



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NUMERICKÁ KLÁVESNICE

NUMERIC KEYBOARD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Hladký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2020



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Pavel Hladký

ID: 186428

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Numerická klávesnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce navrhnete a realizujete USB numerickou klávesnici s RGB podsvícením. Prostudujte možnosti realizace klávesnice, provedte návrh a výběr jednotlivých komponentů s ohledem na rychlost a odezvu stisku kláves. Zaměřte se na volbu snímačů a realizaci výstupního driveru. Zvláštní pozornost věnujte softwaru pro řízení podsvícení a nastavení klávesnice. Dosažené parametry ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a vytvořením numerické klávesnice, kterou lze připojit k osobnímu počítači či laptopu skrze USB rozhraní. Tuto klávesnici lze nastavit pomocí aplikace pro operační systém Windows. Součástí aplikace je možnost generovat vlastní motivy podsvícení klávesnice. Teoretická část se zabývá různými typy klávesnic, spínačů, metod pro ošetření zámků mechanických spínačů a bližšímu popisu rozhraní USB. Praktická část se dále věnuje samotnému návrhu obvodu, který detekuje stisknutí kláves a odesílá informace o stisknuté klávese po USB, popisu využitých komponent, obsluhu mikrokontroléru a samotné aplikaci pro generování světelných motivů. V závěru diplomové práce jsou popsány výsledky měření, které byly provedeny pro výběr nejvhodnějších spínačů a pro ověření rychlosti odezvy numerické klávesnice na stisk klávesy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Numerická klávesnice, USB, HID, Maticové snímání, Podsvícení klávesnice, Generátor světelných motivů

ABSTRACT

This thesis deals with design of numeric keyboard, which can be connected to personal computer or laptop through USB interface. This numeric keyboard can be also configured using application for operating system Windows. Backlight pattern generator is also part of this application. Theoretic part deals with various types of keyboards, switches and closer description of USB interface. Practical part deals with sole design of circuit that detects keystrokes and sends information about active switches through USB, description of used components, description of microcontroller service routine and description of the application for backlight pattern generating. At the end of this thesis are described results of measurements which were made to choose mechanical switches with shortest debounce time and keyboard response to key press.

KEYWORDS

Numeric keyboard, Universal serial bus, Human interface device, Matrix switching, Keyboard backlight, Backlight pattern generator

HLADKÝ, Pavel. Numerická klávesnice. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126944>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Pavel Šteffan

OBSAH

Úvod	1
1 Spínače	2
1.1 Membránové	2
1.2 Čistě mechanické	3
1.3 Kapacitní	5
1.4 Magnetické	5
2 Ošetření zákmitů	6
2.1 Hardwarové ošetření	6
2.2 Softwarové ošetření	7
3 detekce stisku	8
3.1 Binárně kódovaná klávesnice	8
3.2 Maticová detekce	9
4 USB	11
4.1 Úvod	11
4.2 Komunikace	11
4.3 Struktura HID	12
5 sběrnice I²C	17
5.1 Princip komunikace	17
5.2 Zápis a čtení	19
5.3 Časování komunikace	20
6 Použité komponenty	22
6.1 Spínače CPG135001D02	22
6.2 Lineární regulátor TS1117B	22
6.3 Krystal LFX TAL036391	23
6.4 Integrovaný obvod MC14490	23
6.5 Paměť EEPROM AT24CM02	23
6.6 LED APA102 2020	24
6.7 ESD ochrana DVIULC6-4SC6Y	26

6.8	Mikrokontrolér ATSAM21G18B.....	27
6.9	Zapojení klávesnice	28
7	Obsluha mikrokontroléru	30
7.1	TOPOLOGIE	30
7.2	Použité struktury	32
8	Aplikace pro windows	34
8.1	Popis aplikace	34
8.2	MainWindow	35
8.3	Hlavní stránka	35
8.4	Časová osa	36
8.5	Segment klávesnice.....	36
8.6	Tvorba a správa motivů	37
8.7	Komunikace s klávesnicí	42
8.8	Návod k obsluze aplikace	43
9	Měření charakteristik spínačů	48
10	Závěr	53
	Literatura	55
	Seznam Obrázků	57
	Seznam tabulek	59
A	Návrh desky	60
A.1	Spodní strana.....	60
A.2	Horní strana.....	61
B	Návrh obvodu	62
B.1	Hlavní část	62
B.2	Spínače	63
B.3	podsvícení	64

ÚVOD

V současné době je v herním průmyslu k dispozici spousta doplňků ke stolním počítačům či k laptopu a není snadné se při koupi nového doplňku zorientovat v jednotlivých modelech. V případě klávesnic může nastat situace, že nám vyhovuje daný model až na fakt, že daná klávesnice zcela postrádá numerickou část. Za tímto účelem vznikla tato semestrální práce. Nicméně návrh celé klávesnice lze považovat za obdobné řešení, pouze s větším množstvím spínačů, tudíž lze tuto práci do jisté míry aplikovat i na vývoj klávesnice včetně alfabetské části nebo na herní klávesnice, které obsahují pouze část klasické klávesnice obdobně jako numerická klávesnice.

Je těžké rozhodnout, která klávesnice je ta nejlepší, jednou z možností je porovnat elektrické vlastnosti, například spotřebu energie nebo odezvu na stisk tlačítka. Další z možností je porovnávat mechanické vlastnosti jako například aktivační sílu, aktivační vzdálenost, závislost aktivační síly na celkové dráze při stisku spínače nebo způsob ošetření signálových zákmitů při stisku spínače. Druhá sada parametrů je spíše subjektivní, ale přesto má nemalý vliv na rychlost a pohodlí při práci s klávesnicí.

Za první krok ve zrodu klávesnice lze považovat vynález prvního psacího stroje, který byl vytvořen v roce 1867 Christopherem Sholesem, Carlosem Gliddenem a Samuelem Soulem. Christopher Sholes také vynalezl rozložení klávesnice QWERTY, které nejspíše vychází z mapy využívaných písmen, aby byla snížena pravděpodobnost zaklesnutí dvou sousedních kládek, která tiskla písmena skrze inkoustový pásek na papír [22].

Dále za přímého předchůdce numerické klávesnice lze považovat sčítačku vyrobenou v roce 1911 Davidem Sundstrandem, která jako první umístila klávesnici 0 pod matici číslic 1-9.

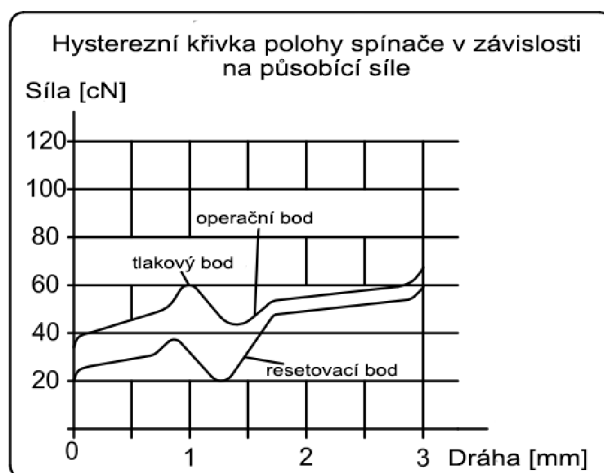
Do roku 1955 byly pro datový vstup do počítače využívány děrovací štítky nebo pásky. V roce 1955 vyšel na trh první počítač, Whirlwind, který poskytoval možnost využití klávesnice pro datový vstup [22].

Diplomová práce se nejprve zabývá jednotlivými typy spínačů, které jsou vhodné pro realizaci klávesnice a způsoby ošetření zákmitů, které vznikají při sepnutí a rozepnutí spínačů vlivem elastických sil. Dále jsou popisovány způsoby redukce počtu využitých pinů mikrokontroléru pro klávesnice o větším počtu spínačů. Následně jsou popsány komunikační sběrnice (USB a I²C), které byly při návrhu numerické klávesnice použity. V šesté kapitole jsou popsány komponenty, které byly použity při návrhu desky numerické klávesnice. Sedmá kapitola se věnuje obslužnému kódu mikrokontroléru a modulům použitých pro funkci celé klávesnice. Osmá kapitola se věnuje aplikaci, která byla vytvořena pro nastavení některých parametrů klávesnice a pro tvorbu motivů podsvícení klávesnice. Devátá kapitola popisuje výsledky měření, které vedly k výběru spínačů klávesnice a měření odezvy klávesnice na stisk spínačů.

1 SPÍNAČE

Tato kapitola je věnována rozdělení spínačů a principu snímání stisku kláves. Nejprve je uveden stručný přehled vlastností spínačů a dále jsou popsány jednotlivé druhy spínačů. Největší pozornost je věnována membránovým a čistě mechanickým spínačům, jelikož jsou nejvhodnější pro účel konstrukce numerické klávesnice.

Pro porovnání jednotlivých spínačů lze využít některé vlastnosti. Mezi nejpoužívanější patří aktivační síla, aktivační vzdálenost a životnost. Na obrázku 1. je zobrazen graf závislosti potřebné síly pro stisk spínače v závislosti na jeho stlačení.



Obr. 1: Závislost síly potřebné pro stisk spínače v závislosti na uražené dráze (převzato a upraveno z [2]).

Aktivační síla – nejmenší síla potřebná pro stisk spínače. V případě tohoto taktálního spínače je tato síla rovna síle v tlakovém bodě.

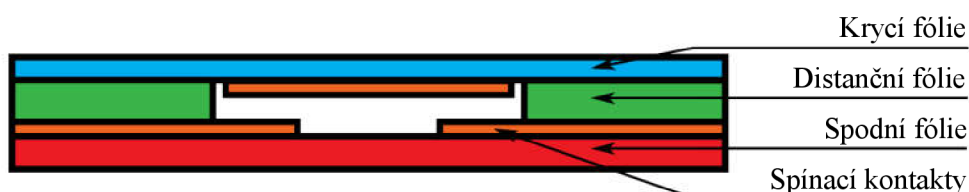
Aktivační vzdálenost – dráha při stisku spínače při které dojde k sepnutí spínače. V tomto případě je rovna dráze v operačním bodě.

Životnost je udávána v počtu kliků, kdy je zaručena neměnná funkce spínače.

1.1 Membránové

Často používaným typem klávesnic jsou klávesnice s membránovými spínači. Spínač je tvořen nejčastěji třemi fóliemi a to krycí, distanční a spodní fólií. Na spodní fólii je nanesen vodivý motiv, distanční fólie slouží k vytvoření separační vzdálenosti mezi krycí fólií, na které je připevněn spínací kontakt, a spodní fólií. Stiskem krycí fólie dojde k propojení motivu na spodní fólii. Po uvolnění stisku se krycí fólie vrací působením elastické síly do původní polohy a dojde opět k rozeznutí kontaktu. Zjednodušené schéma těchto spínačů je zobrazeno na obr. 2. Hlavními přednostmi tohoto druhu

klávesnic jsou nízká výrobní cena a tyto spínací prvky mají velice nízký profil, tudíž se hlavně používají v laptotech a dalších přenosných zařízeních (průmyslové panely, kalkulačky, dálkové ovladače). Membránové spínače jsou nejvíce náchylné na zákmitý elektrického signálu při jejich stisku. Dalšími nevýhodami jsou nízká životnost a velice krátká aktivační vzdálenost, která je v mnoha případech shodná s šířkou distanční fólie.

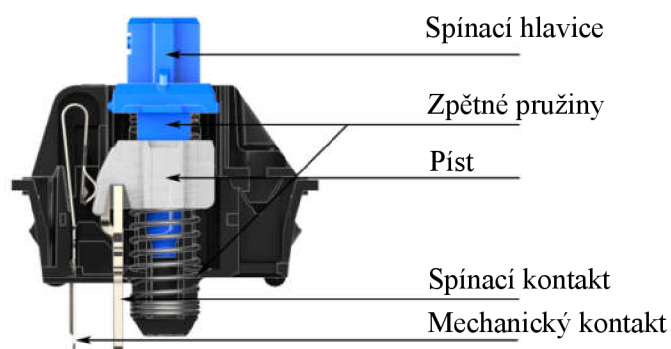


Obr. 2: Zjednodušené schéma spínače mechanické membránové klávesnice.

Pro zajištění vyšší aktivační vzdálenosti lze přidat další fólii s kopulovitými otvory (dómy). Kopule se obdobně jako membrána po stlačení a uvolnění vrací elastickými silami do svého původního tvaru.

1.2 Čistě mechanické

Konstrukce spínačů je různá, například na obr. 3. je průřez mechanického spínače Cherry MX s proklikem (typ clicky). Ve srovnání s membránovými spínači je zde mechanismus návratu do své neutrální polohy zajištěn pružinami. V případě spínače na obr. 1.3 je nelinearita odporové síly způsobena jednak pružinami mezi spínací hlavicí a pístem, dále hlavní pružinou pod pístem a nelineárním průběhem odporové síly mechanického kontaktu, způsobenou zakřivením zobáčku na pístu. Nejčastěji se mechanické spínače vyrábějí ve třech variantách, které se od sebe liší tvarem hysterezní křivky stisku.



Obr. 3: Průřez mechanického spínače Cherry MX s proklikem (převzato a upraveno z [1]).

Zvukový projev u spínačů s proklikem je způsoben nárazem pístu do podstavcy

spínače, když při stisku přestane působit přítlak mechanického kontaktu na zobáček. Zvuková odezva nastane, jelikož tuhost vrchní pružiny je vyšší než tuhost spodní pružiny a dojde k jejímu částečnému narovnání na úkor pružiny pod pístem.

