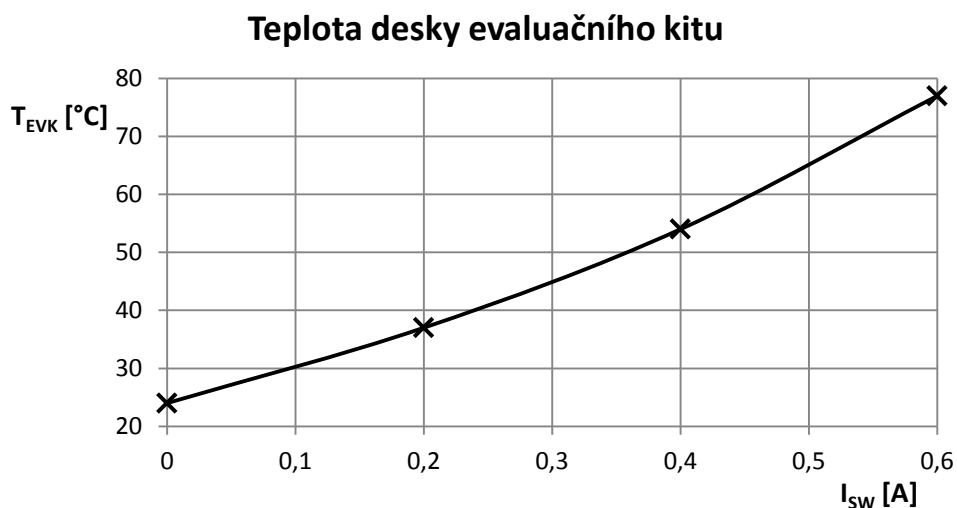
Všechny navržené desky obsahují nějaký zdroj tepla. Desku evaluačního kitu nejvíce zahřívá integrovaný budič, desku s LED diodami pak logicky LED diody. Také mikrokontrolerová deska je zahřívána obzvláště mikrokontrolérem, i když v tomto případě ne moc. Problém může nastat u prvních dvou zmíněných desek a proto byly tyto

desky teplotně změřeny pro krajní dovolené hodnoty. Měření teploty bylo prováděno v měřicím bodě, zakresleného červenou tečkou na Obr. 4.8.



Obr. 4.8 Měřicí bod (červená tečka) na měřených deskách

Deska evaluačního kitu je nejvíce zahřívána v případě, že všechny spínače v obou integrovaných budičích jsou stále sepnuty, a tedy skrz ně protéká proud a v integrovaných budičích vzniká teplo. Teplota desky v závislosti na procházejícím proudu integrovanými budiči je znázorněna na Obr. 4.9.

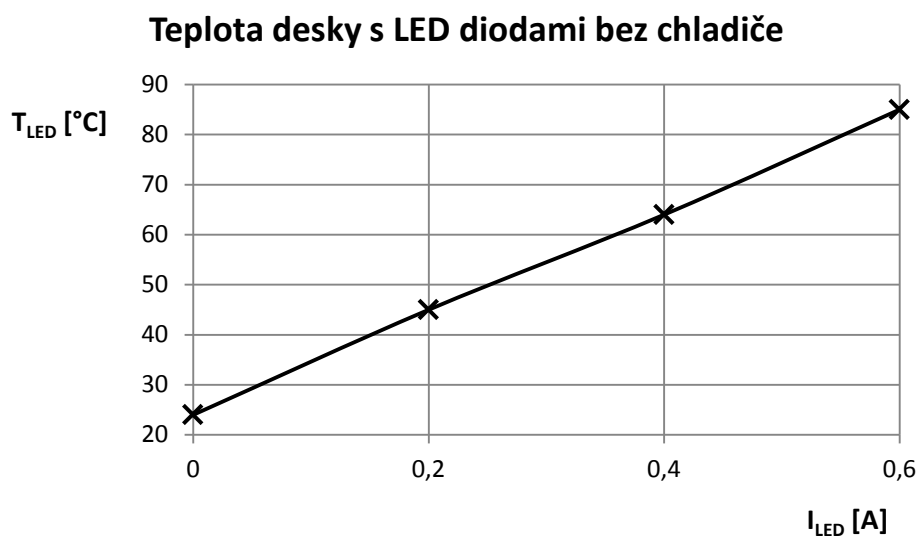


Obr. 4.9 Závislost teploty desky evaluačního kitu na proudu budičem



Z grafu je možné vyčíst, že desku lze provozovat na maximální proud i v nejhorší kombinaci nastavení spínačů bez obav o zničení desky. Navíc dlouhodobé použití kombinace maximálního proudu a nejhoršího nastavení spínačů není příliš pravděpodobné. Pokud by však takový případ nastal, tak je třeba dát pozor na vysokou teplotu desky, aby nedošlo ke spálení ruky při dotyku. Případně je možné dodatečně použít chladič.

Deska s LED diodami je nejvíce zahřívána v případě, že jsou všechny spínače integrovaného budiče rozepnuty a všechen proud teče skrz LED diody. Teplota desky v závislosti na procházejícím proudu LED diodami je znázorněna na Obr. 4.10.



Obr. 4.10 Závislost teploty desky s LED diodami na proudu LED diodami

Z grafu je zřejmé, že se deska s LED diodami zahřívá více, než deska evaluačního kitu. Z hlediska bezpečné teploty, kde nehrozí popálení, je možné desku dlouhodobě provozovat zhruba do proudu 0,3 A. U krátkodobých testů nevádí ani maximální proud 0,6A.

Pro bezpečné dlouhodobé provozování desky s LED diodami je třeba desku namontovat na chladič. Při použití doporučeného chladiče [19] a maximálního proudu 0,6 A se teplota desky s chladičem dlouhodobě drží na 45 °C. V této konfiguraci vzniká v LED diodách na jedné desce 21,3 W tepla.

# 5 ALGORITMY PRO ŘÍZENÍ MATICOVÝCH SVĚTLOMETŮ

Pro správné fungování maticového LED světloometu s integrovaným budičem je třeba do systému implementovat určité algoritmy. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.5.2, hodnoty jasů LED diod je nutné pomocí tzv. dimming algoritmu převést na hodnoty časů ON, OFF a hodnoty TR. Návrhy těchto algoritmů jsou popsány v následující kapitole 5.1.

Při pohybu světla, tedy při pohybu nějakého předdefinovaného světelného kuželu je vhodné zajistit, že světelný kužel se nebude pohybovat skokově po jednotlivých LED diodách, ale že se bude pohybovat plynule, nebo alespoň zdánlivě. Řešení této úlohy následuje v kapitole 5.2.

## 5.1 Dimming algoritmy

Pro korektní použití integrovaného budiče LED světloometů je potřeba implementovat již zmíněný dimming algoritmus, který převádí požadované hodnoty jasů LED diod na hodnoty ON, OFF a TR, které jsou dále odesílány do integrovaného budiče.

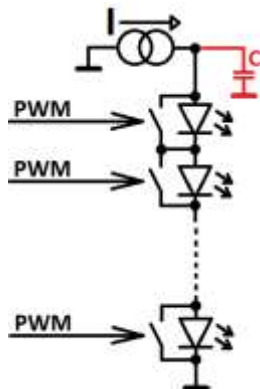
Dimming algoritmus není pro integrovaný budič konkrétně specifikován a je tedy nutné použít vlastní algoritmus. Jedním z cílů této práce je vytvořit přehled možných algoritmů, vyzkoušet je a porovnat jejich výhody a nevýhody.

Na dimming algoritmus jsou kladeny následující požadavky:

- V daný čas je možné sepnout pouze jeden spínač ( $ON [1] \neq ON [2]$ )
- Po sepnutí spínače je třeba počkat asi 12  $\mu s$ , než je možné sepnout další spínač
- Ideálně zajistit sepnutí jednoho spínače a rozepnutí jiného spínače ve stejný čas, čímž dojde ke kompenzaci nežádoucích jevů (powerbalancing)

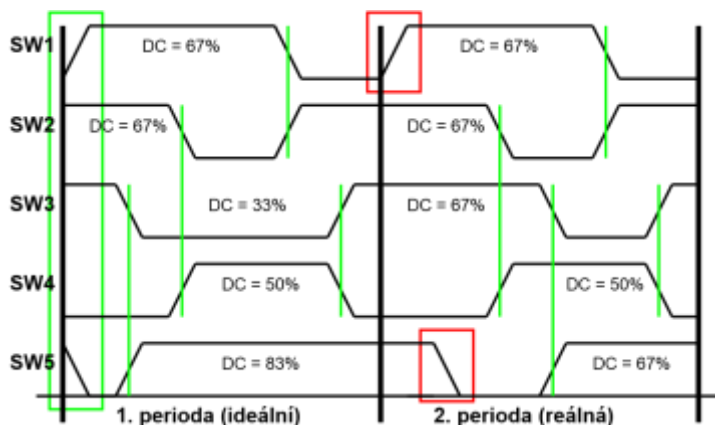
Překrytí sepnutí a rozepnutí spínačů je velmi vhodné z hlediska EMC i vyzařovaného světla LED diod. Na výstupu proudového zdroje se vždy nachází určitá kapacita, ať už tvořena reálnou součástkou, nebo pouze kapacitou vodičů. Vše je znázorněno na Obr. 5.1. Napětí na kapacitě odpovídá napětí na výstupu proudového zdroje. V případě, že se sepne jeden spínač, napětí na výstupu okamžitě poklesne o napětí na jedné LED diodě, která byla zkratována, tedy zhruba o 3 V. Toto prudké snížení napětí na výstupu vede k rychlému částečnému vybití kapacity přes LED diody, čímž vznikne proudová špička, která se projeví na svitu LED diod. Otázkou k řešení je, zda bude proudová špička dostatečně velká na to, aby rychlá změna svitu LED diod byla okem postřehnutelná. Každopádně z hlediska elektromagnetického vyzařování by bylo lepší, kdyby se v obvodu tyto špičky nevyskytovaly. Samozřejmě zde platí, že čím větší kapacita na výstupu, tím větší proudové špičky a větší vliv.

Splnění druhého požadavku již tak jasné není. Zde je třeba vzít v úvahu dimming frekvenci, nastavenou v integrovaném budiči, která se může pohybovat mezi 0 – 1000 Hz. Při nastavené frekvenci 500 Hz s uvažováním 10b čítače v integrovaném budiči je třeba zachovat mezeru 6 mezi dvěma sepnutími spínačů. V případě nejvyšší frekvence pak mezeru 12.



Obr. 5.1 Kapacita na výstupu proudového zdroje

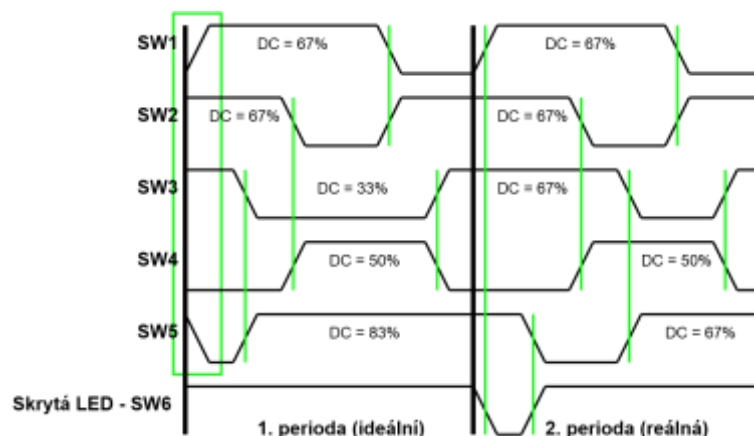
Ideální případ výsledku pro zadané hodnoty jasů LED diod postupně 33, 33, 67, 50 a 17 % je znázorněn na následujícím obrázku Obr. 5.2 vlevo. Jsou zde spárována všechna sepnutí a rozepnutí spínačů. Tohoto ovšem v praxi nelze rozumně dosáhnout, protože by musela být vždy splněna podmínka, že součet všech jasů je roven násobku periody, jako v tomto ukázkovém příkladu vlevo  $33 + 33 + 67 + 50 + 17 = 200\%$ . Vzhledem k relativně náhodnému charakteru jasů lze spíše říct, že součet všech jasů nebude roven násobku periody skoro nikdy.



Obr. 5.2 Ideální a reálný případ výsledku dimming algoritmu

Jedním z možných způsobů řešení, pokud součet všech jasů není roven násobku periody, je využití dalšího spínače s LED diodou, která by se nepodílela na vyzařování světla. Použití této skryté LED diody lze vidět na Obr. 5.3.

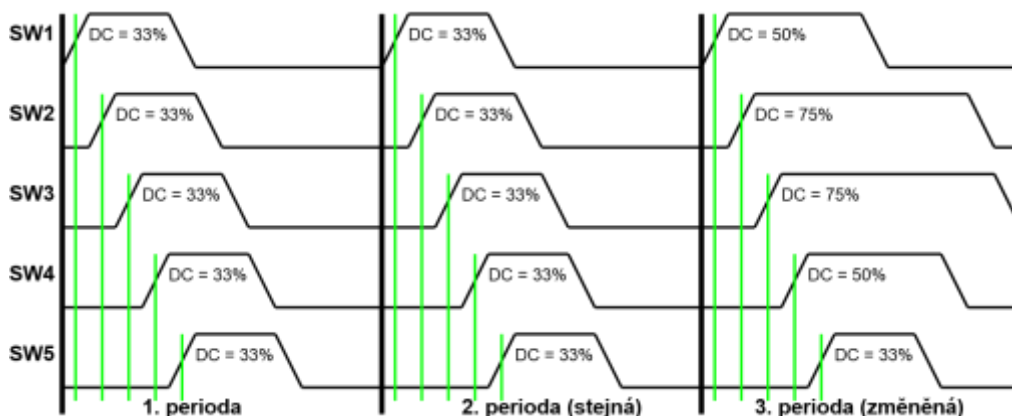
Skrytá LED dioda by sice vyřešila problém se spárováním sepnutí a vypnutí spínačů, ale vyžadovala by další konstrukční řešení ve světlometu a v neposlední řadě by znamenala také výrazný pokles účinnosti světlometu, protože v nejhorším případě by LED dioda vyzařovala 1/12 celkového výkonu jednoho řetězce. Proto toto řešení není vhodné pro sériově vyráběný světlomet, použitý v automobilu.



Obr. 5.3 Ideální a reálný případ s použitím skryté LED diody

### 5.1.1 Algoritmus s konstantním posuvem fáze

Název algoritmu s konstantním posuvem fáze (Fixed phase shift dimming algorithm) [23] obsahuje hlavní myšlenku tohoto algoritmu, ve kterém je každému sepnutí tranzistoru přiřazen konkrétní čas, nezávisle na ostatních, čímž je dosaženo, že nedojde k jejich překrytí. Jak by mohl výsledek vypadat pro dvě zadání jasů je vidět na Obr. 5.4.



Obr. 5.4 Obecný výsledek algoritmu s konstantním posuvem fáze pro dvě skupiny jasů

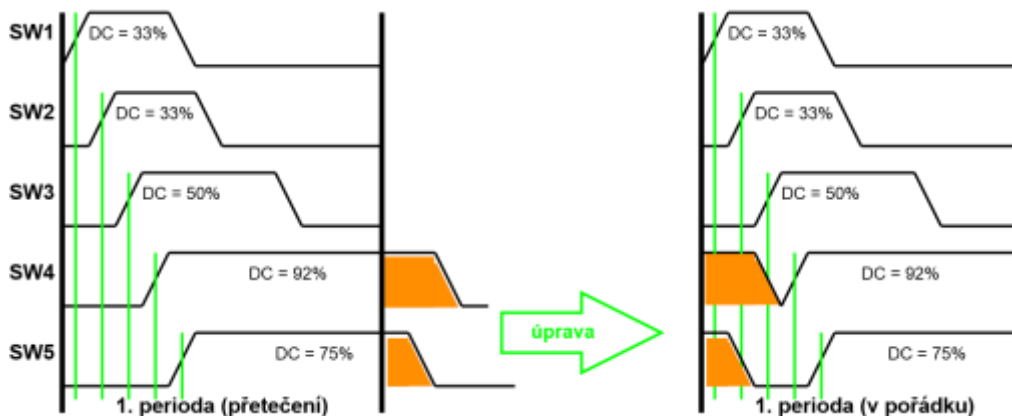
Z přiložených obrázků je hned jasné, že tento algoritmus nesplňuje podmínku na vykompenzování jevů sepnutí a rozepnutí spínače. Na druhou stranu dokáže jednoduše zajistit, že sepnutí dvou spínačů nenastane ve stejný okamžik, ani blízko sebe. Navíc je tento algoritmus relativně jednoduchý, což je také důležité, a proto bude rozvinut a popsán dále.

Nejprve je nutné nadefinovat časy sepnutí spínačů v periodě. Na začátku periody je třeba nechat dostatek času na případné proběhnutí vektorů prodloužení (TR vektorů), zbytek periody už je možné rovnoměrně rozdělit pro jednotlivé spínače. Výsledek je vidět v Tabulka 1.

Tabulka 1 Rozdělení periody na časy sepnutí jednotlivých spínačů

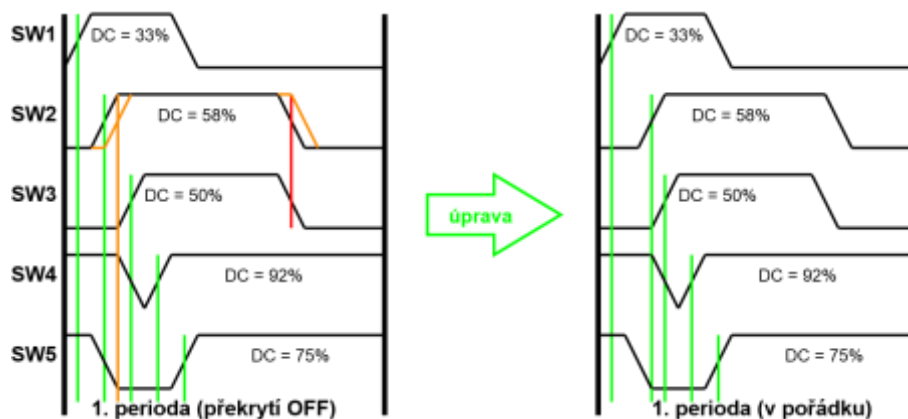
| Kanál             | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12   |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| ON <sub>min</sub> | 158 | 230 | 302 | 374 | 446 | 518 | 590 | 662 | 734 | 806 | 878 | 950  |
| ON <sub>max</sub> | 215 | 287 | 359 | 431 | 503 | 575 | 647 | 719 | 791 | 863 | 935 | 1007 |

Dále je třeba vyřešit problém s velkými hodnotami stříd, které se už spolu s konstantním posuvem sepnutí spínače do periody nevejdou. Příklad a řešení je uvedeno na Obr. 5.5. Pokud by mělo dojít k přetečení, je třeba přetečenou část vzít a umístit ji na začátek periody.



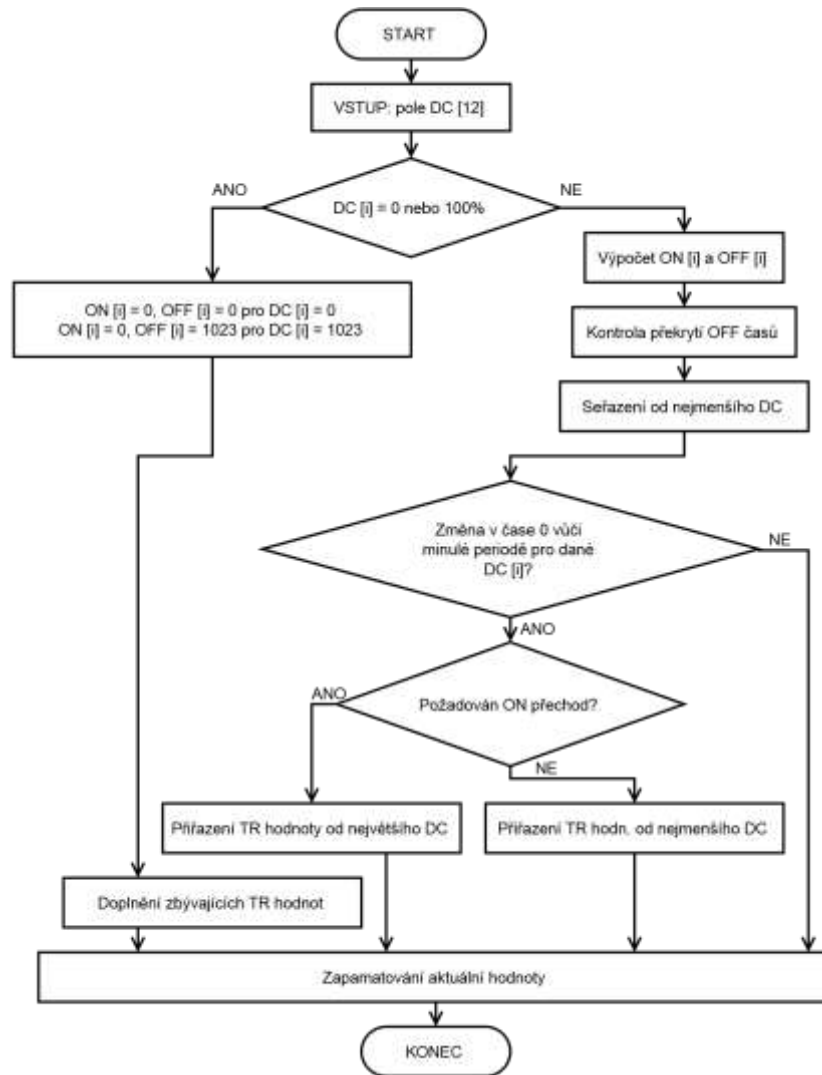
Obr. 5.5 Řešení přetečení při velkých střídách

Algoritmus sám o sobě zatím zajišťuje zabránění překrytí ON časů, ale překrytí OFF časů neřeší, což je také vhodné doplnit. To je znázorněno na Obr. 5.6. V případě překrytí OFF časů je například vhodné posunout celý puls (oranžová barva), čímž se zajistí nepřekrytí ON ani OFF časů.



Obr. 5.6 Řešení překrytí OFF časů

Vývojový diagram celého algoritmu se nachází na Obr. 5.7.



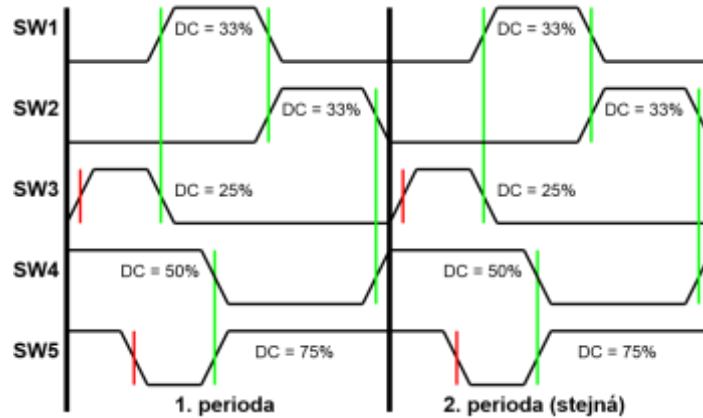
Obr. 5.7 Vývojový diagram algoritmu s konstantním posuvem fáze

### 5.1.2 Jednoduchý algoritmus s překrýváním

Druhý zde uvedený algoritmus by mohl být ze všech tří nejjednodušší a tím i nejrychlejší při zpracování, což by mohlo představovat podstatnou výhodu v závislosti na prostředí, kde bude algoritmus běžet. Výhoda by se měla projevit zvláště na pomalejších mikrokontrolérech. Tento algoritmus oproti předchozímu z kapitoly 5.1.1 měl mít navíc implementováno překrývání ON a OFF časů, neboli powerbalancing, o čemž se zmiňovala kapitola 5.1 [25]. Vzhledem k jeho jednoduchosti však i zde musel být umožněn jistý kompromis, a tím je zde negarantovaná velikost střídny PWM signálu sepnutí spínače. Skutečná velikost střídny ve zvláštních případech může být nižší, než je požadovaná. Z toho plyne, že ve zvláštních případech může daná LED dioda svítit více, než je požadováno. Jestli bude tento rozdíl znatelný, bude prověřeno při zhodnocení všech algoritmů.

Na následujícím obrázku Obr. 5.8 lze vidět výsledek algoritmu pro zadané jasy LED diody 67, 67, 75, 50, 25 %. Jednotlivé střídny byly nejprve seřazeny od nejmenší po největší a následně naskládány za sebe tak, že OFF čas předcházejícího spínače se kryje

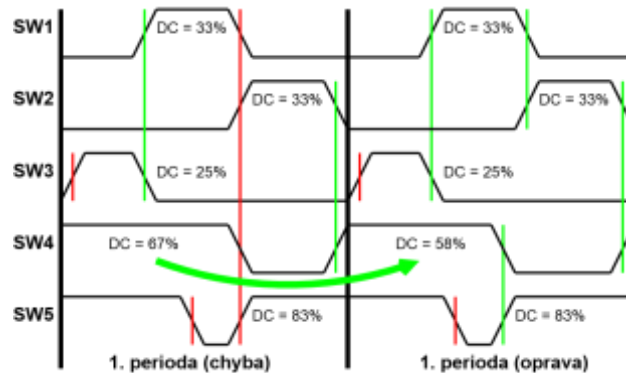
s ON časem následujícího spínače. Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, tímto způsobem nelze zajistit kompenzaci všech přechodů, ale vždy jeden ON čas a jeden OFF čas zůstane nevykompenzován.



Obr. 5.8 Výsledek jednoduchého algoritmu s překrýváním

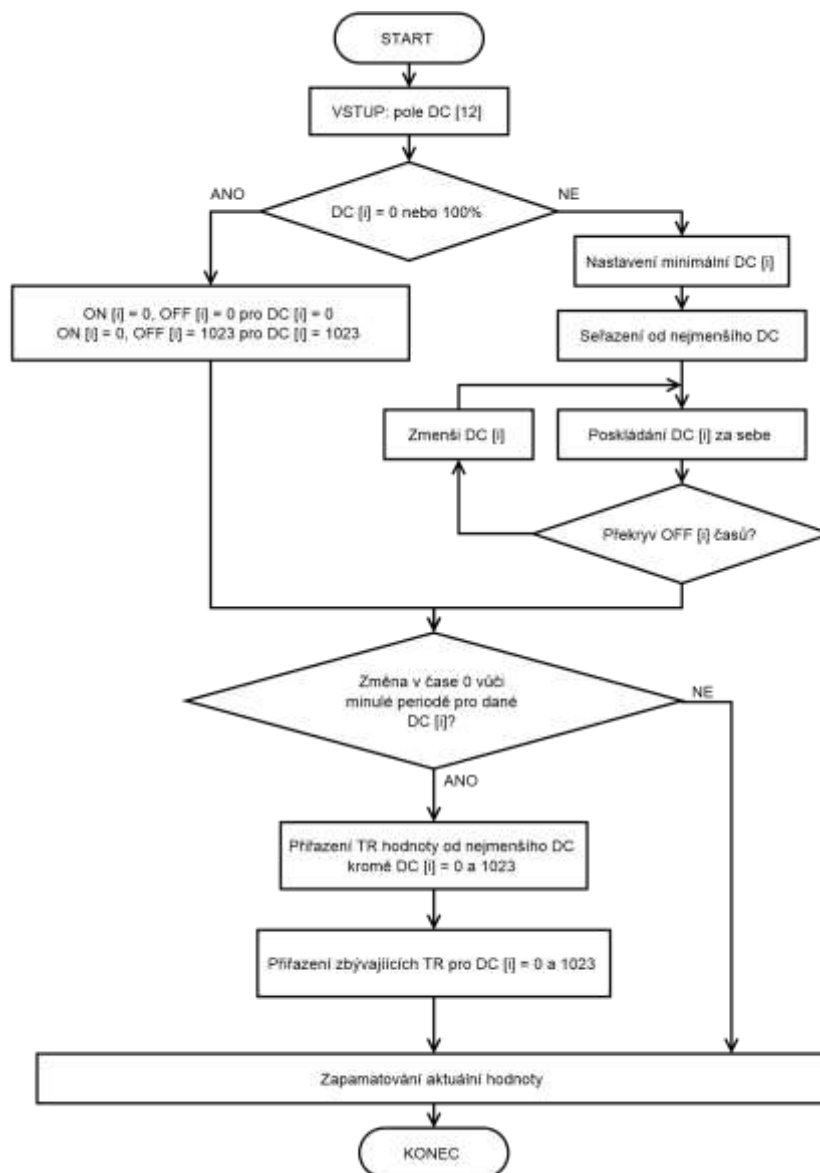
První slabina tohoto algoritmu a slabina obecně, pokud se snažíme o powerbalancing, je potřeba definování minimální střídy sepnutí spínače, pokud jsou střídy skládány za sebe. U spínače s dostatečně malou střídou totiž dojde k přiblížení ON časů do takové míry, která vyvolá chybový stav integrovaného budiče.