U lineárních spínačů jsou spínací hlavice a píst spojeny, přičemž zobáček na pístu je přímý, odporová síla spínače je pak tvořena pružinou pod spínací hlavici a mechanickým kontaktem, sklon zobáčku na pístu dále zajišťuje hysterezi odporové síly.

Rozdíl v konstrukci lineárních a taktilních spínačů tvoří nepřímý tvar zobáčku, který způsobuje zakřivení průběhu odporové síly při stisku spínače.

Na obr. 1.3. je zobrazen spínač s vysokým profilem, klávesnice tvořena těmito spínači je poté robustnější a spínače mívají delší aktivační vzdálenost. Mechanické spínače se také vyrábí v nízkoprofilovém provedení, hlavní rozdíl tu tvoří orientace mechanického kontaktu vůči spínací hlavici. Pootočením kontaktu o 90° lze snížit profil spínače při zachování tuhosti mechanického kontaktu.

Tabulka 1: Porovnání parametrů některých značek mechanických spínačů.

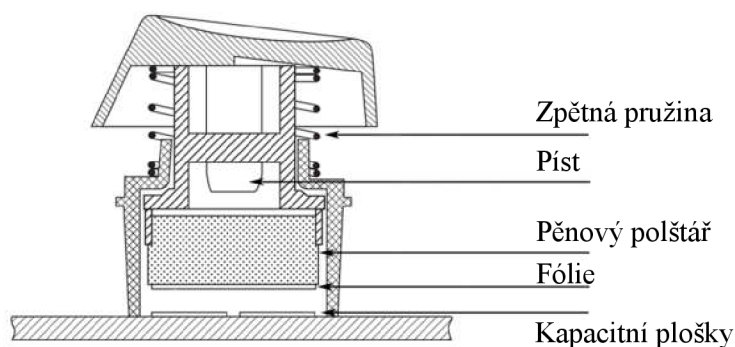
Název spínače	typ	provedení	aktivační síla [cN]	aktivační vzdálenost [mm]	celková dráha [mm]	životnost [mil. stisků]
Cherry MX	Red	lineární	45	2	4	50
	Brown	taktilní	45	2	4	50
	Blue	s proklikem	60	2	4	50
	Black	lineární	60	2	4	50
	Speed	lineární	45	1.2	4	50
Cherry MX low profile	Red	lineární	45	1.2	3.2	50
	Speed	lineární	45	1	3.2	50
Razer	Green	s proklikem	50	1.9	4	80
	Orange	taktilní	45	1.9	4	80
	Yellow	taktilní	45	1.9	4	80
Kailh	Red	lineární	50	1.9	4	70
	Brown	taktilní	50	1.9	4	70
	Blue	s proklikem	60	1.9	4	70
	Black	lineární	60	1.9	4	70
Kailh low profile	Red	lineární	50	1.5	3	70
	Brown	taktilní	60	1.5	3	70
	Burnt orange	Taktilní	70	1.5	3	50
	White	s proklikem	60	1.5	3	70

V tabulce 1 je zobrazen přehled komerčních mechanických spínačů a jejich základních parametrů krom specifikovaných odchylek, které lze najít v katalogových listech na stránkách výrobců daných spínačů.

1.3 Kapacitní

Klávesnice s kapacitními spínači jsou dalším velice používaným typem klávesnic, jelikož mají nízké výrobní náklady a nejsou náchylné na zákmitý signál při stisku spínače.

Spínače jsou tvořeny dvěma kapacitními ploškami na desce plošného spoje, které jsou pokryty pájecí maskou, což v tomto případě má funkci dielektrika. Stisknutím klávesy, dochází k posunu pěnového polštářku, který je zakončen kovovou fólií. Snížením vzdálenosti mezi kapacitními ploškami a fólií dojde k nárůstu kapacity, která je poté detekována řídicím obvodem. Spínač v sepnutém stavu lze považovat za dva sériově zapojené kapacitory. Jelikož nárůst kapacity není skokový jako v případě membránového nebo mechanického spínače, není kapacitní spínání tolik zatíženo zákmity. Další výhodou těchto spínačů je jejich vysoká životnost, srovnatelná s mechanickými spínači (10-50 mil. úhozů) [3]. Na obrázku 4 je zobrazen průřez kapacitním spínačem.



Obr. 4: Průřez kapacitním spínačem (převzato a upraveno z [3]).

1.4 Magnetické

Tento typ spínače má pod klávesou zabudován permanentní magnet, zatímco na desce plošného spoje pod každou klávesou je zabudována Hallova sonda. Hallova sonda reaguje na změnu intenzity magnetického pole v jejím okolí generováním Hallova napětí na svých kontaktech, které je poté detekováno řídicím obvodem.

Tento typ spínačů je z doposud zmíněných spínačů nejspolehlivější a má nejvyšší životnost, jelikož jediný mechanicky namáhaný element je zde pružina, která vrací klávesu do původní polohy. Hlavní nevýhodou magnetických spínačů je jejich cena a velikost.

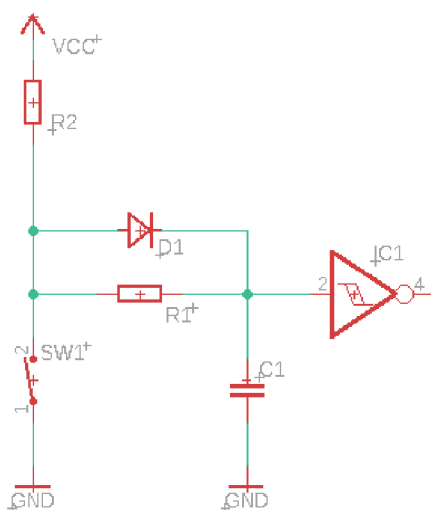
2 OŠETŘENÍ ZÁKMITŮ

Následující kapitola se věnuje způsobům ošetření zákmitů spínače, které vznikají při stisku a uvolnění spínače kvůli působení elastických sil kontaktů. V této kapitole jsou nejprve popsány způsoby hardwarového ošetření zákmitů a následně i softwarové způsoby, které převážně vycházejí z hardwarových způsobů ošetření zákmitů.

2.1 Hardwarové ošetření

V případě čistě mechanických a membránových spínačů nebo starších kapacitních spínačů, které mají málo strmý nárůst kapacity je nutno ošetřit zákmity signálu při spínání a rozepínání spínačů. V případě mechanických a membránových spínačů dochází k oscilacím mezi logickou 1 a logickou 0. V případě kapacitních spínačů spíše dochází k pomalému nárůstu kapacity a detekované napětí se poté nezanedbatelnou dobu nalézá v úrovni mezi logickou 1 a 0, kdy není jisté, jak daná napěťová úroveň bude interpretována mikrokontrolérem.

Schéma na obr. 5. zobrazuje zapojení, které slouží pro odstranění zákmitů u mechanických a membránových spínačů. Hodnoty součástek silně závisí na době ustálení zákmitů u spínače. Stanovíme-li hodnotu kapacity C , pak rezistor $R2$ ovlivňuje proud při vybíjení a nabíjení kondenzátoru. Sériová kombinace $R1$ a $R2$ ovlivňuje nabíjecí proud. Při návrhu musíme brát v potaz i odběr Schmittova klopného obvodu, který díky hysterezi drží výstupní napětí v akceptovatelných úrovních.



Obr. 5: Zapojení jednopólového spínače pro odstranění zákmitů (převzato z [7]).

Rovnice 1 popisuje napětí kondenzátoru při vybíjení. Rovnice 2 popisuje napětí kondenzátoru při nabíjení.

$$U_{TH} = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{RC}}, \quad (1)$$

$$U_{TH} = U_{cc} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{RC}}), \quad (2)$$

kde U_{TH} je napětí na kondenzátoru v čase t , U_{cc} je napájecí napětí, U_0 je počáteční napětí, R je odpor RC článku a C je kapacita RC článku. V případě některých klopných obvodů [4] může nastat případ, kdy pro nabíjení kapacitoru je potřeba nižší hodnota odporu, než je hodnota $R2$. V tomto případě lze paralelně s $R2$ přidat diodu polarizovanou v otevřeném směru, pak je nutné v rovnici 2 od napětí U_{cc} odečíst úbytek napětí na diodě.

Další možností hardwarového ošetření zákmitů je použití synchronního posuvného registru, který s náběžnou nebo sestupnou hranou hodinového signálu porovnává vstupní a výstupní signál. V případě že se napěťová úroveň na vstupu a výstupu odlišuje, dochází k inkrementaci/posunu aktuální hodnoty v registru. Tato metoda byla zvolena pro řešení diplomové práce, a tudíž bude podrobněji popsána v kapitole 6.4 při popisu integrovaného obvodu pro ošetření zákmitů MC14490.

2.2 Softwarové ošetření

První způsob, jak ošetřit zákmity spínače lze považovat za softwarovou implementaci výše zmíněného hardwarového řešení – po dostatečně dlouhé době (určené například z několika měření daného spínače) lze považovat stav spínače za ustálený. Toto řešení není ideální, v krajních situacích může být daný časový interval příliš dlouhý a zbytečně dochází ke zpoždění signálu. V opačném případě nemusí dojít k dostatečnému ošetření zákmitů.

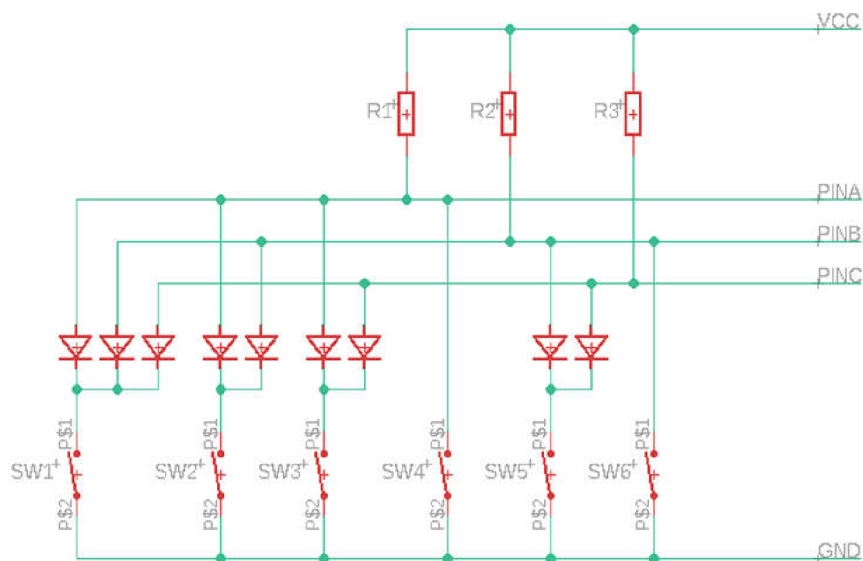
Bezpečnější řešení je po změně signálu zvolit ekvidistantní krok kratší, než je délka oscilací. Při každém kroku bude inkrementován čítač, pokud je logická úroveň na pinu shodná s logickou úrovní pinu na začátku přerušení. V opačném případě dojde k resetu čítače nebo několikanásobné dekrementaci. Přeteče-li čítač, lze považovat zákmit za ošetřený.

3 DETEKCE STISKU

Následující kapitola popisuje možné způsoby detekce stisku klávesnice. Následující způsoby lze využít v případě, že je nutné snížit počet pinů mikrokontroléru potřebných na detekci stisku spínače. Jelikož se tato práce zabývá návrhem numerické klávesnice, jsou zde uvažovány i způsoby, které nezahnují detekci vícenásobného stisku.

3.1 Binárně kódovaná klávesnice

Jako první způsob detekce stisku spínače byl zvolen způsob binárního kódování, které spočívá v zakódování až $n^2 - 1$ spínačů pomocí n -bitového čísla. Pro n -bitové číslo je nutné mít k dispozici n vstupních pinů mikrokontroléru. Na obrázku 6 je zobrazeno schéma binárně kódované klávesnice, které využívá tři vstupy mikrokontroléru k detekci stisku šesti spínačů. Diody v zapojení slouží pro separaci jednotlivých vstupů. Jsou-li využity piny ze stejného pinového portu mikrokontroléru, lze aktivní spínač snadno odhalit bitovou maskou.



Obr. 6: Schéma binárně kódované klávesnice (převzato a upraveno z [10]).

Tabulka 2 zobrazuje kódování spínačů z předchozího příkladu v závislosti na napěťových úrovních na vstupech A, B a C. V tomto případě je šestý stav nevyužit a sedmý stav je zakázán, jelikož odpovídá stavu zapojení v neutrálním stavu (bez stisku spínače). Ve funkčním návrhu by bylo vhodnější ponechat stav 0 nevyužitý pro úsporu součástek.