Druhý problém tvoří překrytí více ON časů. Tento problém je znázorněn na obrázku Obr. 5.9. To se dá vyřešit, jak už bylo naznačeno výše, snížením střídy a tím vyhnutí se překrytí ON časů.



Obr. 5.9 Snížení určité střídy pro odstranění konfliktu překrytí dvou ON časů

Přestože tento algoritmus vypadá rozumně, testování ukázalo, že pro reálné použití není vhodný a obsahuje dva problémy. Prvním je nepřesné nastavení stříd. Ukázalo se, že se nastavená střída může v krajních případech změnit až o desítky procent. Druhým problémem je špatná koncepce s prací s TR vektory. Tento druhý problém by sice řešitelný byl, ale vzhledem k velké nepřesnosti nastavených stříd je zbytečné to řešit. Ukázka vývojového diagramu celého algoritmu se nachází na Obr. 5.10.



Obr. 5.10 Vývojový diagram jednoduchého algoritmu s překrýváním (nefunkční)

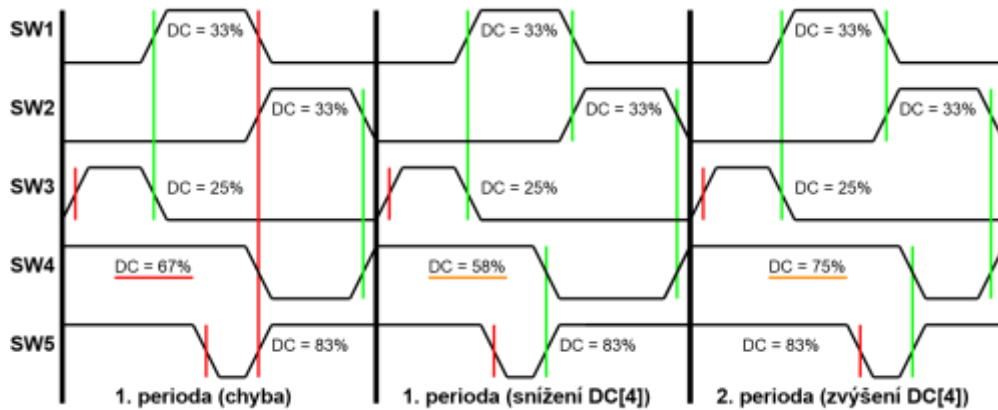
### 5.1.3 Jednoduchý algoritmus s překrýváním a kompenzací přes více period

Algoritmus představený v kapitole 5.1.2 je sice jednoduchý, ale má jednu velkou nevýhodu, a tím je možné nedodržení požadované střídavy sepnutí spínače. Tuto nežádoucí vlastnost by bylo teoreticky možné odstranit tím, že by se způsobena chyba v další periodě vykompenzovala.

Například nastalo by v jedné periodě snížení střídavy oproti požadované, v další periodě by byla střídava zvýšena oproti požadované hodnotě [24]. Výsledek je možné vidět na následujícím obrázku Obr. 5.11. Na čtvrtém spínači je požadovaná střídava 67 %, při níž však nastává překrytí více ON časů (vlevo). Místo toho byla střídava snížena (uprostřed), čímž však vznikla chyba ve velikosti střídavy, a proto byla v další periodě tato



chyba vykompenzována tím, že byla střída zvýšena nad požadovanou mez (vpravo), a tedy průměrná střída z těchto dvou period je požadovaných 67 %.

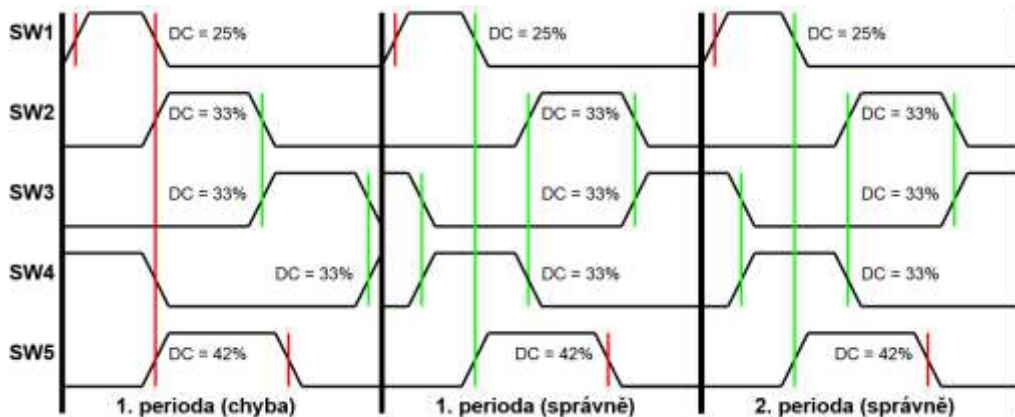


Obr. 5.11 Řešení problému při překrytí více ON časů s kompenzací přes více period

Tímto jsou sice požadavky splněny, ale tento algoritmus má také svou zásadní nevýhodu, a tou je, že ON a OFF časy v integrovaném budiči musí být aktualizovány každou periodu, což znamená vysoký provoz po komunikační lince SPI a vysoké vytížení mikrokontroléru, přestože se zadání jasů LED diod nemění. Proto je tento algoritmus nevhodný pro použití externě mimo integrovaný budič, například tedy v mikrokontroléru, a nebude proto dále rozvíjen ani programován.

#### 5.1.4 Pokročilý algoritmus s překrýváním

Posledním zde uvedeným algoritmem je pokročilý algoritmus s překrýváním ON a OFF časů. Jak už název vypovídá, jedná se o složitější algoritmus, jehož výstupem je však rozdělení ON a OFF časů s nezměněnými střídami sepnutí v jedné periodě. Výsledek pro požadované nastavení jasů LED diod 75, 67, 67, 67 a 58 % je na následujícím obrázku Obr. 5.12 uprostřed a vpravo. Při postupném skládání vznikla chyba, což lze vidět vlevo. Spínače SW1 a SW5 jsou poskládány za sebou a spínače SW2 – 4 tvoří pomyslnou smyčku, takže všechny přechody ve smyčce jsou vykompenzovány.



Obr. 5.12 Řešení problému při seskládání pokročilým algoritmem

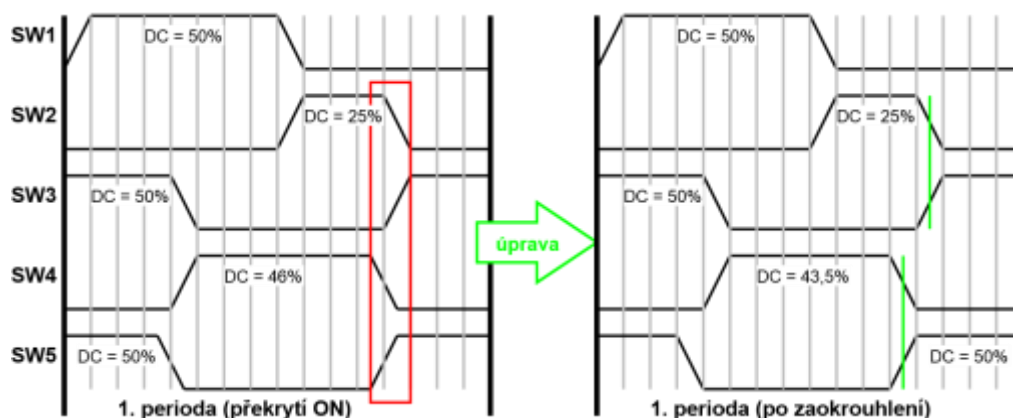
Hlavním cílem pokročilého algoritmu je tedy najít takové seřazení stříd, aby při něm nenastalo překrytí více ON časů, což je složitější a nejednoznačná úloha. Původně bylo zamýšleno použití iterativního algoritmu [25], který by postupně skládal pulsy za sebe, a v případě kolize zkusil jiný puls, nebo by se vrátil o několik kroků zpět a pokračoval jiným způsobem. Postupně při programování této idey však bylo nalezeno efektivnější řešení, jehož výsledek má podobné rysy, ale je mnohem jednodušší a více přímočarý. Tím vzniknul pokročilý algoritmus s překrýváním.

Základem pokročilého algoritmu s překrýváním a zároveň jeho neduhem je rozdělení periody na intervaly zvané timesloty, a tím i potřeba snížení přesnosti nastavených jasů v závislosti na obnovovací frekvenci (dimming frekvenci). U integrovaného budiče je dáno, že mezi sepnutými spínači musí být časová prodleva minimálně 12  $\mu$ s. Jeden timeslot musí být tedy dlouhý minimálně 12  $\mu$ s. Například pro dimming frekvenci 1000 Hz je možné periodu rozdělit na 64 timeslotů, z nichž každý je dlouhý asi 16  $\mu$ s. Hodnotu jasů s rozlišením 10 b je tedy nutné snížit na rozlišení 6 b. Hodnoty pro různé dimming frekvence se nachází v Tabulka 2.

Tabulka 2 Počet timeslotů pro danou dimming frekvenci

| Dimm. frekvence [Hz] | Počet timeslotů [-] | Přesnost jasů [bit] |
|----------------------|---------------------|---------------------|
| 1000                 | 64                  | 6                   |
| 500                  | 128                 | 7                   |
| 250                  | 256                 | 8                   |
| 125                  | 512                 | 9                   |

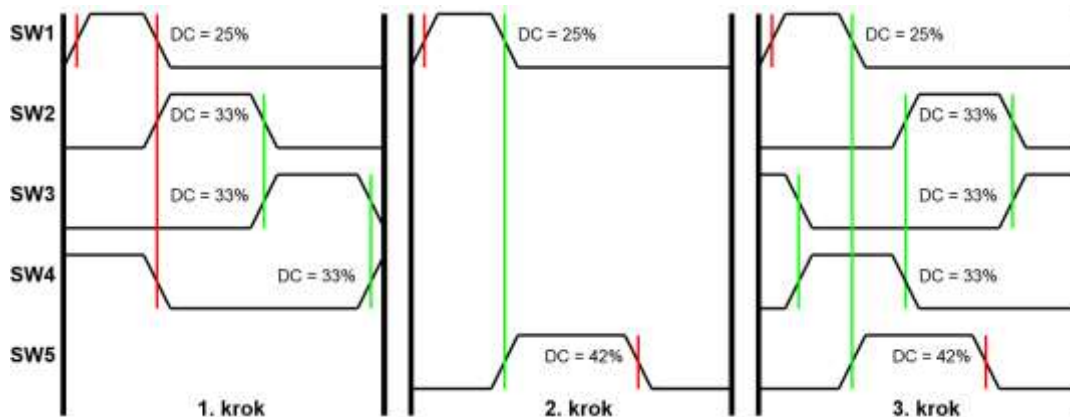
Lepší představu o fungování timeslotů si lze utvořit z Obr. 5.13.



Obr. 5.13 Zaokrouhlení jasů SW4 dle dostupných timeslotů (šedé čáry)

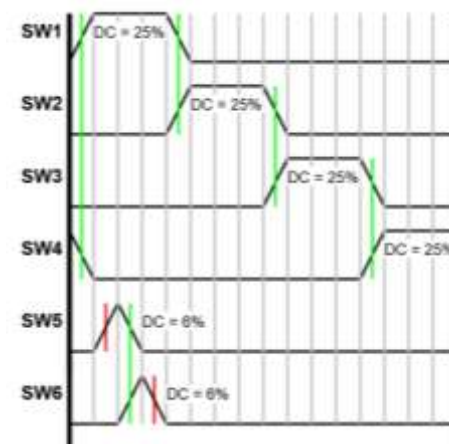
Fungování algoritmu je znázorněno na Obr. 5.14. Algoritmus má dvě fáze, a to řazení za sebe a řazení ve smyčce. Řazení za sebe znamená, že střídy jsou řazeny postupně, kde první a poslední přechod v řadě zůstane nevykompenzovaný. Řazení ve smyčce se vyznačuje vykompenzováním všech přechodů. Nejprve se uplatňuje řazení za sebe. V případě, že nastane překrytí OFF času s předchozím ON časem, je detekovaná uzavřená smyčka a všechny spínače, které se na smyčce podílí, jsou odmazány a přesunuty do další části algoritmu. Na Obr. 5.14 tvoří smyčku SW2, SW3 a SW4.

Algoritmus poté pokračuje s řazením za sebe pro další spínače, dokud nějaké zbývají. Po zařazení spínačů za sebe se algoritmus vrátí ke spínačům, u nichž byla detekovaná uzavřená smyčka a snaží se zařadit smyčku do volných timeslotů. Po zařazení všech detekovaných smyček se určí vektory prodloužení a algoritmus končí.



Obr. 5.14 Postup řešení pokročilého algoritmu s překrýváním

Aby bylo možné algoritmus prohlásit za přímočarý, je třeba dokázat, že libovolnou smyčku je možné zařadit do již uložené řady za sebe. K tomu je třeba uvážit nejhorší případ, tedy že smyčka je rovnoměrná, sestávající se ze stejných stříd a volná „oka“ jsou stejná. Zároveň přechody v řazení za sebou jsou uloženy těsně vedle sebe. Ukázka je znázorněna na Obr. 5.15.



Obr. 5.15 Nejhorší případ při vkládání smyčky

Výpočet pro reálné hodnoty 64 timeslotů a 12 spínačů je znátorněn v Tabulka 3. Jsou uváženy situace s různým počtem stříd ve smyčce a v řazení za sebou. Aby algoritmus fungoval, musí být zbývající počet timeslotů v oku nezáporný. Ve všech případech je zbývající počet timeslotů v oku minimálně roven dvěma, takže je zde navíc rezerva.

Tabulka 3 Přehled nejhorsích případů pro pokročilý algoritmus

|                                   |    |    |   |   |   |   |    |    |    |
|-----------------------------------|----|----|---|---|---|---|----|----|----|
| Počet stříd za sebou              | 1  | 2  | 3 | 4 | 5 | 6 | 7  | 8  | 9  |
| Počet stříd ve smyčce             | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5  | 4  | 3  |
| Počet timeslotů v oku smyčky      | 4  | 5  | 6 | 7 | 8 | 9 | 11 | 15 | 20 |
| Obsazený počet timeslotů za sebou | 2  | 3  | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  | 9  | 10 |
| Zbývající počet timeslotů v oku   | 2  | 2  | 2 | 2 | 2 | 2 | 3  | 6  | 10 |

Stejně jako u jednoduchého algoritmu s překrýváním, i u tohoto algoritmu se při provozu objevil problém se špatnou prací s TR vektory. Případné TR vektory mohou zabírat od času 0 několik timeslotů. V případě, kdy jsou požadovány TR vektorem autonomní ON přechody a zároveň se ve stejných slotech vyskytují i běžné ON časy, dojde k vyvolání chyby integrovaného budiče. Řešením tohoto problému je nechat co nejvíce timeslotů od času 0 prázdných pro případné TR vektory. V pokročilém algoritmu s překrýváním však nelze jednoduše zaručit, že se v daném intervalu od času 0 nebudou nacházet žádné ON časy, a proto byl použit následující postup. Již uvedeným postupem se vypočítají všechny ON a OFF časy pro všechny LED diody. Následně se najde mezi obsazenými timesloty největší mezera a všechny ON a OFF časy se přesunou tak, aby největší mezera byla na začátku periody. V dalším kroku jsou přiřazeny TR vektory ke spínačům, které jej nutně vyžadují, což jsou ty, které mají nastavený 100 % DC a zároveň se v předchozím stavu nacházely ve vypnutém stavu. Tyto spínače musí mít korektně nastavený TR vektor. Bylo ověřeno, že vždy je mezera na počátku periody dostatečně velká, aby mohlo dojít ke správnému přiřazení TR vektoru těmto spínačům. Následně jsou přiřazeny i TR vektory ostatním spínačům. V případě že mezera na začátku není příliš velká se může stát, že některé TR vektory nebudou přiřazeny. Tím vznikne při změně stříd chyba, která se projeví pouze v první periodě po změně, nikoliv jako chybový stav integrovaného budiče.

Vývojový diagram pokročilého algoritmu s překrýváním je zaznačen na Obr. 5.16.



Obr. 5.16 Vývojový diagram pokročilého algoritmu s překryváním

### 5.1.5 Porovnání jednotlivých algoritmů

Oba naprogramované algoritmy mají své určité výhody a nevýhody. Aby bylo možné uvažovat, jaký vliv případné výhody a nevýhody mají, bude třeba jednotlivé případy rozebrat.

#### Překrývání ON a OFF časů

Hlavním rozdílem naprogramovaných algoritmů je implementace překrývání ON a OFF časů, neboli powerbalancing. Teoretický základ pro jeho použití je jasný, otázkou však je, jak powerbalancing funguje ve skutečnosti. Na oscilogramu Obr. 5.17 je uveden záznam z měření evaluačního kitu. LED dioda byla protékána konstantním proudem 100 mA ze spínaného zdroje. Hodnota kapacity na výstupu spínaného zdroje byla 220 nF. Na oscilogramu je vidět napětí na LED diodě žlutě a proud LED diodou červeně. V sérii s LED diodou byly další LED diody, které byly ve vhodných okamžicích zkratovány paralelními spínači. Zleva je možné vidět OFF přechod, tedy stav, kdy došlo k odpojení paralelního spínače. Druhý zleva je ON přechod, kdy došlo k sepnutí spínače. Ve třetím stavu došlo k překrytí přechodu ON a OFF a v posledním stavu došlo také k překrytí ON a OFF přechodu, ale OFF přechod začal o jeden takt dříve. Jak je z grafu vidět, zkratování jiné LED diody v řetězci má vliv na další LED diody v řetězci. Největší vliv mají podle předpokladů samostatné přechody ON a OFF. V případě, že došlo k překrytí přechodů, je proudová špička menší, užší, a také změna napětí snímané LED diody trvala kratší dobu, takže evidentně má powerbalancing pozitivní vliv. V tomto srovnání tedy vítězí pokročilý algoritmus s powerbalancingem.

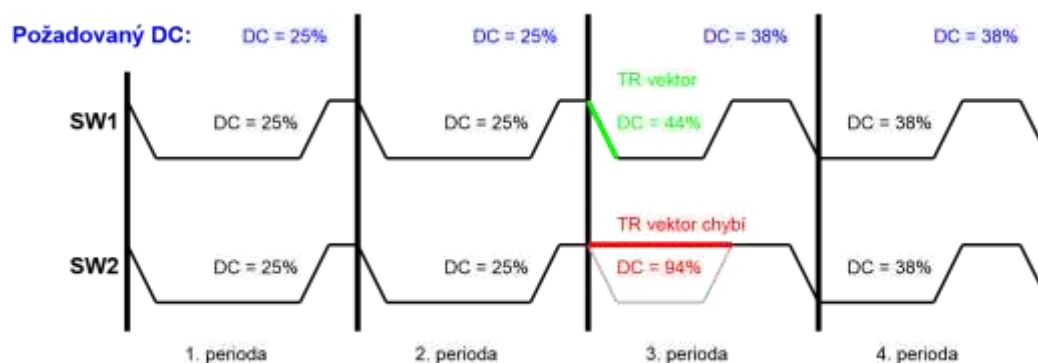


Obr. 5.17 Záznam přechodů, zleva OFF; ON; ON + OFF; ON + (OFF-1)

#### Chyba nastavení požadované střídy

Dalším kritériem pro volbu algoritmu je dodržení požadovaného jasu LED diody. Z tohoto kritéria jasně vychází lépe algoritmus s konstantním posuvem fáze, protože tento algoritmus přesně zachovává nastavenou střídu. Pokročilý algoritmus s překrýváním potřebuje ke své správné funkčnosti zaokrouhlení na nižší přesnost

vzhledem k původní hodnotě, jak již bylo uvedeno v kapitole 5.1.4. Například pro dimming frekvenci 500 Hz může dojít k zaokrouhlení až o 4 takty. Druhý problém může nastat při přiřazování TR vektorů. Vzhledem k rozmístění ON a OFF časů se může stát, že nebudou dostupné všechny TR vektory a u některých spínačů nemusí dojít ke správnému přiřazení. Poté se může stát situace, která je znázorněna na Obr. 5.18. Jedná se o jeden z nejhorších případů, kdy u SW2 při změně DC nezbyl dostupný TR vektor a dočasně jednu periodu po změně DC vzrostl DC na 94 %. Tento problém může nastat při vyšší dimming frekvenci, 500 – 1000 Hz. Při nižší dimming frekvenci 125 – 250 Hz tento problém nastat nemůže, protože je v nich k dispozici dostatečné množství volných timeslotů.



Obr. 5.18 Ovlivnění DC nepřirazením TR vektoru

### Rychlost výpočtu

Pro praktické využití dimming algoritmů je jistě zajímavé také porovnání z hlediska rychlosti výpočtu. Rychlost výpočtu je však relativní hodnota, která přímo závisí na výpočetním prostředku. Rychlost výpočtu byla tedy nejprve změřena na navrhnuté mikroprocesorové desce evaluačního kitu, kde se nachází mikrokontrolér ARM s jádrem Cortex M-3, běžící na kmitočtu 120 MHz (MCU 32b). Následně byl proveden odhad rychlosti výpočtu na PC. Notebook obsahoval procesor Intel i5-4200M s taktom 2,5 GHz. Měření velmi malých časů na PC je problém a proto byl odhad proveden tak, že algoritmus proběhl několikrát po sobě, až se čas dostal do měřitelných jednotek, a poté byl vypočten čas běhu algoritmu. Jak už ale bylo zmíněno, jedná se spíše o odhad, než přesné měření. Třetí měření proběhlo na osmibitovém kontroléru Atmel ATmega32U4 s taktovací frekvencí 16 MHz (MCU 8b). Předchozí stav algoritmu byl vždy DC = 0 pro všechny spínače. První čtyři případy obsahují nastavení DC pro všechny spínače stejné. Poslední dva případy uvažují nastavení Light pattern 1 a 2 z evaluačního kitu. Výsledky jsou zaznačeny v Tabulka 4. Zkratka KPF znamená algoritmus s konstantním posuvem fáze a PSP je pokročilý algoritmus s překrýváním.

Tabulka 4 Porovnání rychlosti výpočtu algoritmu na různých platformách

| Střída DC                | 0    | 1023 | 512  | 150  | L. P. 1 | L. P. 2 |
|--------------------------|------|------|------|------|---------|---------|
| MCU 32b – KPF [ $\mu$ s] | 26,2 | 25,1 | 40,0 | 39,5 | 30,7    | 43,35   |
| MCU 32b – PSP [ $\mu$ s] | 44,4 | 41,1 | 88,6 | 94,0 | 49,3    | 95,6    |
| PC – KPF [ $\mu$ s]      | 0,13 | 0,14 | 0,24 | 0,23 | 0,17    | 0,19    |
| PC – PSP [ $\mu$ s]      | 0,23 | 0,24 | 0,41 | 0,54 | 0,26    | 0,54    |
| MCU 8b – KPF [ $\mu$ s]  | 304  | 302  | 653  | 649  | 430     | 615     |
| MCU 8b – PSP [ $\mu$ s]  | 524  | 551  | 2564 | 1708 | 759     | 1540    |

Naměřená data nejsou až tak zajímavá z hlediska absolutní hodnoty, ale spíš z hlediska porovnání mezi oběma algoritmy. Z měření rychlosti výpočtu se potvrdil předpoklad, že algoritmus s konstantním posuvem fáze lze vypočítat podstatně rychleji a odhadem se dá říct, že je asi dvakrát rychlejší, než pokročilý algoritmus s překrýváním.

### Paměťová náročnost

Dalším podstatným kritériem jsou paměťové nároky algoritmu. Tento rozdíl se také projeví zvláště ve slabších mikrokontrolérech s menší dostupnou pamětí. Oba algoritmy obsahují několik proměnných, které jsou potřeba k jejich výpočtu. Shrnutí poskytuje následující Tabulka 5.

Tabulka 5 Paměťové nároky algoritmů s různou dimming frekvencí

| Algoritmus                    | Dimming frekvence [Hz] | Potřebná paměť [B] |
|-------------------------------|------------------------|--------------------|
| S konstantním fázovým posuvem | Libovolná              | 144                |
| Pokročilý s překrýváním       | 125 Hz                 | 5168               |
|                               | 250 Hz                 | 3120               |
|                               | 500 Hz                 | 2096               |
|                               | 1000 Hz                | 1584               |

### Shrnutí

Všechny dosud zmíněné parametry byly přehledně shrnuty do Tabulka 6.

Tabulka 6 Porovnání dimming algoritmů pro dimming frekvenci 1 kHz

|                                    | S konstantním fázovým posuvem    | Pokročilý s překrýváním          |
|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Překrývání ON a OFF přechodů       | <b>NE</b>                        | <b>ANO</b>                       |
| Dodržení nastaveného DC            | <b>ANO</b>                       | <b>NE</b>                        |
| Maximální absolutní velikost chyby | <b>0</b>                         | <b>8</b>                         |
| Viditelné artefakty při provozu    | <b>NE</b>                        | <b>NE</b>                        |
| Rychlost výpočtu v 32b MCU         | <b>25 – 43 <math>\mu</math>s</b> | <b>41 – 96 <math>\mu</math>s</b> |
| Velikost paměti pro výpočet        | <b>144 B</b>                     | <b>1584 B</b>                    |

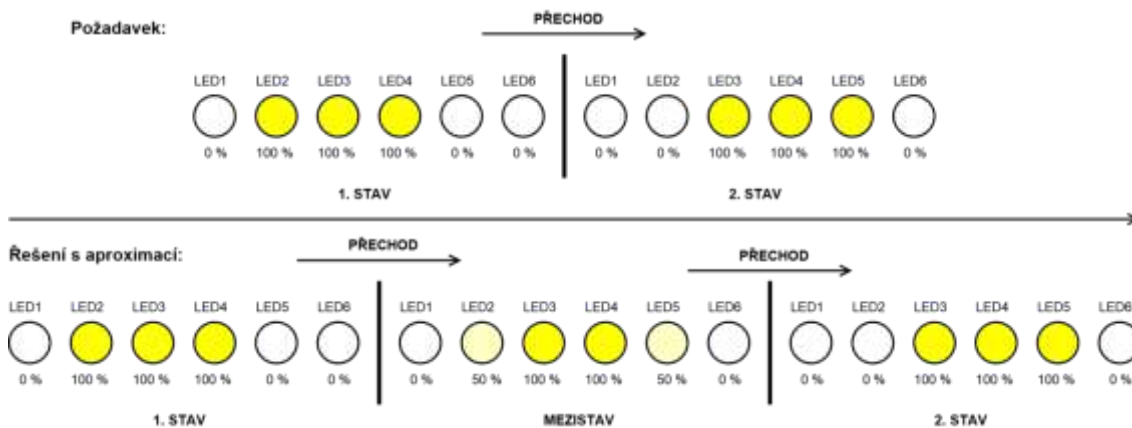


Jak je vidět, ve většině parametrů vítězí jednodušší algoritmus s konstantním posuvem fáze. Tento algoritmus jistě vyhoví většině aplikací. Přesto ani na pokročilý algoritmus s překrýváním není dobré úplně zanevřít. V případě použití dostatečně výkonného výpočetního prostředku s větší pamětí a při použití nižší dimming frekvence 125 nebo 250 Hz je možné s výhodou pokročilý algoritmus s překrýváním využít a snížit proudové špičky v LED řetězci, čímž by mohlo dojít například ke zlepšení EMC.

## 5.2 Aproximace při pohybu světla

Jednou z hlavních předností idey maticového LED světlometu je možnost pohybu světelného kuželu podle aktuální dopravní situace před automobilem. Maticové LED světlometry vyvíjené v současné době však mají nízký počet LED diod, a tedy „rozlišení“ takového světlometu je velmi nízké. Při pomalém pohybu světla prostým rozsvěcením a zhasínáním jednotlivých LED diod lze okem vidět, jak se rozsvěcují jednotlivé LED diody a světelný kužel se nepohybuje plynule, ale po skocích. Tato situace je znázorněna na Obr. 5.19 nahoře. V jednom kroku došlo k vypnutí LED2 a zapnutí LED5.

Pro vytvoření dojmu plynulého světla je možné použít na pohyb světla aproximaci. Ta je znázorněna na Obr. 5.19 dole. K přechodu mezi prvním a druhým stavem nedojde najednou, jako v horním případě, ale mezi tyto stavy je vložen mezikrok, ve kterém se LED2 a LED5 rozsvítí na 50%, čímž se vytvoří mezistav a dojem plynulejšího přechodu. Tento mezistav je nutné zobrazit vhodně dlouhou dobu. Pro dosažení větší plynulosti je vhodné nepoužívat pouze jeden uvedený mezistav, ale více mezistavů, ve kterých se bude LED2 postupně vypínat a LED5 postupně zapínat.