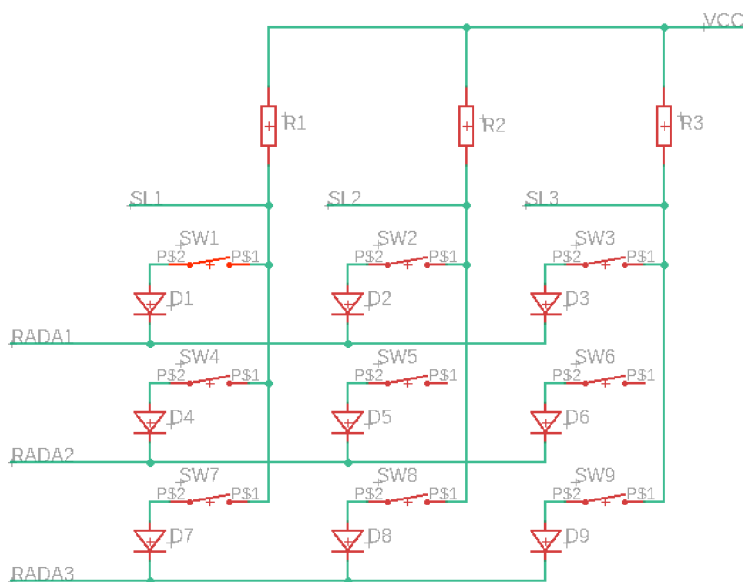
Tabulka 2: Kódování spínačů v závislosti na napěťové úrovni na vstupech A, B a C.

Spínač	Napěťová úroveň pinu		
	A	B	C
0	L	L	L
1	L	L	H
2	L	H	L
3	L	H	H
4	H	L	L
5	H	L	H
nevyužit	H	H	L
zakázán	H	H	H

Binární kódování nezaručuje detekci stisku více kláves současně, ale tato situace se principiálně neočekává u numerické klávesnice, nicméně výhodami této metody jsou úspora pinů a rychlá detekce sepnutého spínače.

3.2 Maticová detekce

Maticová detekce stisku využívá $n + m$ digitálních pinů, aby detekovala stisk na matici $n \times m$ spínačů. Pro názornost je na obrázku 7 zobrazen příklad zapojení klávesnice pro matici spínačů 3×3 .



Obr. 7: Schéma zapojení matice pro detekci stisku spínače (převzato a upraveno z [10]).

Vstupní piny SL1 – 3 značí sloupce matice, v případě že žádný ze spínačů není sepnutý je na vstupních pinech SL1 – 3 vždy napětí rovné V_{cc} . Pro detekci sepnutého spínače jsou využity výstupy RADA1 – 3 následovně: je zvolena jedna řada na jejíž pin je přivedeno napětí na nízké úrovni, zatímco ostatní výstupní piny RADAx jsou ponechány ve vysoké napěťové úrovni. Je-li některý spínač sepnutý a zároveň připojený ke zvolené řadě, objeví se na jeho kontaktech potenciál shodný s úbytkem napětí na diodě v propustném směru. Dané napětí na spínači lze detekovat na pinu SLx. V následujících iteracích je změněn výstupní pin RADAx, na kterém je udržována nízká úroveň. Je-li počet řad maticové klávesnice n, poté lze všechny sepnuté spínače odhalit v maximálně n iteracích.

V případě, že by v zapojení nebyly ochranné diody a například spínače SW1, SW2 a SW4 byly v sepnutém stavu (alespoň 2 spínače ve stejném sloupci a řadě), došlo by při první nebo druhé iteraci ke zkratování obvodu přes uzavřené spínače.

Pro realizaci tohoto zapojení je potřeba více pinů než v případě binárně kódované klávesnice, časová náročnost detekce stisku je v tomto případě také větší, nicméně při stisku více klávesnic lze zjistit, které byly stisknuty a vyvolat adekvátní reakci, v případě binárně kódované klávesnice dochází při stisku více kláves k detekci spínače, který ani nemusel být stisknut.

4 USB

Následující kapitola se věnuje sériové komunikační sběrnici, která bude sloužit pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a počítačem. Jelikož součástí operačního systému počítače jsou univerzální řadiče, které jsou schopny komunikovat se zařízením splňující kritéria dané definicí tříd zařízení [6], tudíž není potřeba vytvářet vlastní řadič pro základní komunikaci s klávesnicí. Pro potřeby návrhu klávesnice bude převážně rozebírán standard USB 2.0.

4.1 Úvod

USB je univerzální sériové sběrnice, která se využívá ke připojení různých periférií k počítači (klávesnice, myš, zvuková karta, tiskárna pevný disk). Jednou z hlavních předností této sběrnice je podpora Plug-and-Play čili využívání periferie po připojení bez nutnosti restartu zařízení nebo instalace ovladačů.

Standardsy USB 3.2–1.0 jsou spolu zpětně kompatibilní čili zařízení komunikující standardem 2.0 lze připojit ke kořenovému rozbočovači komunikujícím na standardu 3.0 a je-li v cestě mezi koncovým zařízením a hostitelským rozbočovačem více zařízení, není nutné, aby mezi sebou jednotlivé vrstvy komunikovaly na úrovni nejnižšího zastoupeného standardu. USB 2.0 využívá tři rychlosti přenosu dat: Low speed, jehož maximální přenosová rychlost je 1,5 Mb/s, full speed, jehož maximální přenosová rychlost je 12 Mb/s a high speed s maximální přenosovou rychlostí 480 Mb/s.

Kabel odpovídající standardu USB 2.0 obsahuje kroucený diferenční pár pro přenos dat a synchronizaci hostitele a zařízení. Zbylé dva vodiče slouží pro přenos napájecího (5 V) a zemního napětí.

Topologie USB 2.0 sběrnice je stromová a v jejím kořenu stojí hostitelský USB rozbočovač (hub), ke každému rozbočovači lze připojit až tři další zařízení nebo rozbočovače. Kvůli zpoždění komunikace lze vytvořit až sedmivrstvou topologii, přičemž hostitelský rozbočovač se počítá jako první vrstva topologie. Komunikace mezi hostitelským rozbočovačem a ostatními zařízeními na sběrnici je řízena hostitelským řadičem. Teoreticky lze k jednomu hostitelskému řadiči připojit až 127 zařízení nebo rozbočovačů.

4.2 Komunikace

Zařízení USB jsou rozdělena do tříd podle specifikace, například klávesnice a myš spadají do třídy HID (Human Interface Devices). Po elektrickém připojení zařízení ke kořenovému rozbočovači dochází k povolení komunikačního portu, přidělení USB adresy pro připojené zařízení a zahájení počátečního nastavení další komunikace. Počáteční nastavení probíhá přes komunikační kanál na příslušném koncovém bodě. Na nultém koncovém bodě se přenáší informace o zařízení, například informace o výrobci, zařazení do třídy, způsob napájení zařízení a zda zařízení obsahuje více funkčních bloků, aby daným funkcím mohly být přiřazeny a patřičně nastaveny vlastní komunikační kanály (pipes). Komunikace probíhá pomocí buďto zpráv nebo proudů,

zprávy mají oproti proudům přesně danou strukturu. USB specifikace dále rozlišuje čtyři typy datových přenosů, přičemž počáteční řídicí komunikace spadá do kategorie řídicích přenosů.

Hromadné datové přenosy jsou používány pro přenos velkého množství informací (například informace pro tisk), hlavním znakem těchto přenosů je variabilní šířka pásma.

Přerušovací datové přenosy probíhají mimo běžné dotazovací cykly, zařízení může o tento typ přenosů zažádat kdykoliv a tyto přenosy bývají krátké a rychle interpretovány.

Izochronní přenosy probíhají nepřetržitě v definovaných intervalech, šířka pásma komunikačních kanálů je neměnná. Při této formě datového toku nebývá přihlíženo k cyklickému redundantnímu součtu (CRC), který slouží k detekci poškození až dvou bitů daného datového paketu, jelikož zpoždění v komunikaci by způsobilo porušení časování celého přenosu. Příkladem izochronního přenosu je přenos digitálního hlasu.

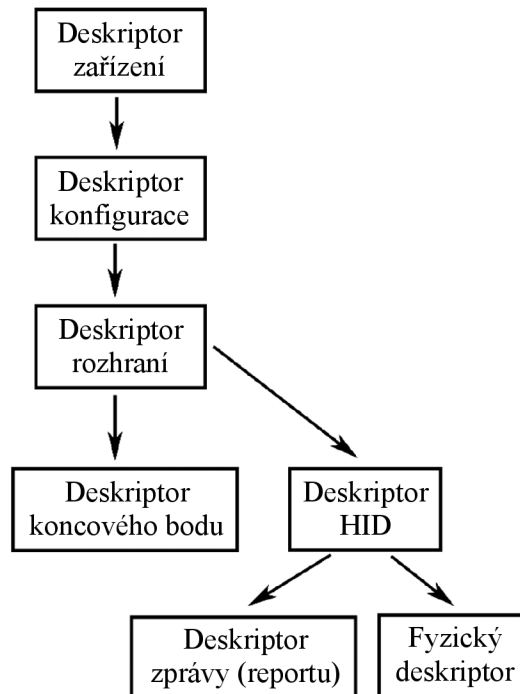
Pro vymezení komunikace s koncovým bodem jsou vyhrazeny časové úseky-rámce (1 ms) a mikrorámce (1/8 ms) pro high-speed zařízení. Typem datového přenosu je specifikována četnost transakcí v rámci.

4.3 Struktura HID

Třída Human Interface Device je řazena do struktur podle podobnosti v požadavcích pro přenos dat. Další podkategorií struktury je podtřída, která vznikla pro odlišení zařízení, která využívají ovladače poskytované kořenovým hostitelem (bootovací zařízení) od zařízení, které využívají i vlastní ovladače nespécifikované standardem USB. Bootovací zařízení lze použít například v BIOSu.

Komunikace se zařízením třídy HID probíhá výhradně pomocí ovládacích komunikačních kanálů (koncový bod 0) a přerušovacích komunikačních kanálů. Ovládací komunikační kanál a vstupní přerušovací kanál jsou povinné kanály pro HID zařízení, zatímco výstupní komunikační kanál je nepovinný, v případě deklarace tohoto kanálu, komunikace ze strany hostitele probíhá výhradně skrze tento kanál, nikoliv přes ovládací komunikační kanál. Pro každý deklarovaný komunikační kanál je nutno vytvořit koncový bod.

Struktura HID zařízení je při komunikaci popsána pomocí deskriptorů. Na obrázku 8 je zobrazena hierarchie deskriptorů.



Obr. 8: Zobrazení hierarchie deskriptorů (převzato z [5]).

Deskriptor zařízení popisuje převážně informace o výrobci, zařízení a verzi zařízení. Třída a podtřída se neuvádí v deskriptoru zařízení, přestože je zde rezervováno místo.

Deskriptor konfigurace se využívá u zařízení, která se vyrábějí ve více konfiguracích.

Deskriptor rozhraní slouží pro specifikaci všech tříd, podtříd zařízení a příslušejících koncových bodů.

Deskriptor koncového bodu slouží pro stanovení typu koncového bodu, přenosového typu, největší délky paketu, kterou je koncový bod schopný zpracovat a intervalu dotazování.

Deskriptor HID stanovuje například verzi specifikace třídy a typ deskriptoru zprávy.

Fyzický deskriptor je nepovinná část, jenž specifikuje, kterou částí těla je dané zařízení obsluhováno.

Deskriptor zprávy (reportu) specifikuje, jaká data zařízení odesílá a jejich velikost. Tento deskriptor se liší strukturou od ostatních deskriptorů. Deskriptor zprávy není specifikován jako blok dat, kde každá pozice určuje hodnotu daného parametru, nýbrž je složen z předmětů (itemů). Každý předmět má svůj jednobytový prefix, kde bity 0 až 1 značí délku dat předmětu v bytech, bity 2 až 3 značí typ předmětu a bity 4 až 7 značí

označení předmětu (tag). Tato struktura nejčastěji popisuje krátké předměty, které mají délku jeden až pět bytů.

Předmět typu Main (typ 00) zakládá novou strukturu zprávy, přičemž nová struktura je odvozena od struktury předchozí, předměty typu Local (typ 10) jsou z nové struktury odstraněny, zatímco předměty typu Global (typ 01) jsou v nové struktuře ponechány. Předmět s prefixem 1111 11 10 popisuje dlouhý předmět, který bývá 3-258 bytů dlouhý, přičemž druhý byte dlouhého předmětu specifikuje délku předmětu v bytech a třetí byte určuje jeho typ. Zbylé byty již popisují data.

Každý deskriptor zprávy musí obsahovat předměty s označením uvedeným v tabulce 3. Každý deskriptor musí obsahovat buďto předmět s označením Input, Output nebo Feature. Předmět s označením Feature není použit pro vývoj klávesnice, tudíž tu není popsán.

Tabulka 3: Seznam předmětů, které musí obsahovat každý deskriptor zprávy [5].

Jméno	Prefix	Popis
Input	1000 00 xx	Popis dat odeslaných zařízením.
Output	1001 00 xx	Popis dat odeslaných hostem.
Usage	0000 10 xx	Předmět popisující užití dat (například Znaky na klávesnici).
Usage Page	0000 01 xx	Předmět popisující vrchních 16 bitů užití dat, není-li předmětem Usage specifikováno všech 32 bitů, vrchních 16 bitů je převzato z předchozí definice Usage Page.
Logical Minimum	0001 01 xx	Logické minimum interpretovaných dat s ohledem na Usage.
Logical Maximum	0010 01 xx	Logické maximum interpretovaných dat s ohledem na Usage.
Report Size	0111 01 xx	Velikost dat zprávy.
Report Count	1001 01 xx	Četnost dat ve zprávě.

Pro větší srozumitelnost funkce deskriptorů v následujících podkapitolách budou popsány dva příkladové deskripty: deskriptor koncového bodu a deskriptor zprávy (reportu).