Obr. 5.19 Pohyb světla bez aproximace (nahore) a s aproximací (dole)

### Lineární aproximace

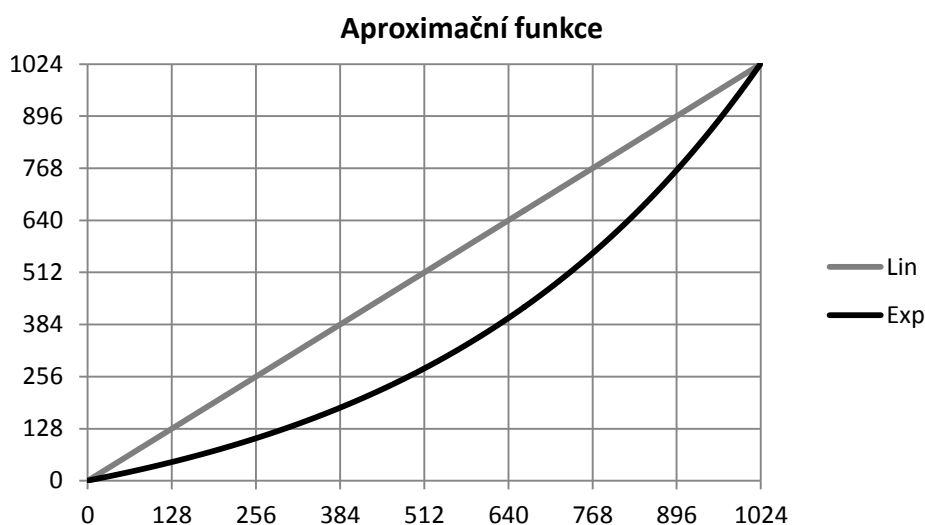
Typ aproximace závisí na použité aproximační funkci. Nejjednodušší na implementaci je použití lineární aproximační funkce (Obr. 5.20). Lineární aproximace byla také použita v ukázce na Obr. 5.19. Jsou zde třeba pouze základní matematické operace, jako je sčítání, odčítání a násobení.

## Exponenciální aproximace

Exponenciální aproximace je sice složitější na výpočet, ale na druhou stranu reflektuje logaritmickou závislost citlivosti lidského oka. Na druhou stranu je každé lidské oko jiné a proto je těžké jej popsat nějakou rovnicí. Používaná exponenciální křivka byla získána empiricky z testů a má následující rovnici.

$$y = \frac{e^{2x}}{6,39} - 0,156; \quad x \in \langle 0|1 \rangle$$

Jak je vidět z Obr. 5.20, lidské oko vyhodnotí 50% intenzity světla v případě, že je vyzařováno pouze asi 25% výkonu.



Obr. 5.20 Aproximační funkce lineární a exponenciální

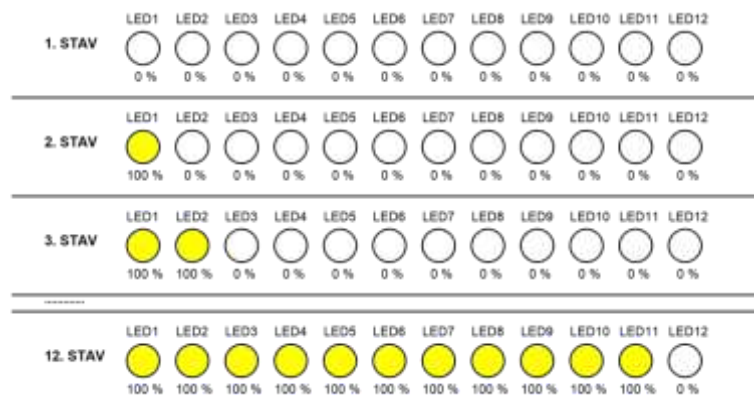
Oba typy aproximace byly naprogramovány implementovány do ovládacího softwaru evaluačního kitu, aby bylo možné je vyzkoušet a porovnat mezi sebou.

## 5.3 Funkce světlometu

Idea maticového LED světlometu počítá s připojenou kamerou, snímající dopravní situaci před vozidlem, a následným vyhodnocováním a nastavením světlometu na základě snímaných dat. Problematika rozpoznávání obrazu z kamery je dost složitá a vysoce převyšuje rámec této diplomové práce, proto byly do evaluačního kitu implementovány následující ukázkové funkce světlometu.

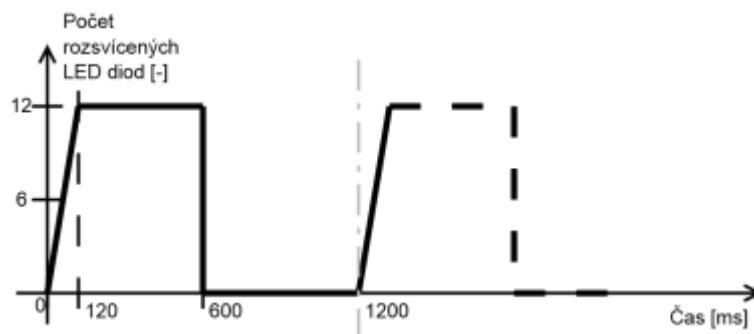
### 5.3.1 Wiping blinker

Aktuálně používané blinkry v automobilech už často používají LED diody místo klasických žárovek, ale stále stejným způsobem, kdy se všechny LED diody najednou zapnou a pak vypnou. Funkci blinkrů složených z LED diod lze vylepšit použitím funkce wiping blinker, která je relativně jednoduchá a je znázorněna na Obr. 5.21.



Obr. 5.21 Ukázka funkce Wiping blinker

Jak je vidět z obrázku, LED diody se postupně rozsvěčují, až se rozsvítí všechny. Poté se všechny vypnou a cyklus začíná zase od začátku. V současné době funkci wiping blinker používá například automobilka Audi ve svém modelu R8 [22] v zadních světlometech. Při použití wiping blinkru je však třeba dodržet časování, které zaručí podobnost se standardním žárovkovým řešením. „Náběžná“ hrana by měla trvat 120 ms, doba sepnutí LED diod 480 ms a doba vypnutí LED diod asi 600 ms. Prodleva mezi sepnutí LED diod vedle sebe je tedy 10 ms pro 12 LED diod. Časování je i znázorněno na Obr. 5.22.



Obr. 5.22 Časování pro funkci wiping blinker

Na ukázkou je zde uveden zdrojový kód z implementace v mikrokontroléru. Jedná se o task, který je spouštěn s frekvencí 50 Hz. Pro jednoduchost je nastavení funkce provedeno globálními proměnnými. Tato funkce využívá lineární aproximaci, popsanou v kapitole 5.2.

```
int wb_counter; // function counter
int wb_start; // begin of rising edge
int wb_stop; // end of rising edge
int wb_per; // period of pattern

__task void wb (void)
{
    float wb_dt = 0; // time difference between
                    // 2 LEDs are ON

    while(1)
```

```

{
    wb_dt = (float)(wb_stop - wb_start)/12.0;

    if (wb_counter >= wb_per)          //counter overflow
        wb_counter = 0;
    else
        wb_counter++;                  // increment counter

    if (wb_counter < wb_start)        // all LEDs OFF
    {
        for (i=0; i<12; i++)
        {
            DCs[i] = 1023;
        }
        j=0;
    }
    else if (wb_counter < wb_stop)     //all LEDs dimmed
    {
        for (i=0; i<12; i++)
        {
            if (wb_counter < (wb_start + i * wb_dt))
                DCs[i] = 1023;
            else if (wb_counter < (wb_start + (i+1)*wb_dt))
                DCs[i] = (wb_start+(i+1)*wb_dt-wb_counter/wb_dt*1023;
            else
                DCs[i] = 0;
        }
    }
    else                                // all LEDs ON
    {
        for (i=0; i<12; i++)
        {
            DCs[i] = 0;
        }
    }
    // send DCs to device

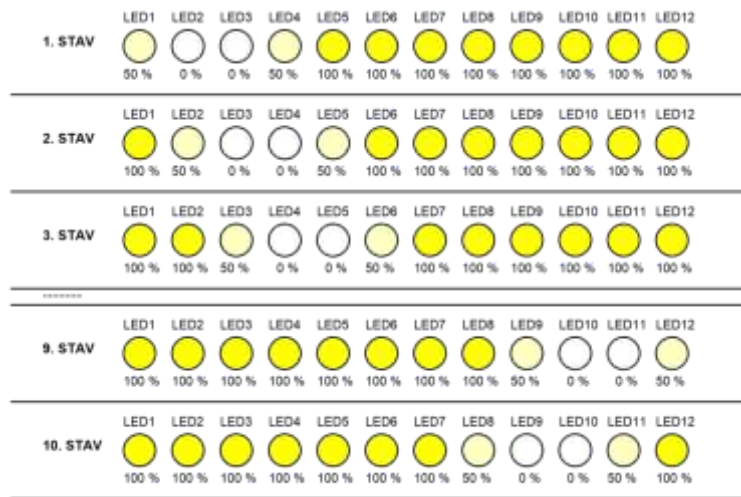
    os_dly_wait(20);

    } // end while(1)
}

```

### 5.3.2 Dark zone

Další ukázková funkce, která byla do evaluačního kitu implementována, se nazývá dark zone. Jak už název vypovídá, ve světelném kuželu reflektoru se nachází tmavá oblast, v níž světlo nesvítí, nebo svítí méně. Tmavá oblast se navíc pohybuje v rámci kuželu světlometu rovnoměrně ze strany na stranu. Ukázku lze vidět na Obr. 5.23.



Obr. 5.23 Ukázka funkce dark zone

Pro lepší efekt při nižších rychlostech pohybu tmavé zóny byla do funkce implementována lineární aproximace, popsaná v kapitole 5.2. Ukázka zdrojového kódu tasku, který je implementován v mikrokontroléru evaluačního kitu je zde uvedena.

```

int dz_gap; // size of dark zone
int dz_per; // period of dark zone movement
int dz_counter; // function counter

__task void dz (void)
{
    float edge = 0; // first edge of dark zone
    uint8_t dir = 1; // direction of move
                    (LED1->LED12 = 1), (LED12->LED1 = 0)
    while(1)
    {
        if (dz_counter >= dz_per) //counter overflow at LED12,
                                   change direction
        {
            dir = 0;
            dz_counter--;
        }
        else if (dz_counter <= 0) // counter overflow at LED1,
                                   change direction
        {
            dir = 1;
            dz_counter++;
        }
        else if (dir == 1) // increment counter when dir = 1
            dz_counter++;
        else // decrement counter when dir = 0
            dz_counter--;

        edge = dz_counter / (float)dz_per * (12.0 + dz_gap);
                // compute first edge of dark zone

        for (i = 0; i < 12; i++) // set brightness of LED according
                                   to move of dark zone
        {
            if(edge <= i) // LED ON

```

```

        DCs[i] = 0;
    else if ((edge > i) && (edge <= (i + 1))) // falling slope
        DCs[i] = (edge - i) * 1023;
    else if ((edge > (i+1)) && ((edge - dz_gap) <= i)) // LED OFF
        DCs[i] = 1023;
    else if (((edge - dz_gap) > i) && ((edge - dz_gap) <= (i+1))) // rising slope
        DCs[i] = (i + 1 - (edge - dz_gap)) * 1023;
    else // LED ON
        DCs[i] = 0;
}

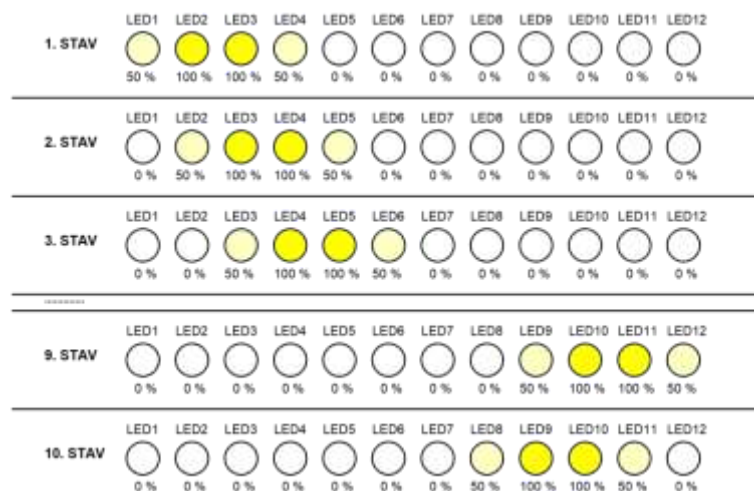
// send DCs to device

os_dly_wait(20);
} // end while(1)
}

```

### 5.3.3 Bending light

Poslední ukázková funkce, která byla implementována do evaluačního kitu, se nazývá bending light. Jedná se prakticky o totožnou funkci, jako dark zone, pouze s rozdílem, že svítí LED diody je invertovaný. Svítí tedy jen malá část LED diod, zbylé okolí nikoli. Svítící část LED diod se navíc pohybuje, čímž simuluje pohyb světelného kuželu při použití statického světlometu. Ukázka této funkce je vyobrazena na Obr. 5.24.



Obr. 5.24 Ukázka funkce bending light

Vzhledem k tomu, že zdrojový kód je prakticky totožný s funkcí dark zone, pouze s jinými hodnotami, není zde uveden. Přesto je možné jej nalézt ve zdrojovém kódu firmwaru mikrokontroléru.

## 6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce pojednává o novém trendu maticových LED světlometů v automobilech, které se začínají pomalu objevovat v reálném provozu a pro které společnost ON Semiconductor vyvíjí své vlastní řešení řízení v podobě integrovaných obvodů.

První část této práce byla věnovaná popisu maticového LED světlometu, ve které byly představeny různé možnosti konstrukce, které již používají současní výrobci, a také stávající a nové funkce světlometu, které je možné díky použití maticového LED světlometu implementovat. Zároveň zde bylo popsáno řešení řízení LED diod pomocí integrovaného budiče společnosti ON Semiconductor.

V rámci této práce byl navrhnout evaluační kit, sloužící k prezentaci integrovaného budiče zákazníkům. Navrhnutý kit se z důvodu větší univerzality skládá ze tří desek plošných spojů, první deska s integrovaným budičem, druhá s LED diodami a třetí s mikrokontrolérem. Softwarová část byla částečně převzata z předchozí diplomové práce navrhuující proudový zdroj, protože je tento proudový zdroj využíván. Tato softwarová část pro počítač byla upravena a rozšířena o podporu evaluačního kitu. Firmware pro mikrokontrolér byl vytvořen nový, běžící na operačním systému reálného času RTX. Ve výsledku je evaluační kit plně funkční.

Součástí práce je měření integrovaného budiče a evaluačního kitu. Měření evaluačního kitu bylo zaměřeno hlavně na teploty desek v reálném provozu za nejhorších podmínek.

Poslední část práce se zabývala algoritmy pro řízení LED diod pomocí integrovaného budiče, tedy dimming algoritmy, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování intenzity generovaného světla jednotlivých LED diod. Ve výsledku vznikly dvě funkční verze, z nichž každá má své výhody a nevýhody, které byly následně porovnány z hlediska funkčnosti, náročnosti na hardwarové prostředky a rychlosti běhu algoritmu. Obě verze jsou použitelné v reálném prostředí, každá z verzí je však vhodná do jiného prostředí s jinými podmínkami. Práci završuje část věnovaná aproximacím při pohybu světla a ukázkovým funkcím.