4.3.1 Příklad deskriptoru koncového bodu

Tabulka 4 zobrazuje sedmibytový deskriptor koncového bodu. Nultý byte popisuje délku deskriptoru, první byte značí typ deskriptoru (deskriptoru koncového bodu je přiřazena hodnota 0x05). Bity 0...3 druhého bytu značí adresu koncového bodu, v tomto případě je využita první adresa (nultou adresu vlastní řídicí koncový bod). Poslední bit druhého bytu popisuje směr koncového bodu, v tomto případě se jedná vstup (1). Bity 0...1 třetího bytu popisují typ datového přenosu, v tomto případě je popisován přerušovací datový přenos. Čtvrtý a pátý byte popisují maximální délku datového paketu, v případě přerušovacího datového přenosu je tato hodnota použita pro rezervování dostatečně velkého času na sběrnici. Šestý byte popisuje dotazovací interval hostitele pro přenosy dat v milisekundách, v tomto případě 10 ms.

Tabulka 4: Reprezentace příkladového deskriptoru koncového bodu.

Číslo bytu	0	1	2	3	4	5	6
název	bLength	bDescriptor- Type	bEndpoint- Address	bmAttributes	wMaxPacketSize		bInterval
hodnota (HEX)	07	05	81	03	00	08	0A

Deskriptor koncového bodu lze v jazyce C reprezentovat buďto pomocí pole nebo pomocí struktury, následující zdrojový kód popisuje oba způsoby zkombinované. K tomuto spojení se lze poté chovat jako ke struktuře nebo datovému poli.

```
typedef union {
    struct {
        uint8_t bLength;
        uint8_t bDescriptorType;
        uint8_t bEndpointAddress;
        uint8_t bmAttributes;
        uint16_t wMaxPacketSize;
        uint8_t bInterval;
    } n;
    uint8_t b[6];
} endpointDescriptor;
```

Pro inicializaci lze použít následující kód, popřípadě vytvořit deskriptor dynamicky pomocí funkce malloc(), která je součástí knihovny stdlib.h.

```
endpointDescriptor desc1;
desc1.b[0] = 0x07;
desc1.b[1] = 0x05;
desc1.b[2] = 0x81;
...
```

4.3.2 Příklad deskriptoru zprávy

Jako příklad deskriptoru zprávy je použit příklad, který je uveden ve specifikaci pro HID zařízení, jedná se o deskriptor zprávy popisující stisk tlačítek nebootovací numerické klávesnice. Deskriptor zprávy zobrazuje tabulka 5.

Tabulka 5: Bytová reprezentace příkladového deskriptoru zprávy (převzato a upraveno z [5]).

předmět číslo	Předmět	Prefix (B)	Prefix (HEX)	Data
0	Usage Page (Generic Desktop)	0000 01 01	05	01
1	Usage (Keyboard)	0000 10 01	09	06
2	Report Count (0)	1001 01 01	95	00
3	Collection (Application)	1010 00 01	A1	01
4	Usage Page (Key Codes)	0000 01 01	05	07
5	Usage Minimum (53h)	0001 10 01	19	53
6	Usage Maximum (63h)	0010 01 01	29	63
7	Logical Minimum (0)	0001 01 01	15	00
8	Logical Maximum (17)	0010 01 10	25	17
9	Report Size (8)	0111 01 01	75	08
10	Report Count (3)	1001 01 01	95	03
11	Input (Data, Array)	1000 00 01	00	00
12	End Collection	1100 00 00	-	-

Předměty č. 0-3 popisují, že předmětem deskriptoru je zařízení typu klávesnice. Jelikož v rámci jednoho deskriptoru lze popisovat více funkcí zařízení, například u gamepadu lze popisovat zároveň stav tlačítek a stav joysticku, k tomuto odlišení souborů dat slouží předmět s prefixem Collection. Předmět č. 4 naznačuje, že předmětem dat budou klávesy. Předměty č. 5-6 určují absolutní rozmezí v užitých datech, Usage(0x53) přísluší klávesnici Num Lock. Předměty č. 6-7 určují očekávané relativní hodnoty příchozích/odchozích dat vzhledem ke zvoleným hranicím čili klávesnice Num Lock je nyní určena hodnotou dat 0.

Strukturu deskriptoru zprávy lze snadno realizovat pomocí jednorozměrného pole typu `uint8_t`, obdobně jako v příkladu deskriptoru koncového bodu, uvedeného v předchozí podkapitole.

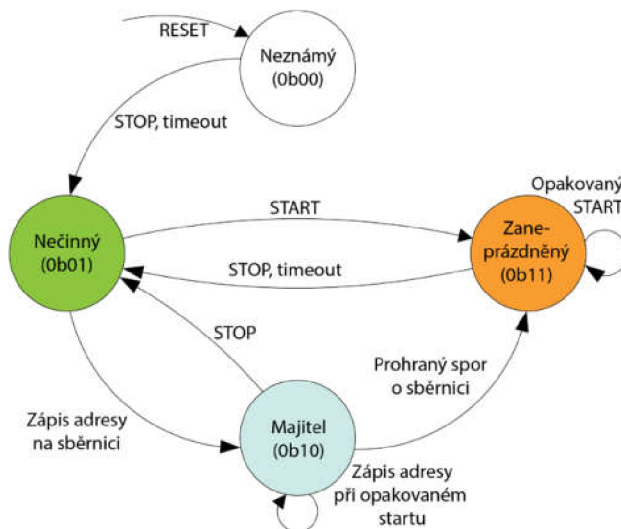
5 SBĚRNICE I²C

Následující kapitola se zabývá sériovou sběrnici I²C (Inter-Integrated Circuit) a jejím využitím pro sedmi bitovou adresaci, jelikož je tato sběrnice využita pro komunikaci s pamětí EEPROM AT24CM02.

5.1 Princip komunikace

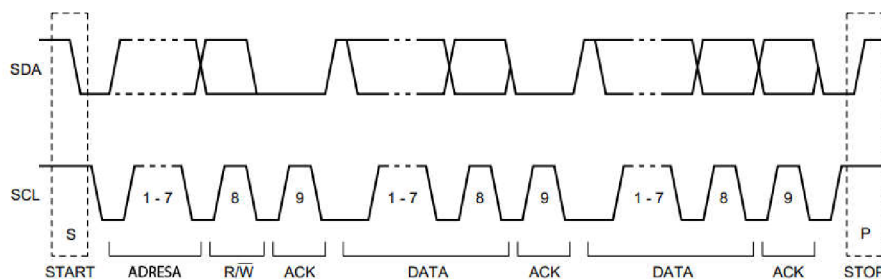
Sériová sběrnice I²C ke své funkci využívá dva vodiče, SDA (Serial Data) a SCL (Serial Clock), SDA slouží pro přenos devíti bitových slov a vodič SCL slouží k synchronizaci komunikace. Pro umožnění moderování komunikace jsou piny SDA a SCL piny konstruovány jako piny s otevřeným drainem, celá sběrnice je poté držena v úrovni logická 1 pomocí pull-up rezistorů. Hodnota odporu pull-up rezistorů závisí na maximální frekvenci použitého hodinového signálu, parametrech zařízení na sběrnici a cílené spotřebě sběrnice. Kdykoli některé ze zařízení na sběrnici uzemní vodič SDA nebo SCL, jsou ostatní zařízení schopna poznat, že někdo využívá sběrnici. Všechny změny signálu SDA by měly probíhat v okamžiku, kdy je signál SCL v úrovni logická 0, vyjma zahájení, opětovaného zahájení a ukončení komunikace, které probíhají v okamžiku, kdy je signál SCL v úrovni logická 1. Začátek komunikace (START bit) představuje sestupná hrana a konec komunikace (STOP bit) označuje náběžná hrana.

Stavy sběrnice z pohledu zařízení v módu *master* lze poté znázornit jako stavový automat zobrazený na obrázku 9. Spor o sběrnici probíhá v případě, že jiné zařízení poruší protokol a začne využívat sběrnici v okamžiku, kdy ji využívá jiné zařízení. Dvě a více zařízení typu *master* mohou vést komunikaci souběžně pokud zahájí komunikaci v čase $t_{HD:STA}$ [17], který bývá specifikován v katalogovém listě každého zařízení. Při každém odeslaném bitu se vyhodnocuje, zdali je bit platný. V případě prvního bitu na sběrnici, jehož úroveň neodpovídá odeslanému bitu, dané zařízení prohrává spor o sběrnici a přechází do stavu zaneprázdněný.



Obr. 9: Stavový automat popisující stav sběrnice z pohledu zařízení v modu Master. (převzato a upraveno z [8])

Pakety využívané v komunikaci lze rozdělit na dva typy, adresovací a datové. Adresovací pakety přenášejí adresu zařízení, popřípadě využitý segment daného zařízení a označení, zdali bude do adresovaného zařízení zapisováno nebo z něj bude čteno a potvrzení adresovaného zařízení. Adresa zařízení bývá nejčastěji sedmi bitové číslo, nicméně lze využít i desetibitovou adresaci, kdy adresa zařízení je odeslána ve dvou paketech. V případě deseti bitové adresace prvních 5 bitů po zahájení komunikace musí být řetězec 11110 následovaný vrchními dvěma bity adresy, bitem popisujícím mód zápisu/čtení (R/W bit) a potvrzením od adresovaného zařízení (ACK/NACK). V druhém paketu jsou zbylé bity adresy a potvrzení od adresovaného zařízení. Datové pakety jsou osmibitová čísla následovaná potvrzovacím bitem. V případě, že zařízení chce potvrdit příchozí paket, drží datovou linku ve stavu logická 0 při devátém impulzu hodinového signálu, v opačném případě je na paket pohlíženo jako na nepotvrzený. Pro tento účel zařízení, které paket odesílalo pouští na dobu devátého bitu datový vodič. Obrázek 10 popisuje příklad komunikace po sběrnici I²C.



Obr. 10: Příklad komunikace na sběrnici (převzato a upraveno z [14]).

5.2 Zápis a čtení

Osmý bit adresovacího paketu (2. nejméně významný bit) určuje typ přenosu datových paketů, logická 0 určuje zápis zařízení typu *master* do adresovaného zařízení, logická 1 značí čtení ze zařízení typu *slave*. Většina zařízení podporuje opakované (sekvenční) zápisy a čtení. Sekvenční zápis lze provést v případě, že adresované zařízení potvrdí, jak svou adresu, tak poslední zapsaný byte, sekvenční zápis lze ukončit pomocí STOP bitu. Z tohoto pohledu je zápis pouze jednoho byte speciálním případem sekvenčního zápisu, kdy počet odeslaných byte je roven jedné. Tabulka 6 popisuje sekvenční zápis dvou bytů se sedmi bitovou adresací, přičemž buňky se šedým pozadím jsou inicializované zařízením typu *master*, s bílým pozadím jsou inicializované zařízením typu *slave*.

Tabulka 6: Formát I²C komunikace při sekvenčním zápisu.

START	ADRESA ZAŘÍZENÍ	W (0)	ACK	DATA	ACK	DATA	ACK	STOP
-------	--------------------	----------	-----	------	-----	------	-----	------

V případě čtení je situace obdobná, pokud je potvrzena adresa zařízení typu *slave*, zařízení odesílá data na sběrnici, dokud zařízení typu *master* potvrzuje příchozí byty. Zamítnutím příchozího bytu zařízení typu *slave* přestává odesílat data a komunikaci lze ukončit STOP bitem. Čtení jednoho byte je opět speciálním případem sekvenčního čtení. Tabulka 7 popisuje sekvenční čtení ze zařízení typu *slave*. Buňky tabulky s šedým pozadím jsou inicializované zařízením typu *master*.

Tabulka 7: Formát I²C komunikace při sekvenčním čtení.

START	ADRESA ZAŘÍZENÍ	R (1)	ACK	DATA	ACK	DATA	NACK	STOP
-------	--------------------	----------	-----	------	-----	------	------	------

Oba uvedené principy lze provést v rámci jedné komunikace za použití opakovaného startu (Sr). Tento princip se využívá například pro čtení dostupných registrů. Tabulka 8 popisuje kombinaci zápisu a čtení v průběhu jedné komunikace.

Tabulka 8: Formát I²C komunikace v kombinaci sekvenčního zápisu a čtení.

S T A R T	ADRESA ZAŘÍZENÍ	W (0)	A C K	DATA	...	Sr	ADRESA ZAŘÍZENÍ	R (1)	A C K	DATA	...	N A C K	S T O P
-----------------------	--------------------	----------	-------------	------	-----	----	--------------------	----------	-------------	------	-----	------------------	------------------

5.3 Časování komunikace

Rychlost sériové sběrnice I²C lze rozdělit do kategorií a to *Standard-mode (Sm)*, *Fast-mode (Fm)*, *Fast-mode Plus (Fm+)*, *High-speed mode (Hs-mode)* a *Ultra Fast-mode (UFm)* [17], přičemž všechny uvedené kategorie, krom *UFm* jsou zpětně kompatibilní. Zpětná kompatibilita u *UFm* kategorie není možná, jelikož se jedná o jednosměrnou sběrnici. Jednotlivé kategorie mají specifikovanou dobu náběžné a sestupné hrany, aby bylo zajištěno, že signál SDA nabyde své napěťové úrovně v době, kdy je signál SCL v úrovni logická 0. Doba náběžné a sestupné hrany je ovlivněna především velikostí pull-up rezistorů a kapacitou sběrnice a připojených zařízení. Doba náběžné hrany lze vypočítat jako rozdíl doby nabíjení kapacity do vstupní úrovně logické 1 a 0 (postupně V_{IH} a V_{IL}). Doba nabíjení kondenzátoru popisuje rovnice 2 uvedená v kapitole 2.1.

$$U = U_{cc} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{RC}}), \quad (3)$$

$$U_k = k \cdot U_{cc} = U_{cc} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{RC}}), \quad (4)$$

$$t = -R \cdot C \cdot \ln(-k + 1), \quad (5)$$

kde t je doba, kdy je kapacitor s hodnotou kapacity C nabit skrze rezistor s hodnotou odporu R na hodnotu napětí U_k . Pro hodnotu $V_{IL} = 0,3 \times U_{cc}$ a $V_{IH} = 0,7 \times U_{cc}$ lze vypočítat dobu náběžné hrany, potažmo hodnotu pull-up rezistoru pomocí následujících rovnic.

$$t_r = t_{0,7} - t_{0,3} = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{1-0,3}{1-0,7}\right), \quad (6)$$

$$R_{MAX} = \frac{t_r}{C \cdot \ln\left(\frac{0,7}{0,3}\right)} = \frac{t_r}{C \cdot 0,8473}, \quad (7)$$

Tabulka 9 udává přehled podporovaných rychlostí sběrnice a jejich maximální možnou dobu náběžné hrany (t_r), sestupné hrany (t_f) a příslušnou maximální hodnotu pull-up rezistoru pro celkovou kapacitu sběrnice a připojených zařízení 100 pF.