# LITERATURA

- [1] DECLOEDT, P., AICHRIEDLER, L. LED Pixel Light Revolutionizes Automotive Front Lighting. In: [online]. 2013 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://electronicdesign.com/components/led-pixel-light-revolutionizes-automotive-front-lighting>
- [2] FIDALGO, R. El Ford Mondeo 2015 estrena faros LED. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://www.autocasion.com/actualidad/novedades/162616/el-ford-mondeo-2015-en-el-festival-starlite-de-marbella/>
- [3] KINKOR, O. Citroën DS: Dědeček, který to natře i mladíkům. In: [online]. 2009 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/citroen-ds-dedecek-ktery-to-natre-i-mladikum-fz0-/auto\\_ojetiny.aspx?c=A090129\\_173652\\_auto\\_ojetiny\\_fdv](http://auto.idnes.cz/citroen-ds-dedecek-ktery-to-natre-i-mladikum-fz0-/auto_ojetiny.aspx?c=A090129_173652_auto_ojetiny_fdv)
- [4] HELLA, Group. Matrix LED system by HELLA. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xYSix5r38qY>
- [5] BIRCH, S. Audi, Hella team on production matrix LED headlights for new A8. In: [online]. 2013 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://articles.sae.org/12579/>
- [6] OSRAM, GmbH. OSRAM Matrix Light-Modul. In: [online]. 2013 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://www.osram.de/osram\\_de/tools-und-service/services/events/isal-2013/ausstellungen-am-osram-messestand-auf-der-isal-2013/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/tools-und-service/services/events/isal-2013/ausstellungen-am-osram-messestand-auf-der-isal-2013/index.jsp)
- [7] OSRAM, GmbH. OSRAM Original line: Halogen headlight lamps for cars. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://www.osram.de/osram\\_de/tools-und-service/services/events/isal-2013/ausstellungen-am-osram-messestand-auf-der-isal-2013/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/tools-und-service/services/events/isal-2013/ausstellungen-am-osram-messestand-auf-der-isal-2013/index.jsp)
- [8] JANČAR, D. Osvítí a neoslíní. Zkusili jsme světla aut zítřka, nejlepší je laser. In: [online]. 2013 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/svetla-aut-nova-technologie-dpy-/automoto.aspx?c=A130915\\_174446\\_tec\\_tecnika\\_rja](http://auto.idnes.cz/svetla-aut-nova-technologie-dpy-/automoto.aspx?c=A130915_174446_tec_tecnika_rja)
- [9] VIJAYENTHIRAN, V. Mercedes To Debut MULTIBEAM LED Headlight Technology On 2015 CLS-Class. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://www.motorauthority.com/news/1092745\\_mercedes-to-debut-multibeam-led-headlight-technology-on-2015-cls-class](http://www.motorauthority.com/news/1092745_mercedes-to-debut-multibeam-led-headlight-technology-on-2015-cls-class)
- [10] DAIMLER, AG. Mercedes-Benz TV: The new MULTIBEAM LED lighting technology. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=UPHd6S\\_4180](https://www.youtube.com/watch?v=UPHd6S_4180)
- [11] ON SEMICONDUCTOR. Product Preview NCV78247: Series string pixel controller for automotive frontlightning. 2014.
- [12] MAXIM INTEGRATED. Glossary definition for exposed pad. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/en/glossary/definitions.mvp/term/Exposed%20Pad/gpk/488>
- [13] ARDUINO.CC: Arduino Micro. [online]. 2014 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMicro>
- [14] NXP SEMICONDUCTORS NETHERLANDS N.V. LPC408X\_7X: User manual. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/LPC408X\\_7X.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC408X_7X.pdf)



- [15] CHRISTEN, J. Budič světlometů s LED diodami. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 91 s., 15 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Matoušek, Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.
- [16] ON SEMICONDUCTOR. Target Requirement Specification NCV78703: Multiphase booster LED driver for automotive front lighting. 2014.
- [17] ON SEMICONDUCTOR. Target Requirement Specification NCV78723: High efficient buck dual LED driver with integrated current sensing for automotive front lighting. 2014.
- [18] NXP SEMICONDUCTORS NETHERLANDS N.V. LPC408X\_7X: Product data sheet. In: [online]. 2014 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/LPC408X\\_7X.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC408X_7X.pdf)
- [19] FISCHER ELEKTRONIK GMBH & CO. KG. Standard extruded headsinks: SK 47/75 SA. In: [online]. [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/17533.pdf>
- [20] WAGO KONTAKTTECHNIK GMBH & CO. KG. 2061 series: Technical data. In: [online]. [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1859065.pdf>
- [21] ANALOG DEVICES, INC. ADuM4400/ADuM4401/ADuM4402: Data Sheet. In: [online]. 2012 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADuM4400\\_4401\\_4402.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADuM4400_4401_4402.pdf)
- [22] AUTOMANN-TV. 2013 Audi R8 Facelift 4.2 FSI Spyder – In Detail. [online]. 2012 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=XCXgfri6EiI>
- [23] HÁJEK, Rudolf. ON SEMICONDUCTOR. L247 dimming algorithm: Fixed phase shift. Brno, 2014, s. 9.
- [24] KELBICH, Jan. ON SEMICONDUCTOR. Report of possible solution for the control algorithm of the L247 chip for pixel-light dimming. Brno, 2014, s. 4.
- [25] FREČER, Petr. ON SEMICONDUCTOR. L247 dimming algorithm summary. Brno, 2014, s. 7
- [26] KOSTELNÍK, Pavel. Řízení pixel light controller kitu. [online]. 2015 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MPOA/2014/pixel-light>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

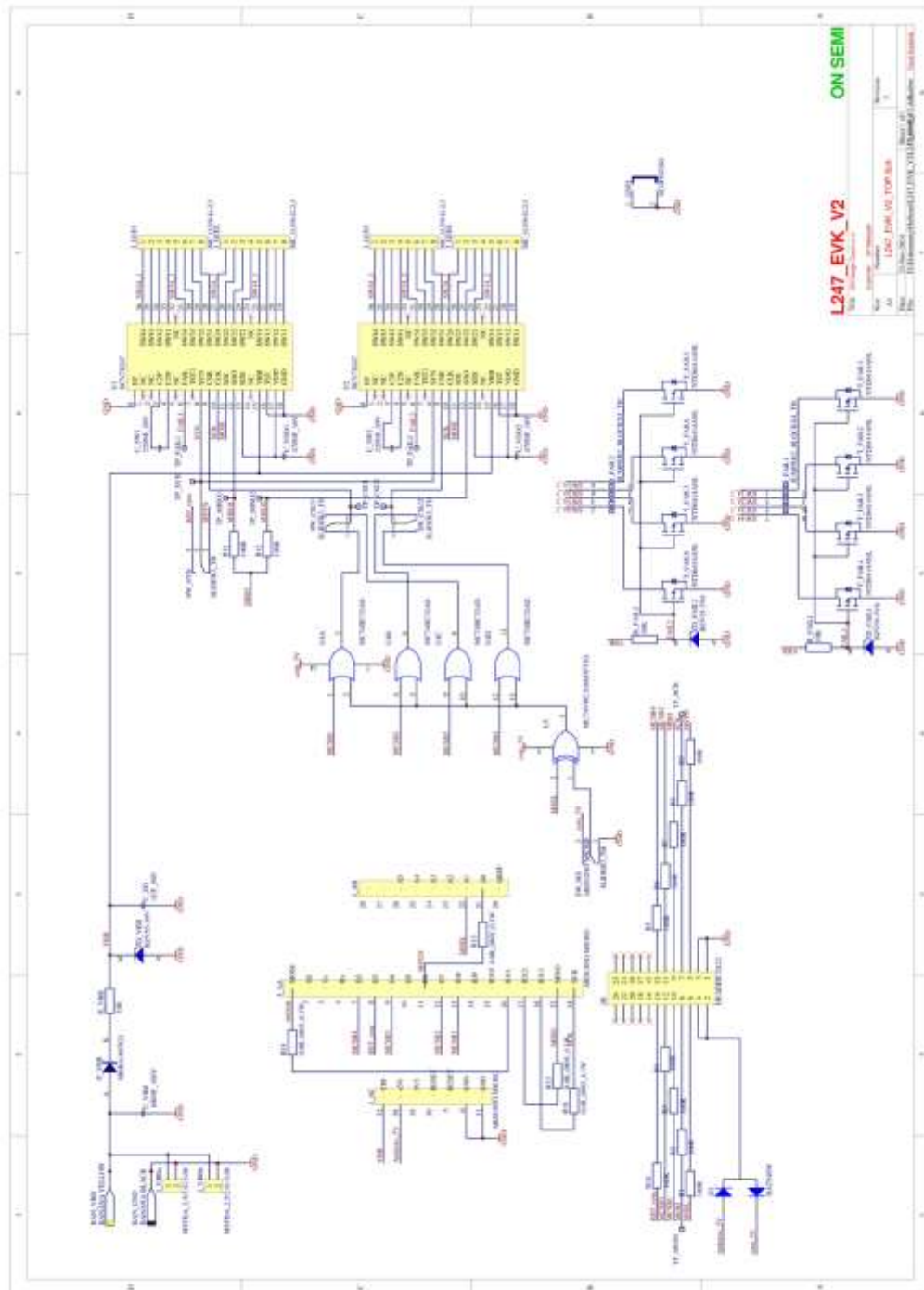
|            |                              |
|------------|------------------------------|
| $I_{LED}$  | Proud LED řetězcem           |
| $I_c$      | Celkový proud                |
| $I_{LED}$  | Proud LED řetězcem           |
| $I_{max}$  | Maximální proud LED řetězcem |
| $I_{SWx}$  | Proud spínačem x             |
| $P_{celk}$ | Celkový ztrátový výkon       |

|              |  |
|--------------|--|
| $P_{obv}$    | Ztrátový výkon vlastního obvodu  |
| $P_{tranz}$  | Ztrátový výkon na spínacích tranzistorech  |
| $R_{DS(ON)}$ | Odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu  |
| $U_{bat}$    | Napětí na baterii  |
| $U_{SWx}$    | Napětí na spínači x  |
| $V_{BAT}$    | Napětí na baterii  |
| $V_{BOOST}$  | Napětí na výstupu zvyšujícího měniče   |
|              |  |
| EVK          | Evaluační kit  |
| GPIO         | General purpose input/output, vstupní/výstupní pin   |
| GUI          | Graphical User Interface, grafické uživatelské rozhraní  |
| ISAL         | International Symposium of Automotive Lightning, Mezinárodní konference automobilového osvětlení |
| LED          | Light-Emitting Diode, světlo vyzařující dioda  |
| LSB          | Least Significant Bit, nejméně významný bit  |
| MCU          | Microcontroller Unit, mikrokontrolérová jednotka   |
| MISO         | Master Input Slave Output, komunikace směr Slave -> Master                                       |
| MOSI         | Master Output Slave Input, komunikace směr Master -> Slave                                       |
| MSB          | Most Significant Bit, nejvíce významný bit   |
| OFF          | vypnuto  |
| ON           | zapnuto  |
| PID          | Product Identification, identifikace produktu  |
| PWM          | Pulse Width Modulation, pulsně-šířková modulace  |
| SCK          | Serial Clock, hodinový signál  |
| SPI          | Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní  |
| SS           | Slave Select, signál výběru podřízeného zařízení   |
| SSEL         | Slave Select, signál výběru podřízeného zařízení   |
| SSP          | Synchronous Serial Port, synchronní sériový port   |
| SWD          | Serial Wire Debug, rozhraní pro ladění aplikace  |
| SWx          | Switch x, Spínač x   |
| SYN          | Synchronizační pin   |
| TR           | Transition Vector, vektor prodloužení  |
| RTOS         | Real-Time Operating System, operační systém reálného času  |

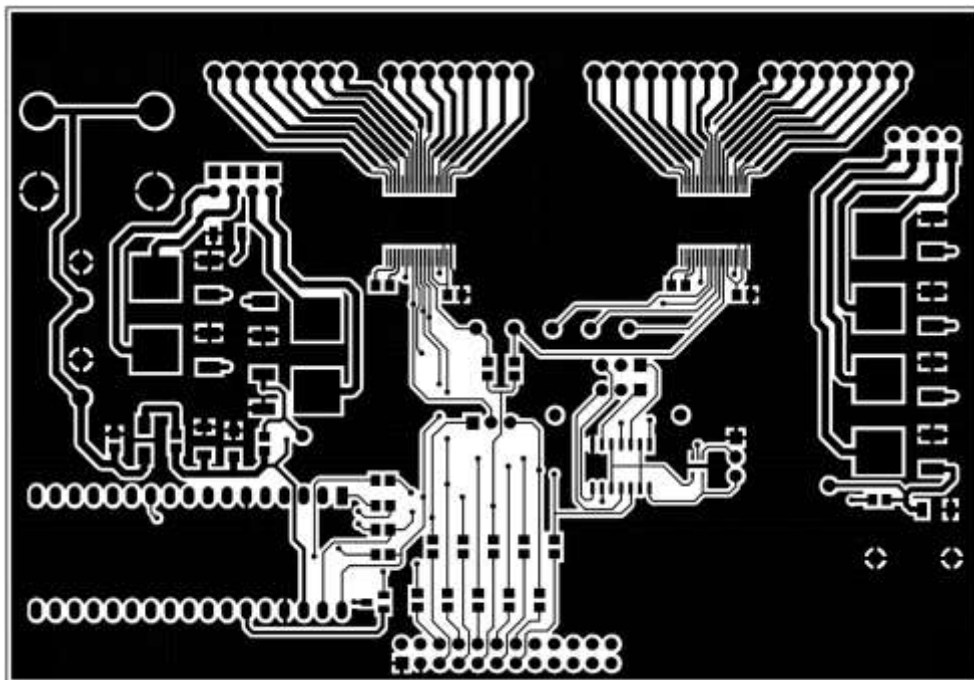
|      |   |
|------|---|
| UART | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter,<br>univerzální asynchronní rozhraní pro komunikaci |
| USB  | Universal Serial Bus, univerzální sériové rozhraní  |
| VID  | Vendor Identification, identifikace dodavatele  |
| EMC  | Electromagnetic Compatibility, elektromagnetická kompatibilita                                  |
| DC   | Duty-Cycle, střída  |
| KPF  | algoritmus s konstantním posuvem fáze   |
| PSP  | pokročilý algoritmus s překrýváním  |