Tabulka 9: Srovnání jednotlivých kategorií rychlostí I²C.

Kategorie	Rychlost sběrnice [Mb/s]	t _{max} [ns]	t _{fmax} [ns]	R _{MAX} [kΩ]
Standard-mode	<0,1	1000	300	11,80
Fast-mode	<0,4	300	300	3,54
Fast-mode Plus	<1,0	100	120	1,18
High-speed mode	<3,4	-	-	-
Ultra Fast-mode	<5,0	-	-	-

Při připojení několika zařízení typu master na sběrnici je možné, aby všechna zařízení ovládala signál SCL. Dobu signálu v úrovni logická 0 (T_{LOW}) poté udává zařízení s nejdelší dobou T_{LOW}, zatímco ostatní zařízení typu *master* čekají s odpočtem doby signálu v úrovni logická 1 (T_{HIGH}) dokud není linka SCL uvolněna. Výsledná doba T_{HIGH} je poté daná zařízením s nejkratší dobou T_{HIGH}. Výsledná frekvence hodinového signálu je poté rovna hodnotě f_c, kde

$$f_c = \frac{1}{T_{LOWMAX} + T_{HIGHMIN}}. \quad (8)$$

6 POUŽITÉ KOMPONENTY

Tato kapitola popisuje zvolené komponenty, jejich parametry a způsob zapojení těchto komponentů na desce plošného spoje. V závěru kapitoly je popsáno zvolené schéma pro detekci stisku spínače.

6.1 Spínače CPG135001D02

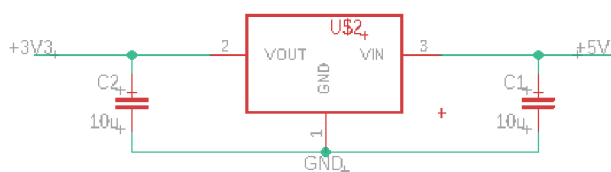
Tento nízkoprofilový, taktilní mechanický spínač značky Kailh byl zvolen pro své nízké pořizovací náklady a také kvůli malé dostupnosti nízkoprofilových spínačů ostatních firem pro veřejnost.

Firma Dongguan Kaihua Electronics Co. využívá u svých spínačů konstrukci spínačů Cherry MX, tudíž má i velice obdobné parametry jako originální mechanické spínače. Funkce spínačů Kailh je garantována až do 12 V napájecího napětí a 10 mA konstantního proudu. Doba zákmitů těchto spínačů je uvedena kratší než 5 ms.

6.2 Lineární regulátor TS1117B

Lineární regulátor napětí TS1117B slouží pro regulaci napětí z napájecího napětí USB sběrnice (+5 V) na napětí 3,3 V, potřebné pro napájení řídicí elektroniky. Maximální vstupní napětí tohoto lineární regulátoru je 12 V a jeho maximální výstupní proud je 1 A, což je dostačující, jelikož port USB 2.0 dokáže poskytnout zařízení pouze proud 500 mA. Regulátor TS1117B je doplněn blokovacím a filtračním kondenzátorem s ohledem na doporučení výrobce. Schéma zapojení lineárního regulátoru je zobrazeno na obrázku 11.

Poskytnutý výkon lineárním regulátorem TS1117B je dostatečný pro funkci podsvícené klávesnice, tudíž byl tento typ upřednostněn před spínaným regulátorem, který navíc ke své funkci potřebuje více součástek a do napájecí sítě vnáší rušení vzniklé spínáním vstupního napětí.



Obr. 11: Schéma zapojení lineárního regulátoru TS1117B (převzato z [9]).

6.3 Krystal LFX TAL036391

Kvůli vysokému nároku na přesnost časování USB komunikace byl použit externí krystal s frekvencí 16 MHz s tolerancí ± 20 ppm. Hodnoty externích kapacitorů záleží na parametrech krystalu a kapacitě pinů. Jejich hodnotu lze vypočítat následující rovnicí

$$C_{EXT} = 2 \cdot (C_L - C_{STRAY} - C_0), \quad (9)$$

kde C_L je kapacita zátěže krystalu, C_0 je parazitní kapacita krystalu a C_{STRAY} je kapacita pinů. Po dosazení parametrů z katalogových listů je vhodné použít kapacitory s kapacitou 21 pF, nejbližší použitelná hodnota kapacitorů je však 22 pF. Při vedení vodivých cest na desce plošného spoje je nutné, aby cesty byly vedeny diferenčně a aby jejich délka byla nejkratší možná pro zachování přesnosti hodinového signálu.

6.4 Integrovaný obvod MC14490

MC14490 je integrovaný obvod, který slouží k odstranění zákmitů signálu spínače. Tento obvod má již na vstupu pull-up rezistor, tudíž již není zapotřebí připojit externí rezistor k určení stavu spínače. Dále tento integrovaný obvod obsahuje čtyřbitový posuvný registr, jehož aktuální hodnota je posunuta a inkrementována o hodnotu na výstupu při náběžné hraně hodinového signálu. V opačném případě je registr vynulován nebo zaplněn hodnotou logická 1 v závislosti na aktuálním výstupu. Porovnáním vstupní a výstupní úrovně lze detekovat zákmity jak při sepnutí, tak při rozepnutí připojeného spínače, nicméně zde vzniká zpoždění propagace změny na výstup. Čistý signál se projeví na výstupu v rozmezí 3,5 až 4,5 periody hodinového signálu po ustálení zákmitů. Tento integrovaný obvod lze časovat buďto externím hodinovým signálem nebo připojením kapacitoru mezi vstupní a výstupní pin hodinového signálu. MC14490 obsahuje celkem 6 obvodů na odstranění zákmitů, tudíž pro ošetření zákmitů všech spínačů numerické klávesnice po potřeba použít alespoň tři integrované obvody MC14490.

6.5 Paměť EEPROM AT24CM02

AT24CM02 je EEPROM paměť o velikosti 256 KB, která je členěna do stran o velikosti 256 byte. AT24CM02 může komunikovat po sběrnici I²C s frekvencí 100 kHz – 1MHz v závislosti na napájecím napětí. Jednotlivé datové buňky lze adresovat pomocí 18bitového čísla, přičemž nejnižších 16 bitů se odesílá jako adresa registru a vrchní 2 bity jsou obsaženy v adrese zařízení (druhý a třetí nejméně významný bit).

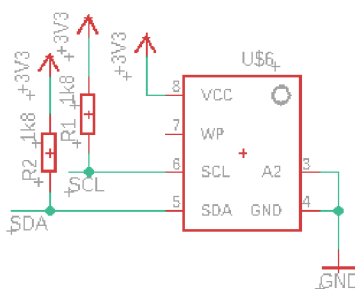
Zařízení podporuje zápis jednotlivých slov i celých stránek (sekvenčně), má-li dojít při sekvenčním zápisu k překročení hranice stránky, dojde ke změně adresy zápisu na první adresu aktuální stránky. Čtení dat je možné jak po jednotlivých slovech, tak je možné použít sekvenční přístup, přičemž přechod mezi stránkami není omezen jako je tomu v případě zápisu. Při dosažení konce paměti dochází k pokračování čtení od začátku paměti. Uvnitř paměti jsou jednotlivá slova dělena do skupin po čtyřech slovech, které následuje 6 bitů pro ECC (Error Correction Code), které slouží pro odhalení a korekci chyb při čtení. Tudíž kdykoliv je čteno nebo zapisováno do paměti dochází

ke čtení/zápisu všech čtyř slov ve skupině.

Jelikož I²C piny jsou tranzistory s otevřeným drainem, je nutné připojit na sběrnici pull-up rezistory. Nejnižší hodnota rezistorů je dána rovnicí 10 a nejvyšší hodnota pull-up rezistorů je dána rovnicí 7 uvedené v kapitole 5.3 [16]. S vyšší hodnotou rezistorů klesá spotřeba energie sběrnici, nicméně dochází ke snížení rychlosti sběrnice, jelikož se zvyšující hodnotou odporu se zvyšuje doba náběžné a sestupné hrany signálu.

$$R_{MIN} = \frac{U_{cc} - U_{OL}}{I_{OL}}, \quad (10)$$

kde U_{cc} je napájecí napětí, U_{OL} je napětí pro úroveň logická 0 a I_{OL} je maximální proud při napěťové úrovni logická 0. Hodnota R_{MIN} pro mikrokontrolér ATSAM21G18B odpovídá 440 Ω a pro paměť EEPROM 1381 Ω , maximální hodnota rezistoru pro paměť EEPROM při frekvenci sběrnice 400 kHz je 3540 Ω . S ohledem na vypočítané parametry byla zvolena hodnota 1800 Ω . Obrázek 12 zobrazuje zapojení EEPROM paměti AT24CM02.



Obr. 12: Schéma zapojení paměti EEPROM.

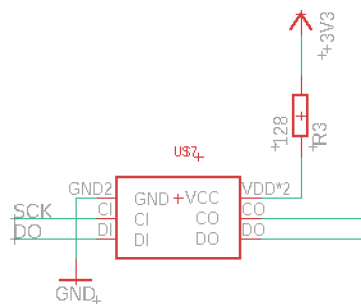
6.6 LED APA102 2020

APA102, označována jako chytrá LED, je zařízení obsahující integrovaný obvod pro zajištění komunikace a řízení tří LED na jejím těle (červená, zelená a modrá). APA102 využívá pro svou funkci dvou signálovou komunikaci, která využívá pouze datový a hodinový signál (vstupní i výstupní). Pro inicializaci a ukončení komunikace APA102 využívá detekci identifikačních řetězců.

Pro zahájení komunikace je nutné na sběrnici poslat 32 a více bitů log. 0 následované alespoň třemi bity logická 1, dále následuje pětibitové nastavení intenzity jasu čili číslo v rozsahu 0–31. Dále následují tři osmibitová čísla představující nastavení postupně modré, zelené a červené LED diody. Řídící slovo je ukončené řetězcem 32 a více bitů logické 1. Jednotlivé chytré LED APA102 lze řadit sériově za sebe, hodinový signál, který je na vstup chytré LED je invertován a vyveden na hodinový výstup, což zajišťuje

jisté zpoždění komunikace pro vyhodnocení aktuálního datového paketu. Je-li detekován validní paket zbytek dat na sběrnici se propaguje na datový výstup, avšak se zpožděním půl periody vstupního hodinového signálu. APA102 komunikuje dle katalogového listu na frekvenci 800-1200 kHz.

Při náhlých změnách napájecího napětí dochází ke zvýšení vstupního proudu LED, což může vést k poškození, proto je nutné limitovat vstupní proud z napájecího pinu. Pro limitování vstupního proudu byla použita rovnice 10. Pro elektrické vlastnosti LED diody ($U_{IL} = 0,3 * U_{cc}$ V, $I_{IL} = 18$ mA) a napájecí napětí 3,3 V byla vypočítána hodnota rezistorů $R_{PUP} = 128 \Omega$. Obrázek 13 zobrazuje zapojení jedné chytré LED APA102.

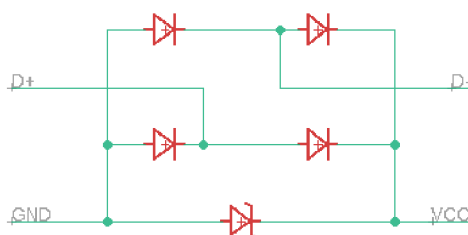


Obr. 13: Schéma zapojení chytré LED APA102

6.7 ESD ochrana DVIULC6-4SC6Y

DVIULC6-4SC6Y je zařízení na USB sběrnici zajišťující ochranu proti elektrostatickému výboji. Toto zařízení lze použít jako ochrana před elektrickým impulzem do hodnoty ± 18 kV (specifikováno pro zátěž s kapacitou 330 pF a odporem 330 Ω dle normy ISO 10605).

Uvnitř ochrany DVIULC-4SC6Y jsou antisériově zapojeny supresorové diody, což jsou speciální křemíkové lavinové diody, která mají velice nízkou spínací dobu a vyšší proudovou zatížitelnost než klasické Zenerovy diody. Antiparalelním zapojením je docíleno reakce na obě polaridy elektrostatického výboje. Nevýhodou tranzilových diod je nezanedbatelná hodnota vlastní kapacity, které omezuje použití u vysokofrekvenčních datových vodičů. Tato kapacita lze snížit sériovým zapojením s jednou či dvěma diodami s otevřeným PN přechodem. Vnitřní zapojení ESD ochrany DVIULC6-4SC6Y je zobrazeno na obrázku 14.



Obr. 14: Částečné schéma vnitřního zapojení ESD ochrany DVIULC6+4SC6Y.

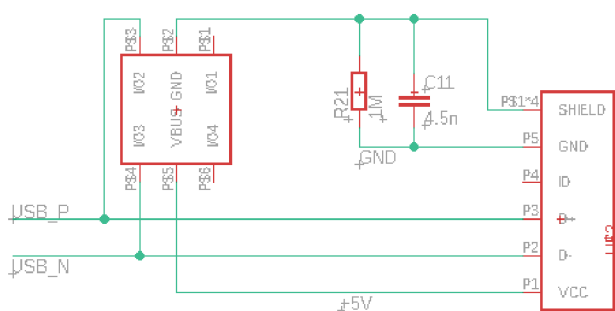
Vodiče USB sběrnice jsou vzájemně vázány několika principy, přičemž funkci ESD ochrany DVIULC6-4SC6Y nejvíce ovlivňuje indukční vazba. Datové a signálové vodiče se nacházejí v magnetickém poli, které vzniká průchodem elektrického proudu jednotlivými vodiči a při změně elektrického proudu dochází k indukci rušivého napětí U_r popsaného rovnicí 11 [23].

$$U_r = -\frac{\mu_0 S}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (11)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, S je plocha smyčky, v které je napětí U_r indukováno a r je poloměr vodiče. Jelikož vodiče USB 2.0 jsou v datovém kabelu kroucené, je zmenšena plocha smyčky, v které se může rušivé napětí indukovat, nicméně elektrostatický výboj má vysokou strmou nárustu proudu. Během jedné nanosekundy proud elektrostatického výboje dosáhne jednotek až desítek A, poté během několika desítek nanosekund klesne až k hodnotě 0 A [23].

Elektrostatický výboj může ovlivnit obvod přímo nebo výše zmíněnou indukci může ovlivnit i ostatní obvody v blízkosti. Elektrostatický výboj může porušit tenké vodiče, narušit izolaci součástek nebo přispět k degeneraci součástky. Proto se poškození elektrostatickým výbojem nemusí projevit okamžitě.

Pro snížení vazební kapacity vůči zemi a kvůli snížení elektromagnetického rušení z okolí se využívá stínění okolo vodičů sběrnice, rušivý proud je veden stíněním a není veden skrze vodiče kabelu. Stínění kabelu je uzemněno pouze na straně hostitele. Tato ochrana ovšem ztrácí účinnost při vyšších kmitočtech, jelikož impedancí stínění vzniká při vysokých kmitočtech na povrchu stínění rušivé napětí. Toto napětí se projeví na vstupu zařízení, z tohoto důvodu je sveden vysokofrekvenční rušivý proud přes RC článek do společné země. Obrázek 15 zobrazuje zapojení ESD ochrany DVIULC6-4SC6Y a stínění USB kabelu.



Obr. 15: Schéma zapojení ESD ochrany DVIULC6-4SC6Y.

6.8 Mikrokontrolér ATSAML21G18B

Tento mikrokontrolér v 32pinovém QFP pouzdře využívá 32bit procesor ARM Cortex – M0+ při taktování až 48 MHz. Mikrokontrolér dále disponuje 256 KB flash paměti a 32 KB SRAM paměti. K dispozici je až 16 externích maskovatelných přerušení a jedno nemaskovatelné na 37 vstupně výstupních pinech. ATSAML21G18B dále obsahuje 32kHz a 16MHz vnitřní oscilátor, vyšších frekvencí se dá docílit nastavením digitálního fázového závěsu (FDPLL) nebo digitálního frekvenčního závěsu (DFLL). Pro účely časování lze využít 6 časovačů. V neposlední řadě mikrokontrolér obsahuje Fullspeed USB 2.0 modul.

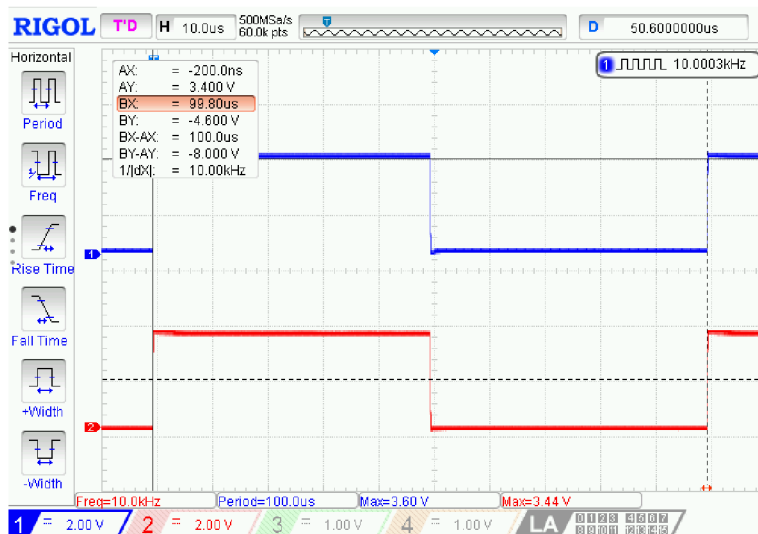
Vstupně výstupní piny jsou děleny do dvou pinových skupin, které lze použít jako zdroje proudu až 46 mA na skupinu pinů nebo zde lze utopit proud až 65 mA. Jednotlivé piny mohou poskytnout proud až 12 mA a utopit proud až 15 mA. Na obrázku 16 je zobrazeno schéma zapojení mikrokontroléru.

nezávislá na volbě spínačů. Limitujícím faktorem je stále poloha průzoru pro LED.

Při návrhu vodivých cest pro rozvod hodinového signálu by měly být dodržovány některá kritéria pro minimalizaci zkreslení průběhu tohoto signálu. Prvním z těchto kritérií je kritérium 3-W [15]. Toto pravidlo se snaží minimalizovat vzájemný vliv dvou souběžných cest, jelikož průchodem proudu vodičem vzniká v okolí vodiče magnetické pole. Velikost vektoru magnetické indukce popisuje rovnice 12.

$$B = \frac{\mu I}{2\pi d} \quad (12)$$

kde μ je permeabilita prostředí, I je proud protékající vodičem a d je vzdálenost souběžných vodičů. Pro snížení vlivu dvou souběžných vodičů lze zvýšit jejich vzdálenost. Při dodržení distanční vzdálenosti 3x šířka vodiče (měřeno od středu vodičů), dochází k výraznému snížení vlivu obou vodičů. Dalším kritériem je dodržování vyšší vzdálenosti od napájecích vodičů, toto kritérium opět vychází z rovnice 12, jelikož skrze napájecí vodiče obvykle prochází vyšší proud než skrze signálové vodiče, je v jejich okolí silnější magnetické pole. Dalším kritériem je minimalizace množství průchodů skrze prokovené otvory, jelikož pravouhlé cesty vedou k vyzařování elektromagnetického vlnění. Na obrázku 17 lze vidět průběhy hodinového signálu v pořadí prvního a posledního integrovaného obvodu MC14490.



Obr. 17: Srovnání hodinového signálu v pořadí prvního (modrý) a třetího (červený) integrovaného obvodu MC14490.

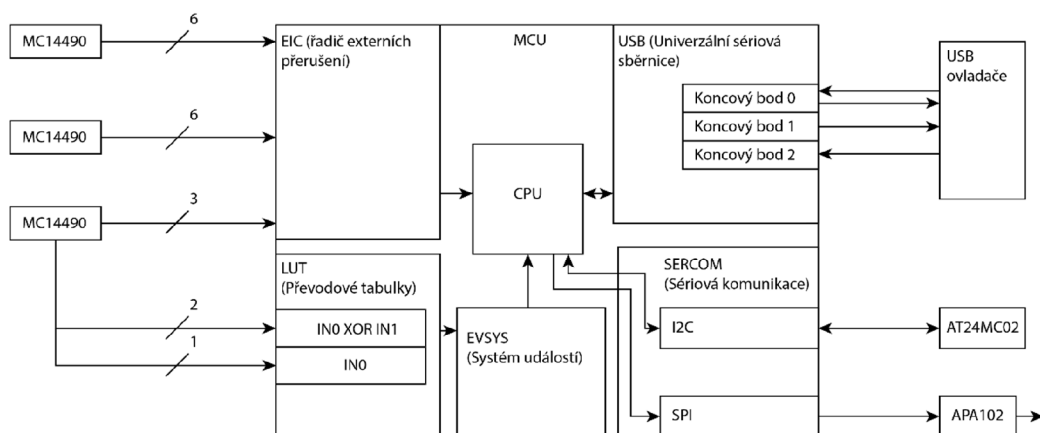
Dle průběhů lze usoudit, že vedení hodinového signálu po desce plošného spoje je konzistentní. Hodinový signál byl měřen na klávesnici s aktivním, proměnlivým světelným motivem.

7 OBSLUHA MIKROKONTROLÉRU

Následující kapitola se věnuje vnitřní struktuře a vzájemnému propojení modulů mikrokontroléru ATSAML21G18B a jejich interakci s okolními zařízeními.

7.1 TOPOLOGIE

Zjednodušené schéma vzájemné propojení použitých modulů mikrokontroléru s okolními zařízeními je zobrazeno na obrázku 18, ve schématu jsou pro přehlednost vynechány moduly časovačů (TC, TCC), hodinových signálů (GCLK) a periférií (PORT).



Obr. 18: Zjednodušené schéma propojení modulů mikrokontroléru a okolních zařízení.

Výstupní signály integrovaných obvodů MC14490 jsou přivedeny na vstupně výstupní piny mikrokontroléru ATSAML21G18B, k detekci stisku spínačů je využit řadič externích přerušení (EIC), který vyvolá přerušení kdykoli na příslušném pinu dojde ke změně napěťové úrovně čili bude detekována náběžná nebo sestupná hrana. Vstupně výstupní piny mikrokontrolérů rodiny ATSAML21 mohou generovat pouze šestnáct maskovatelných externích přerušení. S ohledem na ostatní periférie lze využít pouze patnáct externích vektorů přerušení. Zbylé tři signály (náležící klávesám Num lock, * a /) jsou rozvedeny skrze převodové tabulky (lookup table – LUT) do systému událostí (event systém – EVSYS).

Převodové tabulky jsou koncipované jako logické funkce obsahující tři termy. Jako termy jsou v případě první logické tabulky použity dva signály odpovídající napěťové úrovni na příslušných pinech (PA_17, PA_18). Výslednou logickou funkci popisuje funkce 13. V případě druhé převodové tabulky je jako term použit signál odpovídající napěťové úrovni na pinu PB_10. Výslednou logickou funkci popisuje funkce 14.

$$OUT_1 = (IN_{10} \text{ xor } IN_{11}) \text{ or } 0, \quad (13)$$

$$OUT_2 = IN_{20} \text{ or } 0 \text{ or } 0, \quad (14)$$

kde OUT_x jsou výstupní signály převodových tabulek a signály IN_{xy} jsou vstupní signály odpovídající napětovým úrovním na příslušných pinech. Výstupní signály převodových tabulek jsou převedeny pro zpracování systémem událostí (EVSYS). Skrze systém událostí je následně spuštěn odpočet časovače s periodou 0, čili je okamžitě vyvoláno přerušení. Jelikož časovače mají nižší prioritu vůči ostatním modulům mikrokontroléru (ačkoli v tabulce priorit mají všechny obsažené moduly stejnou prioritu), je nutné zvýšit prioritu těchto časovačů pro snížení odezvy.

Modul univerzální sériové sběrnice slouží pro komunikaci s ovladači operačního systému, pro tento účel jsou využity tři koncové body. Koncový bod 0 je řídicí koncový bod, který slouží pro navázání komunikace a předání použitých deskriptorů. Koncový bod 1 je nastaven pro přerušovací datový přenos z mikrokontroléru. Tento koncový bod slouží pro odesílání informací o stisknutí/uvolnění jednotlivých tlačítek. Koncový bod 2 je nastaven jako přerušovací přenos od hostitele, skrze tento koncový bod jsou přijímány tři druhy zpráv. První druh zprávy slouží pro inicializaci přenosu struktury obsahující světelný motiv a její hlavičku, v které je například identifikační číslo motivu, délka kroku mezi jednotlivými rámci a délka motivu v rámci. Druhý druh zprávy slouží pro přenos jednotlivých rámců světelného motivu, přičemž každý rámeček je odeslán pomocí dvou zpráv. Třetí druh zprávy slouží pro vykonávání příkazů z aplikace, mezi které patří například uložení přeneseného motivu do paměti EEPROM, popřípadě přepsání, pokud v paměti již tento záznam existuje. Některé příkazy jsou tvořeny pouze číslem příkazu (například již zmiňované uložení), některé obsahují i šestnácti bitovou hodnotu příkazu (například pro vymazání motivu s určitým identifikačním číslem z paměti EEPROM).

Modul sériové komunikace je jednak použit pro komunikaci s pamětí EEPROM AT24CM02 pomocí protokolu I²C, jednak pro nastavení chytrých LED APA102 pomocí SPI komunikace. Komunikační protokol APA102 sice neodpovídá protokolu SPI (Sériové periferní rozhraní), nicméně lze tento modul pro odesílání paketů pro LED využít. Při této komunikaci jsou využity pouze signály pro data a hodinový signál. V každém časovém okně je odesláno osmáct paketů, které odpovídají nastavení každé chytré LED APA102, doba mezi časovými okny je dána délkou kroku mezi jednotlivými rámci.