# A PODKLADY K DESCE PLOŠNÉHO SPOJE K EVALUAČNÍ DESKY

## A.1 Obvodové zapojení evaluační desky

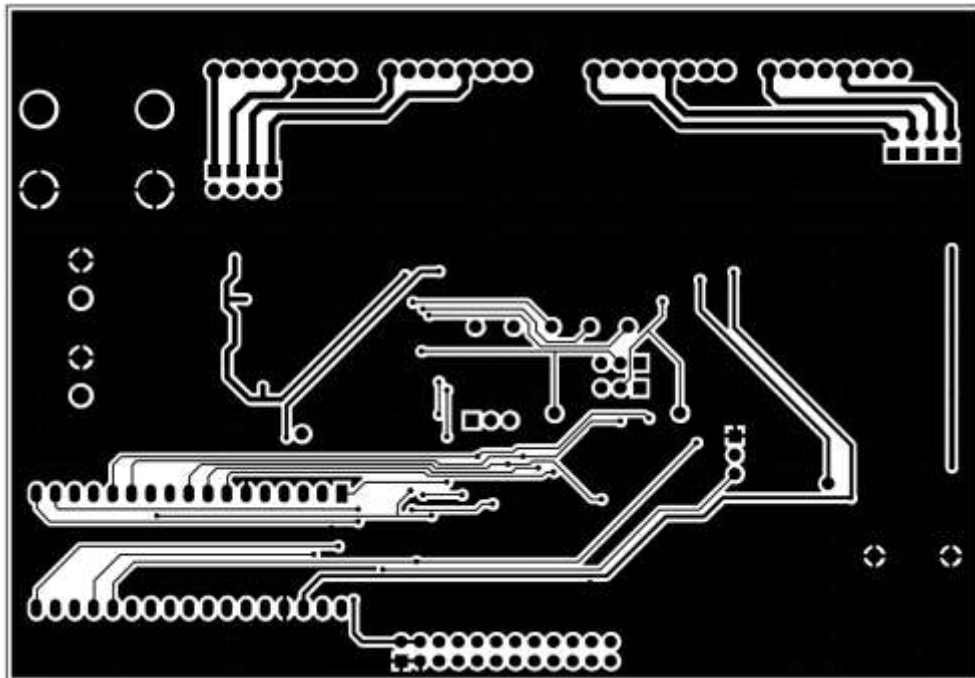


**A.2 Deska plošného spoje evaluační desky– top (strana součástek)**



Rozměr desky 130 x 90 [mm], měřítko M1:1

### A.3 Deska plošného spoje evaluační desky– bottom (strana spojů)



Rozměr desky 130 x 90 [mm], měřítko M1:1

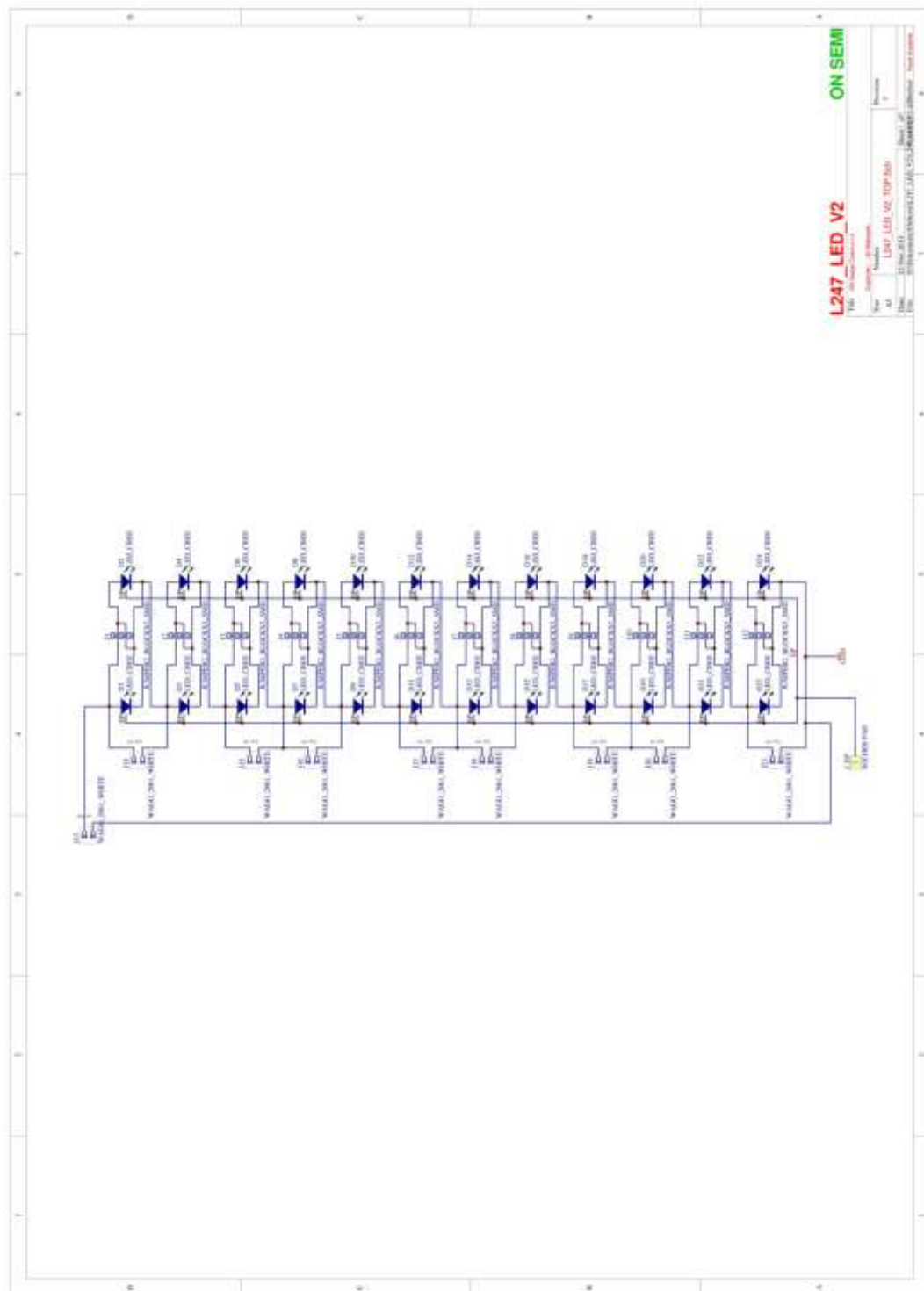
### A.4 Seznam součástek evaluační desky

| Označení    | Hodnota            | Pouzdro       | Popis            |
|-------------|--------------------|---------------|------------------|
| BAN_GND     | BANANA BLACK       | BANANA_BLACK  | Konektor         |
| BAN_VBB     | BANANA YELLOW      | BANANA_YELLOW | Konektor         |
| C_SW1 – 2   | 220 nF / 50V       | CAP0805       | Ker. kondenzátor |
| C_VBB       | 100 nF / 100V      | CAP0805       | Ker. kondenzátor |
| C_VDD1 – 2  | 470 nF / 16V       | CAP0805       | Ker. kondenzátor |
| C_ZD        | 1 uF / 50V         | CAP1206       | Ker. kondenzátor |
| D_VBB       | MBRA160TG3         | SMA           | Schottkyho dioda |
| D1          | BAT54SW            | SOT23         | Dvojitá dioda    |
| GND         | SCOPEGND           | SCOPEGND      | Vývod pro zem    |
| J_A         | ARDUINO MICRO      | ARDUINO MICRO | Drátový rezistor |
| J_FAIL1 – 2 | JUMPER2_BLOCKX4_TH | X8ABPH        | Pole propojek    |
| J_LED1 – 4  | MC_0,5/8-G-2,5     | 8X2,5MMHOR    | Konektor         |
| J_VBBa      | MSTBA_2,5/2-G-5,08 | 2X5.08MMHOR   | Konektor         |

|              |                    |              |                   |
|--------------|--------------------|--------------|-------------------|
| J_VBBb       | MSTBA_2,5/2-G-5,08 | 2X5.08MMHOR  | Konektor          |
| JH           | HEADER 2X12        | X24ABPH      | Konektor          |
| R_FAIL1 – 2  | 10 K               | R0805        | Rezistor          |
| R_VBB        | 33 R               | R0805        | Rezistor          |
| R1 – R12     | 100 R              | R0805        | Rezistor          |
| R13 – R16    | 0 R                | R0805        | Rezistor          |
| SW_CSU1 – 2  | SLIDER3_TH         | X3APH-SLIDER | Přepínač          |
| SW_MS        | SLIDER3_TH         | X3APH-SLIDER | Přepínač          |
| SW_SYN       | SLIDER3_TH         | X3APH-SLIDER | Přepínač          |
| T_FAIL1 – 8  | NTD6414ANL         | DPACK-369AA  | MOSFET tranzistor |
| U1 – U2      | NCV78247           | SSOP36       | Budič LED diod    |
| U3           | MC74VHC1G86DTT1G   | SC70         | Logický člen XOR  |
| U4           | MC74HC32AD         | SOIC14       | Logický člen 4xOR |
| ZD_FAIL1 – 2 | BZV55-5V6          | SOD80        | Zenerová dioda    |
| ZD_FAIL2     | BZV55-5V6          | SOD80        | Zenerová dioda    |
| ZD_VBB       | BZV55-39V          | SOD80        | Zenerová dioda    |

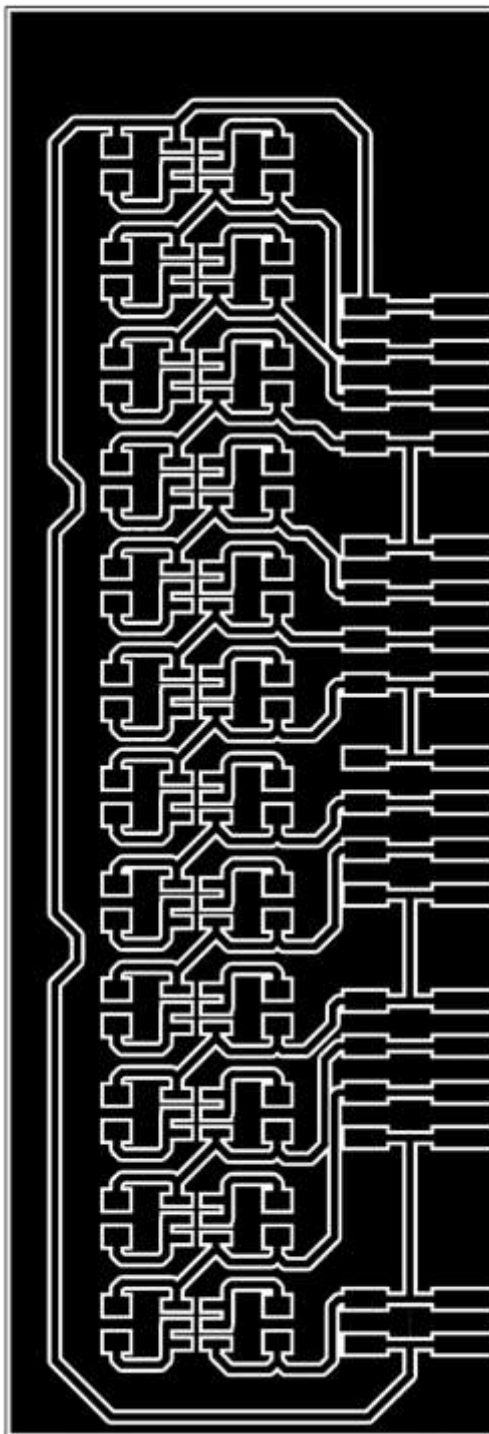
# B PODKLADY K DESCE PLOŠNÉHO SPOJE LED DESKY

## B.1 Obvodové zapojení LED desky





**B.2 Deska plošného spoje LED desky – top (strana součástek)**



Rozměr desky 190 x 65 [mm], měřítko M1:1

### **B.3 Deska plošného spoje LED desky – bottom (strana spojů)**



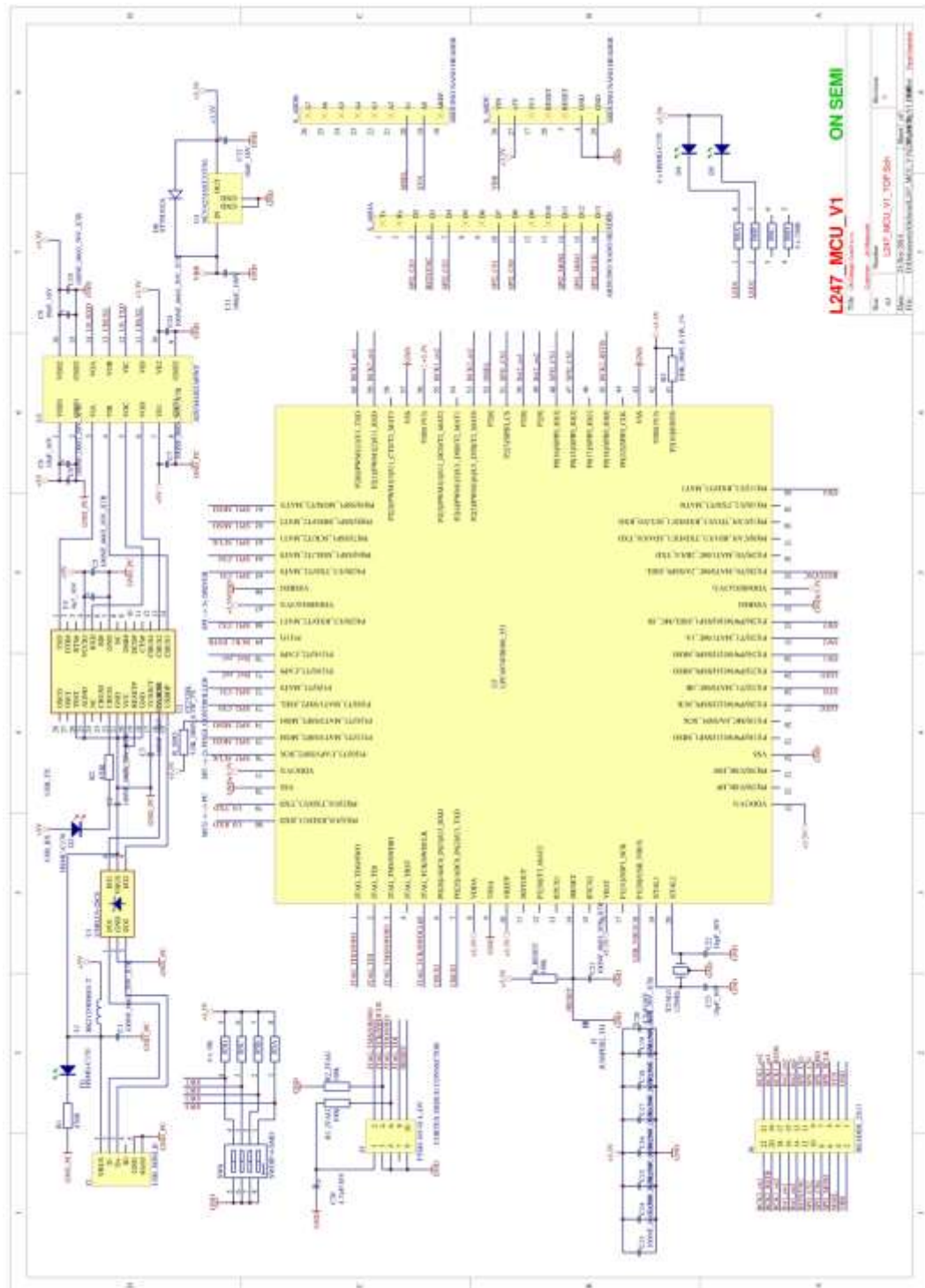
Rozměr desky 190 x 65 [mm], měřítko M1:1