Paměť EEPROM je pro mikrokontrolér logicky rozdělena do tří sektorů, v prvním sektoru paměti, na první stránce, se nachází tabulka záznamů o uložených motivech v paměti EEPROM, tato tabulka je vždy při startu mikrokontroléru načtena do FLASH paměti mikrokontroléru, při mazání motivů/resetu paměti jsou mazány pouze záznamy o motivech. V druhém sektoru, na druhé stránce, jsou uloženy proměnné, které lze nastavit z aplikace pro počítač, jako například index aktivního motivu v tabulce, intenzita osvětlení LED a frekvence hodinového signálu pro integrované obvody MC14490. Tyto proměnné jsou opět načteny při startu mikrokontroléru. Ve třetím sektoru je uložena struktura odpovídající světelnému motivu složená z hlavy motivu a jednotlivých rámců. Pro každý motiv je vyhrazeno 29 stran paměti, přičemž při ukládání motivu jsou sekvenčně přepisovány pouze využité stránky. Vždy při startu mikrokontroléru je načten aktivní světelný motiv. Pro rychlé ovládání světelného motivu lze využívat některé klávesové zkratky klávesnice. Zkratka Num 5 + Num 8 zvýší intenzitu podsvícení klávesnice a zkratka Num 5 + Num 2 ji naopak zmenší. Klávesovými zkratkami Num 5 + Num 4/6 lze procházet mezi uloženými světelnými motivy v paměti EEPROM.

7.2 Použité struktury

Tato kapitola se nebude zabývat strukturami deskriptorů a datových zásobníků, jelikož struktury deskriptorů byly popsány již v kapitole 4.3 a jejich podoba je dána specifikací pro třídu *Human Interface Device*. Všechny vytvořené struktury lze najít v knihovně *descriptors.h*, kterou lze najít mezi zdrojovými kódy diplomové práce.

Jedna z hlavních struktur pro mikrokontrolér je sktruktura popisující světelné motivy. Tato struktura je dělena na dvě části, hlavičku (vyznačena šedým pozadím) a tělo, které je tvořeno rámcem. Rámec je pomyslná struktura, která obsahuje informace o nastavení pole chytrých LED APA102 v daném časovém okně. Její struktura je popsána v tabulce 10.

Tabulka 10: Struktura LED_PATTERN definující světelný motiv.

	Odsazení (HEX)	Velikost [byte]	Jméno položky
Hlavička	0x0000	2	ID
	0x0002	2	STEP
	0x0004	1	FNUM
	0x0005	1	Rezervováno
Rámec 1	0x0006	1	E ₀
	0x0007	1	B ₀
	0x0008	1	G ₀
	0x0009	1	R ₀
	...		
	0x004A	1	E ₁₇
	0x004B	1	B ₁₇
	0x004C	1	G ₁₇
	0x004D	1	R ₁₇
...			
	0x1C26	218	Rezervováno

Položka ID představuje identifikační číslo světelného motivu, pomocí kterého jsou rozpoznávány světelné motivy pro účely přepisu, úpravy nebo mazání skrze aplikaci pro operační systém Windows. Položka STEP značí délku časového okna, po kterou je aktivní daný rámec, tato hodnota je uchována v milisekundách. Maximální délka časového okna je při současné konfiguraci omezena pouze velikostí položky STEP. Minimální délka časového okna je dána konfigurací časovače TCC0, Délku časového okna lze volit v rozmezí 1-65536 ms. Položka FNUM specifikuje počet rámců ve světelném motivu, tato hodnota je omezena aplikací pro nastavení klávesnice na jeden až sto rámců.

Struktura rámce a jejich pořadí odpovídá formátu datových paketů protokolu chytrých LED APA102 popsanému v kapitole 6.6. Pro snadný přístup a úpravu světelných motivů v paměti EEPROM byla zvolena délka struktury LED_PATTERN 7424 byte, což odpovídá délce 29 stran paměti EEPROM AT24C02, ačkoliv počet využitých bajtů nemůže překročit hodnotu 7206. Do celé paměti EEPROM lze uložit nejvíce 34 světelných motivů.

Záznam o uložených světelných motivech v EEPROM je veden v podobě pole struktur typu RECORD, které by bylo možné realizovat například pomocí indexového souboru, který je tvořen dvojicí index a ukazatel na datový blok [18], nicméně pro ušetření přístupu do paměti EEPROM byla zvolena struktura zobrazena v tabulce 11.

Tabulka 11: Struktura pole záznamů o světelných motivech uložených v paměti EEPROM.

	Odsazení (HEX)	Velikost [byte]	Jméno položky
Záznam 0	0x00	2	ID
	0x02	2	PAGENUMBER
	0x04	2	LENGTH
	0x06	2	Rezervováno
...			

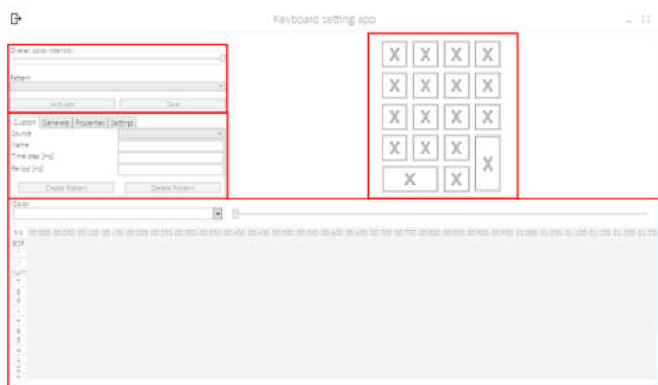
Jelikož toto pole záznamů je uloženo na první stránce paměti EEPROM a délka jednoho záznamu je 8 byte, lze pomocí tohoto pole indexovat až 32 světelných motivů. Položka ID představuje identifikační číslo, položka PAGENUMBER obsahuje číslo stránky EEPROM, na kterém začíná daný světelný motiv a položka LENGTH obsahuje počet rámců světelného motivu.

8 APLIKACE PRO WINDOWS

Následující kapitola se věnuje navržené aplikaci pro operační systém Windows, která slouží pro nastavení některých parametrů klávesnice, jako například míra svítivosti klávesnice a frekvence hodinového signálu pro časování integrovaných obvodů MC14490, které slouží pro odstranění zákmitů při stisku a uvolnění spínačů. Dále aplikace slouží pro generování a úpravu světelných motivů. Tato aplikace je napsána pomocí knihovny tříd Windows Presentation Foundation (WPF), která slouží pro provázání uživatelského rozhraní s multimediálními daty. Pro vytvoření uživatelského rozhraní je využit jednak značkovací jazyk XAML a také objektivně orientovaný programovací jazyk C#, který také slouží pro vytvoření logického modelu za grafickým rozhraním. V rámci této kapitoly bude nejprve popsána aplikace jako celek, poté budou popsány jednotlivé segmenty aplikace a třídy, které tyto segmenty využívají, popřípadě jejich funkce. Mimo WPF lze navrhnout aplikaci například za pomoci knihovny tříd WinForms, která je předchůdcem WPF nebo Univerzální Windows Platformě, jež je nezávislé vývojové prostředí, pro vývoj aplikací na Operační systém Windows 10, Windows 10 Mobile. WPF bylo zvoleno pro vývoj aplikace kvůli vysoké kompatibilitě i se staršími operačními systémy Windows a pro svou pokročilejší integraci grafického rozhraní a manipulaci s daty.

8.1 Popis aplikace

Celá aplikace je logicky rozdělena na schránku aplikace a čtyři funkční části, které lze vidět na obrázku 19, ačkoliv toto dělení přímo neodpovídá struktuře aplikace.



Obr. 19: Logické rozdělení aplikace.

V levém horním rohu aplikace se nachází posuvník pro nastavení intenzity podsvícení klávesnice, kombinované pole pro výběr aktuálního světelného motivu a tlačítka pro uložení vybraného motivu do EEPROM a pro aktivaci vybraného motivu.

Níže se nachází hlavní okno se záložkami pro vytváření vlastních vzorů, jejich základní a rozšířenou správu, generování motivů a záložka pro nastavení klávesnice.

Ve spodní části aplikace se nachází panel pro výběr aktuální barvy, tato barva je použita pro jednotlivé nebo hromadné nastavení buněk pod časovou osou, kde jsou zobrazeny světelné motivy v jednotlivých časových oknech. Část pod časovou osou včetně bude dále souhrnně označována jako časová osa. Nad časovou osou je posuvník pro výběr a zobrazení, eventuálně úpravu aktuálního rámce.

V pravé části je poté obrys klávesnice, na kterém se zobrazuje světelný motiv ve vybraném časovém okamžiku, také zde lze vybírat jednotlivé klávesnice pro změnu barvy.

8.2 MainWindow

Schránka aplikace je tvořena třídou `WindowViewModel` implementující třídu `BaseViewModel`. Třída `WindowViewModel` obsahuje vlastnosti a proměnné ovlivňující vzhled a dimenze okna aplikace. Tato třída dále definuje vlastnosti, které při stisku tlačítek na záhlaví okna volají příslušné příkazy (minimalizace, rozšíření na celou obrazovku a vypnutí aplikace). Tato třída byla převážně vytvořena na základě projektu volně dostupné chatovací aplikace `fasetto-word` [19]. Třída `MainWindow` implementující třídu `System.Windows.Window` je základní funkční model aplikace, který obsahuje převážně statické objekty využívané ostatními třídami, mezi tyto objekty patří například základní (prázdný, nemodifikovatelný) světelný motiv, který slouží pro vytvoření panelu pro zobrazení a úpravu světelných motivů. Mezi hlavní funkce této třídy patří ukládání světelných motivů v paměti do souboru `settings.hex`, světelné motivy mají obdobný formát jako v paměti EEPROM, aplikace pro Windows využívá některé informace navíc, jako například zdali byl motiv vytvořen pomocí generátoru motivů a jaký vzor byl k tomu použit, aby bylo možné generované motivy znovu reprodukovat a případně upravit. Ukládání motivů do souboru probíhá vždy při vypínání aplikace. Při zapínání aplikace jsou načteny data ze souboru, přičemž jednotlivé informace identifikovat jedna formátovacím znakem na začátku každého řádku a také jejich pozici. Okno třídy `MainWindow` obsahuje pouze vertikální rolovací lištu a odkaz na stránku (page) `Page1`. Použití stránky `Page1` je sice redundantní, ale výsledný kód je přehlednější a lze například snadněji přejít na záložkové rozložení hlavní stránky.

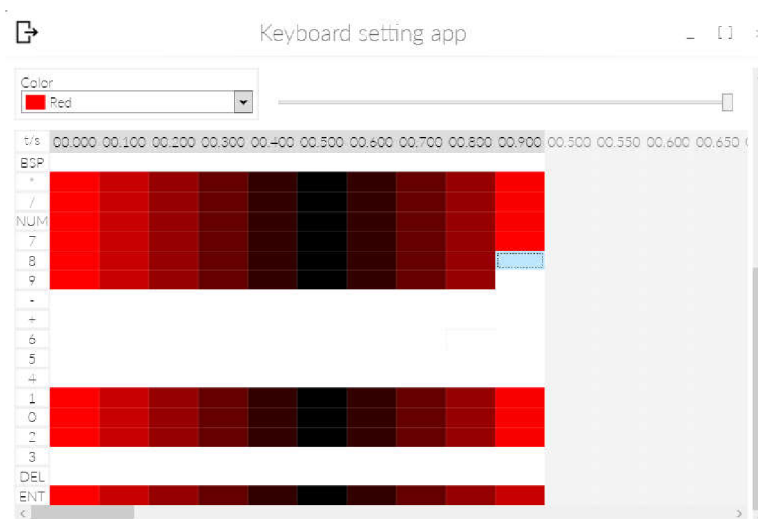
8.3 Hlavní stránka

Třída `Page1` implementující třídu `System.Windows.Controls.Page` definuje hlavně síť, v které jsou vloženy buďto přímo nebo prostřednictvím dalších stránek systémové ovládací prvky. Mezi prvky, které mají vyhrazené samostatné stránku patří záložky prvku `TabControl`, oblast pod časovou osou (včetně) a model klávesnice. Ostatní ovládací prvky jsou prvky třídy `Page1`. Při výběru aktivního světelného motivu dochází k nastavení proměnných třídy `MainWindow`, které nesou informace o aktivním světelném motivu a také dojde k obnovení informací ve formulářích v záložkách prvku `TabControl`. Dále je obnovena časová osa. Součástí třídy `Page1` je také funkce, která reaguje na přepnutí aktivní záložky prvku `TabControl`. Tato funkce převážně upravuje dostupnost jednotlivých formulářů a segmentů aplikace podle toho, která záložka je zrovna aktivní

a zdali je vybrán motiv, nebo zdali je vybraný motiv generován. V případě že je vybrán vlastní motiv jsou nedostupné pro úpravy položky generátoru a časová osa.