## B.4 Seznam součástek LED desky

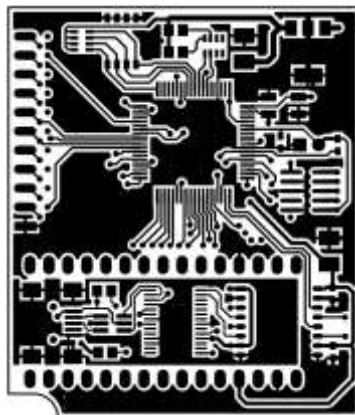
| Označení  | Hodnota                  | Pouzdro          | Popis            |
|-----------|--------------------------|------------------|------------------|
| D1 – D24  | LED, 1,5A, Neutral White | LED_CREE_3.3X3.3 | Bílá LED dioda   |
| J1 - J12  | JUMPER2_BLOCKX3_SMD      | X6ABPH_SMD       | SMD Pinová lišta |
| J13 – J21 | WAGO 2061 x 2 WHITE      | WAGO_2061        | Konektor Wago    |

# C PODKLADY K MCU DESCE PLOŠNÉHO SPOJE

## C.1 Obvodové zapojení mikrokontrolérové desky

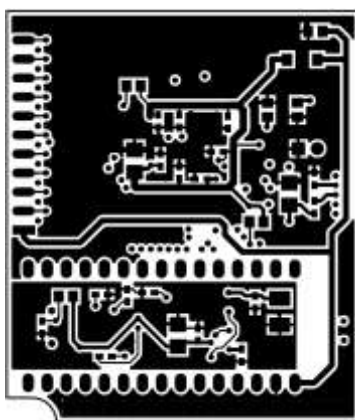


## C.2 Deska plošného spoje MCU desky – top (strana součástek)



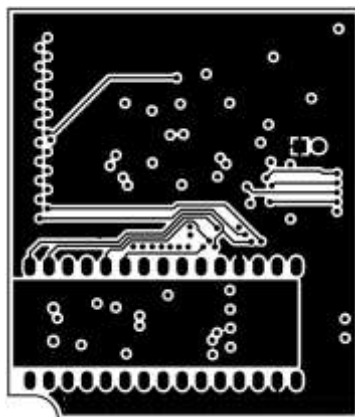
Rozměr desky 55 x 47 [mm], měřítko M1:1

## C.3 Deska plošného spoje MCU desky – bottom (strana spojů)



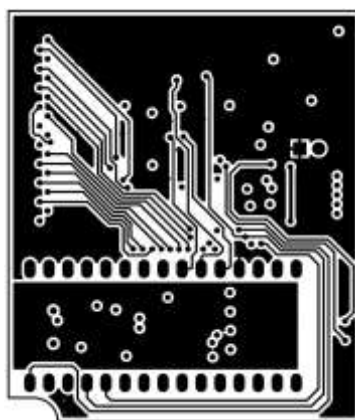
Rozměr desky 55 x 47 [mm], měřítko M1:1

#### C.4 Deska plošného spoje MCU desky – Mid1 (První vnitřní vrstva)



Rozměr desky 55 x 47 [mm], měřítko M1:1

#### C.5 Deska plošného spoje MCU desky – Mid2 (Druhá vnitřní vrstva)



Rozměr desky 55 x 47 [mm], měřítko M1:1

#### C.6 Seznam součástek MCU desky

| Označení | Hodnota          | Pouzdro  | Popis             |
|----------|------------------|----------|-------------------|
| C1 – C3  | 100 nF / 50V X7R | CAP0603  | Ker. kondenzátor  |
| C4       | 4u7 / 16V        | SMB      | Tant. kondenzátor |
| C5 – C7  | 100 nF / 50V X7R | CAP0603  | Ker. kondenzátor  |
| C8 – C9  | 10uF / 16V       | AVX_TAJB | Tant. kondenzátor |

|           |                     |                     |                     |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| C10       | 100 nF / 50V X7R    | CAP0603             | Ker. kondenzátor    |
| C11       | 100nF / 100V        | CAP0805             | Ker. kondenzátor    |
| C12       | 10uF / 16V          | AVX_TAJB            | Tant. kondenzátor   |
| C13 – C19 | 100 nF / 50V X7R    | CAP0603             | Ker. kondenzátor    |
| C20       | 4.7uF / 16V         | SMB                 | Tant. kondenzátor   |
| C21       | 100 nF / 50V X7R    | CAP0603             | Ker. kondenzátor    |
| C22 - C23 | 18pF / 50V          | CAP0805             | Ker. kondenzátor    |
| C24       | 100 nF / 50V X7R    | CAP0603             | Ker. kondenzátor    |
| C30       | 4.7uF / 16V         | SMB                 | Tant. kondenzátor   |
| D1        | HSMG-C170           | D0805               | Zelená LED dioda    |
| D2        | HSMC-C170           | D0805               | Červená LED dioda   |
| D4        | HSMG-C170           | D0805               | Zelená LED dioda    |
| D8        | STTH102A            | SMA                 | Schottkyho dioda    |
| J2        | USB_MINI_B          | USB_MINI_B          | USB Mini konektor   |
| J4        | FTSH-105-01-L-DV    | CON2X5_1.27MM       | Konektor            |
| J5        | JUMPER2_TH          | X2APH               | Zkratovací propojka |
| J6        | HEADER_2X11         | X22ABPH_HOR         | Konektor            |
| L1        | BK2125HM601-T       | L0805               | Cívka               |
| R_RESET   | 100 K               | R0603               | Rezistor            |
| R_SDO     | 3 K                 | R0805               | Rezistor            |
| R1        | 470 R               | R0603               | Rezistor            |
| R1_JTAG   | 100 K               | R0603               | Rezistor            |
| R2        | 470 R               | R0603               | Rezistor            |
| R2_JTAG   | 100 K               | R0603               | Rezistor            |
| R3        | 100 K               | R0805               | Rezistor            |
| R5        | 4 x 10 K            | CRA3A4E             | Rezistorové pole    |
| R6        | 4 x 150 R           | CRA3A4E             | Rezistorové pole    |
| SW0       | SWDIP-4-SMD         | DIL8_SMD            | Přepínač            |
| U1        | USBLC6-2SC6         | SOT23-6L            | ESD Ochrana         |
| U2        | FT232RL             | SSOP28              | USB-UART převodník  |
| U3        | ADUM4402ARWZ        | SOIC16              | Izolátor            |
| U4        | NCV4274AST33T3G     | SOT223              | Stabilizátor        |
| U5        | LPC4074FBD80_551    | LQFP80              | Mikrokontrolér      |
| X_ARD     | ARDUINO NANO HEADER | 30 x 2 x 2,54       | Konektor            |
| XTAL0     | 12 MHz              | EUROQUARZ_3.2X5.0MM | Krystal             |

# D KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL

## D.1 Část 1/2

| Komunikace: PC → MCU |   |              |  |          |  |          |   |
|----------------------|---|--------------|--|----------|--|----------|---|
| 1. rámec             | Popis                                     | 2. rámec     | Popis  | 3. rámec | Popis  | 4. rámec | Popis   |
| 0x01                 | SPI komunikace                            | 0x0?         | První 3 bity určují, se kterým obvodem se bude komunikovat:<br>000 - Boost<br>001 - Buck A<br>010 - Buck B<br>011 - NCV78247 A<br>100 - NCV78247 B<br><br>4. bit určuje operaci R/W<br>0 - read<br>1 - write | 0x??     | Adresa SPI registru  | 0x??     | V případě zápisu tento rámec obsahuje data:<br>0) NCV7870x - prvních 8 bitů z 10<br>1) NCV78247 - 1. byte dat |
| 0x02                 | Ovládací signál ENABLE                    | 0x01<br>0x02 | ENABLE → 1<br>ENABLE → 0   |          |  |          |   |
| 0x03                 | Ovládací signál BISTSYNC                  | 0x01<br>0x02 | BISTSYNC → enable<br>BISTSYNC → disable  | 0x??     | První informace o kmitočtu - 1. byte   | 0x??     | První informace o kmitočtu - 2. byte  |
| 0x04                 | Ovládací signál LEDCTRL                   | 0x0?         | První 4 bity určují, který LEDCTRL bude zapnutý/vypnutý<br>1. bit LEDCTRL_1A<br>2. bit LEDCTRL_2A<br>3. bit LEDCTRL_1B<br>4. bit LEDCTRL_2B<br>1 → zapnutý<br>0 → vypnutý                                    | 0x??     | První informace o kmitočtu → 1. byte   | 0x??     | První informace o kmitočtu → 2. byte  |
| 0x05                 | Ovládací signál FSO/TSF2                  | 0x01<br>0x02 | FSO/TSF2 → 1<br>FSO/TSF2 → 0   |          |  |          |   |
| 0x06                 | Ovládací signál RSTB                      | 0x01<br>0x02 | RSTB → 1<br>RSTB → 0   |          |  |          |   |
| 0x07                 | Dotaz na ID desky                         |              |  |          |  |          |   |
| 0x08                 | První jsou všechny LED diody pomocí třídy | 0x0?         | Číslový obvod<br>0011 - NCV78247 A<br>0100 - NCV78247 B  | 0x??     | $[(DCs[0] \gg 2)]$   | 0x??     | $[(DCs[0] \ll 6) + (DCs[1] \gg 4)] \& 0xFF$   |
|                      |   | 0x??         | $[(DCs[5] \ll 4) + (DCs[6] \gg 5)] \& 0xFF$  | 0x??     | $[(DCs[6] \ll 2) + (DCs[7] \gg 8)] \& 0xFF$                                    | 0x??     | $[(DCs[7] \ll 4) + (DCs[2] \gg 6)] \& 0xFF$   |
| 0x09                 | Wiring blinker                            | 0x??         | 0xyy0000xx<br>xx - Číslový obvod + 3<br>yy - 0 = start, 2 = stop   | 0x??     | Start cas  | 0x??     | Stop cas  |
| 0x0A                 | Dark zone                                 | 0x??         | 0xyy0000xx<br>xx - Číslový obvod + 3<br>yy - 0 = start, 2 = stop   | 0x??     | Počet zhasnutých LED   | 0x??     | Číslo periody   |
| 0x0B                 | Bleeding light                            | 0x??         | 0xyy0000xx<br>xx - Číslový obvod + 3<br>yy - 0 = start, 2 = stop   | 0x??     | Počet zhasnutých LED   | 0x??     | Číslo periody   |
| Komunikace: MCU → PC |   |              |  |          |  |          |   |
| 1. rámec             | Popis                                     | 2. rámec     | Popis  | 3. rámec | Popis  | 4. rámec | Popis   |
| 0x01                 | SPI komunikace                            | 0x0?         | První 3 bity určují, se kterým obvodem se bude komunikovat:<br>000 - Boost<br>001 - Buck A<br>010 - Buck B<br>011 - NCV78247 A<br>100 - NCV78247 B<br><br>4. bit určuje operaci R/W<br>0 - read<br>1 - write | 0x??     | 0) NCV7870x - nčti byte SPI rámce<br>1) NCV78247 - 1. byte SPI rámce [nejméně] | 0x??     | 0) NCV7870x - vyšší byte SPI rámce<br>1) NCV78247 - 2. byte SPI rámce   |
| 0x07                 | Odesílání ID desky                        | 0xAA         | ID = 0b0101010 (170 des)   |          |  |          |   |



## D.2 Část 2/2

| Komunikace: PC → MCU                      |             |   |             |  |             |   |             |   |
|---|-------------|---|-------------|--|-------------|---|-------------|---|
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| SPI komunikace                            | 0x??        | V případě zápisu do MCV78247 tento rámeček obsahuje 3. byte dat |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Ovládání signálu ENABLE                   |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Ovládání signálu BSTSYNC                  |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Ovládání signálu LEDCTRL                  | 0x??        | Informace o střídě → LEDCTRL_1A                                 | 0x??        | Informace o střídě → LEDCTRL_2A              | 0x??        | Informace o střídě → LEDCTRL_1B               | 0x??        | Informace o střídě → LEDCTRL_2B             |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Ovládání signálu FSO/TST2                 |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Ovládání signálu RSTB                     |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Dotaz na ID desky                         |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Rizem jsou všech LED diod pomocí střídely | 0x??        | $((DCs[2] \ll 2) + (DCs[3] \gg 8)) \& 0xFF$                     | 0x??        | $(DCs[3] \& 0xFF)$                           | 0x??        | $(DCs[4] \gg 2)$                              | 0x??        | $((DCs[4] \ll 6) + (DCs[5] \gg 4)) \& 0xFF$ |
|   | 14. rámeček | Popis   | 15. rámeček | Popis  | 16. rámeček | Popis   | 17. rámeček | Popis                                       |
|   | 0x??        | $((DCs[8] \ll 6) + (DCs[9] \gg 4)) \& 0xFF$                     | 0x??        | $((DCs[9] \ll 4) + (DCs[10] \gg 6)) \& 0xFF$ | 0x??        | $((DCs[10] \ll 2) + (DCs[11] \gg 8)) \& 0xFF$ | 0x??        | $(DCs[11] \& 0xFF)$                         |
| Popis                                     | 8. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Wiping blinker                            |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Dark zone                                 |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Bending light                             |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Komunikace: MCU → PC                      |             |   |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| SPI komunikace                            | 0x??        | MCV78247 - 4. byte SPI rámce                                    |             |  |             |   |             |   |
| Popis                                     | 6. rámeček  | Popis   | 7. rámeček  | Popis  | 8. rámeček  | Popis   | 9. rámeček  | Popis                                       |
| Odeslán ID desky                          |             |   |             |  |             |   |             |   |