8.4 Časová osa

Segment časové osy je tvořen 1900 tlačítky, přičemž 100 vrchních tlačítek jsou ovládací tlačítka, která signalizují, v jakém okamžiku začíná časové okno, tento údaj je v sekundách. Kliknutím na ovládací tlačítko se změní index aktuálního rámce pro úpravu, pokud již tomu tak není. V opačném případě buďto dojde ke změně barvy všech tlačítek v aktuálním rámci na aktuálně zvolenou barvu nebo dojde ke zrušení označení všech vybraných tlačítek v aktuálně zvoleném rámci. Ke zrušení označení dojde v případě, že již jsou v aktuálním rámci vybrána některá tlačítka. Při vybrání některého tlačítka pod kontrolními tlačítky dochází k nastavení barvy tohoto tlačítka na aktuálně zvolenou barvu, toto tlačítko je poté svázané s výběrem barvy, dokud není změněn aktuální index nebo není tlačítko odstraněno z výběru. Celá časová osa je generována při startu aplikace, v případě že počet rámců aktuálně vybraného světelného motivu je nižší než 100, tlačítka nevyužitých rámců jsou nepoužitelná. Na obrázku 20 je příklad motivu vlastního motivu zobrazeného na časové ose, perioda motivu je 1000 milisekund a krok jednotlivých rámců je 100 milisekund.



Obr. 20: Zobrazení segmentu časové osy aplikace.

8.5 Segment klávesnice

Na segmentu klávesnice je zobrazován rámec s aktuálním indexem, tento index lze změnit pomocí časové osy (tyto způsoby byly popsány v minulé kapitole) nebo pomocí posuvníku pod segmentem klávesnice, přičemž úprava aktuálního rámce probíhá obdobně jako je tomu v případě časové osy.

8.6 Tvorba a správa motivů

Pro tvorbu a správu motivů jsou určeny záložky prvku TabControl. V pořadí první záložka, Custom, slouží ke generování nového motivu a následně k jeho úpravě. Pro tvorbu nového motivu je nutné uvést výchozí motiv, jelikož rámce výchozího motivu budou okopírovány do nově vytvořeného motivu, dále je pro vytvoření nového motivu potřeba uvést periodu motivu v milisekundách a délku časového okna, také v milisekundách. V této záložce lze také pomocí tlačítka *Delete Pattern* vymazat motiv uvedený jako výchozí motiv. Na obrázku 21 je zobrazen vytvořený statický motiv loga VUT.



Obr. 21: Fotografie klávesnice s aktivním statickým motivem.

Záložka *Generate* slouží pro generování nových motivů na základě vybraných parametrů. Nově vygenerovaný motiv bude mít vždy délku 100 rámců, periodu světelného motivu lze definovat a později měnit v záložce *Generate*. V této záložce lze generovat celkem pět druhů motivů: *Radial*, *Linear*, *Whirling*, *Breathing* a *Spiral*. Zaškrťovací pole v této záložce slouží pro výběr složek barvy, které budou ovlivněny zvolenou funkcí. V případě intenzity jsou ovlivněny všechny tři složky barvy (červená, modrá a zelená).

Pro účel výpočtu koeficientu, který posléze modifikuje zvolené složky vybrané barvy slouží třída *Coordination*, která obsahuje informace o poloze LED. Chytré LED jsou uloženy v podobě bodů v dvourozměrné kartézské soustavě souřadnic, přičemž střed souřadnicového systému se nachází ve středu klávesnice.

První typ světelných motivů, *Radial*, využívá pro určení koeficientu funkci postupného příčného vlnění. Postupné příčné vlnění je vlnění složené z hmotných bodů, které kmitají kolmo na směr šíření vlnění. Absolutní výchylku těchto hmotných bodů z výchozí polohy popisuje rovnice 15.

$$y = y_m \cdot \sin(\omega(t - \tau)), \quad (15)$$

kde ω je fázová rychlost vlnění, $\omega\tau$ je fázový posuv vlnění, a y je absolutní výchylka vlnění s amplitudou y_m v čase t . Pro potřeby klávesnice lze jako parametry použít vzdálenost od zdroje vlnění a čas a period vlnění, proto je potřeba upravit rovnici 10.

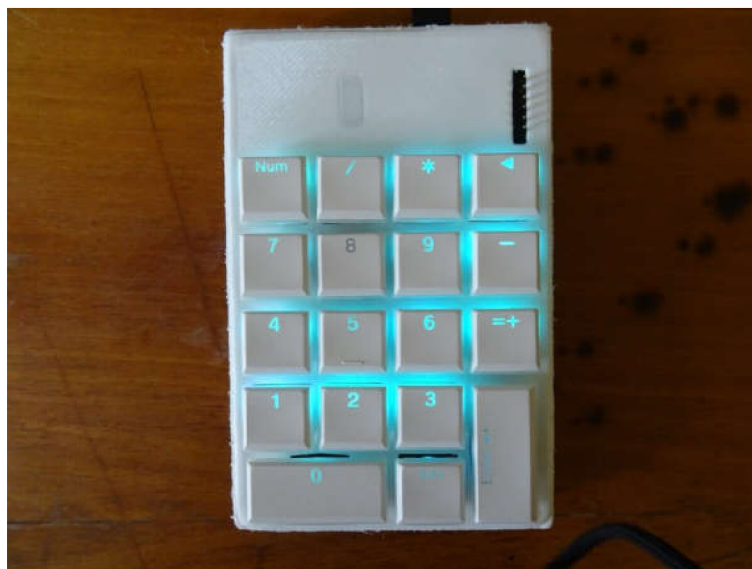
$$y = \left| \tau = \frac{x}{v}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \right| = y_m \cdot \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{vT}\right)\right), \quad (16)$$

$$y = |\lambda = v \cdot T| = y_m \cdot \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)\right), \quad (17)$$

$$y = \frac{(\sin(2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda})) + 1)}{2}, \quad (18)$$

kde λ je vlnová délka postupného vlnění, T je perioda vlnění a v je rychlost postupného vlnění a x je vzdálenost hmotného bodu od výchozí polohy.

Světelný motiv *Radial* využívá pro výpočet x délku vektoru mezi body představující aktuální a zdrojovou LED. Vlnová délka vlnění odpovídá délce klávesnice (délce vektoru od klávesnice 0 po klávesnici backspace) a nastavené periodě. Funkce vlnění je dále upravena, aby vracela pouze kladné hodnoty z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Těto úpravě odpovídá rovnice 18. Na obrázku 22 je zobrazen motiv *Radial* na numerické klávesnici, zdroj vlnění je v klávese Num 8.



Obr. 22: Fotografie klávesnice s aktivovaným motivem *Radial*.

Druhý typ generovaného světelného motivu, *Linear*, představuje také postupné příčné vlnění, které se ovšem nešíří do všech směrů, ale pod úhlem, který je nutné nastavit při vytváření motivu. Úhel šíření je vztažen k záporné poloose y . Pro výpočet parametru

x rovnice 13 je v kartézské soustavě souřadnic vytvořena přímka, parametr x poté představuje vzdálenost bodu představující LED od této přímky. Obecnou rovnici pro výpočet vzdálenosti bodu v prostoru představuje následující funkce.

$$d(P, q) = \frac{|tg\alpha \cdot x_b - y_b + C|}{\sqrt{tg^2\alpha + 1}}, \quad (19)$$

kde α je úhel mezi směrem šíření vlnění a zápornou poloosou y, x_b a y_b jsou souřadnice bodu a c je konstanta, která udává posun přímky se směrnici $tg\alpha$. Konstanta C je zvolena, aby vytvořená přímka neprošla přes pomyslnou oblast klávesnice. Tato rovnice neplatí pro všechny celočíselné liché násobky úhlu $\pi/2$. Na obrázku 23 je zobrazen motiv *Linear* s úhlem šíření 45° .



Obr. 23: Fotografie klávesnice s aktivním motivem Linear.

Třetí světelný motiv, *Whirling*, představuje rotaci úsečky kolem počátku. Opět jako v předchozím případě je vytvořena přímka podle funkce 19, přičemž hodnota konstanty C je v tomto případě 0, čili přímka prochází počátkem souřadného systému. Dále je vypočtena úhlová rychlost odpovídající nastavené periodě. V daném okamžiku je poté konstruována nová přímka, která má směrnici podle vypočtené úhlové rychlosti a počátečního úhlu. Pro výpočet koeficientu ovlivňující zvolené barvy je použita Gaussova funkce.

$$f(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (20)$$

kde a je výška Gaussovy funkce (zvoleno 1), μ značí posun funkce ve směru kladné poloosy x (zvoleno 0), a σ je šířka kopce Gaussovy křivky ve výšce $a \cdot e^{-1/8}$ (zvoleno 8,5). Argumentem Gaussovy funkce je vzdálenost bodu od zkonstruované přímky.

Na obrázku 24 je zobrazena klávesnice se světelným motivem *Whirling*.



Obr. 24: Fotografie numerické klávesnice s aktivním motivem *Whirling*.

Čtvrtý motiv, *Breathing*, využívá k výpočtu koeficientu absolutní hodnotu funkce sinus.

$$f(t) = \left| \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} \right|, \quad (21)$$

Pátý světelný motiv, *Spiral*, představuje pohyb bodu po trajektorii určené druhem vybrané spirály a jejími parametry. Většinu použitých typů spirál lze popsat v polárním souřadném systému pomocí rovnice 22 [21]. Mezi tyto spirály patří například Fermatova spirála ($c = 2$), hyperbolická spirála ($c = -1$) a Archimedova spirála ($c = 1$)

$$r = a + b\varphi^{1/c}, \quad (22)$$

$$r = b \cdot e^{k \cdot \varphi}, \quad (23)$$

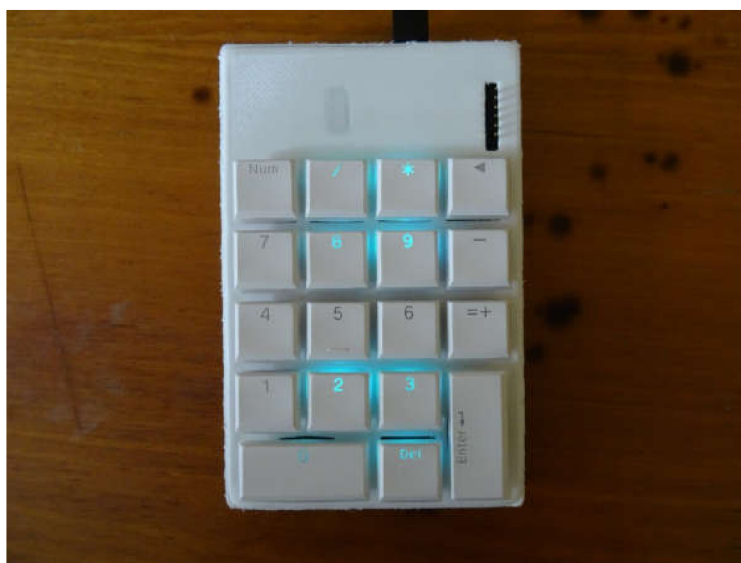
kde a , b , k jsou reálná čísla, r je vzdálenost bodu od počátku polárního souřadného systému a φ je úhel mezi vektorem z počátku do daného bodu od horizontální osy. Rovnice 23 je rovnice popisující logaritmickou spirálu v polárním souřadném systému (střed spirály je v počátku souřadného systému). Bod z polárního souřadného systému lze poté transformovat do kartézského souřadného systému pomocí rovnic 19 a 20.

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad (24)$$

$$y = r \cdot \sin\varphi, \quad (25)$$

V případě hyperbolické spirály je nutno ošetřit počáteční bod $\varphi = 0$, v kterém není spirála definována. V případě Fermatovy spirály je nutno zajistit, aby úhel φ nenabýval záporných hodnot.

Nejprve je proveden výpočet bodů spirály od $\varphi = 0$ do $\varphi = 4\pi$ rad a nazpět. Pro druhou polovinu periody je motiv převrácen kolem osy x. Motiv Fermatovy spirály zobrazuje obě větve spirály. Motiv opisující Fermatovu spirálu zobrazuje obrázek 25.



Obr. 25: Fotografie klávesnice s aktivním motivem *Spiral*.

Pro vytvoření nového motivu je nutné použít tlačítko *Create New* v záložce *Generate* a pro uložení nově vytvořeného profilu je nutno použít tlačítko *Save New*, jinak je vytvořený motiv odstraněn *garbage collectorem*, což je třída, která automaticky uvolňuje nevyužitou paměť. Vygenerované motivy lze kdykoliv upravit.

Vlastnosti vytvořených motivů (ať už vlastních nebo vygenerovaných) lze měnit v záložce *Properties*, lze zde měnit název, ID a v případě vlastních motivů i délku časového okna a periodu motivu. Pro uložení změn je nutné potvrdit změnu tlačítkem *Update Pattern*, jelikož vyhledávání motivů v paměti EEPROM probíhá pomocí identifikačního čísla, tudíž po stisku tlačítka je tato změna vynucena i v paměti EEPROM.

8.7 Komunikace s klávesnicí

Komunikaci s klávesnicí zajišťují třídy HIDClass a USB. Jelikož WPF přirozeně nepodporuje práci s USB, je nutné naimportovat některé funkce ze systémových knihoven, mezi tyto knihovny patří kernel32.dll, hid.dll a setupapi.dll. Pomocí funkce *WriteFile* knihovny Kernel32.dll lze přistupovat k USB komunikaci jako k běžnému souboru, jelikož pomocí funkce *WriteFile* zapisujeme pouze do příslušného zásobníku. Řadič HidUsb již zprostředkuje vlastní komunikaci. Jeden z hlavních parametrů potřebných pro vytvoření tohoto „souboru“ je řetězec cesty ke koncovému bodu daného zařízení tato cesta je řetězec tvořený identifikačním číslem výrobce, identifikačním číslem produktu a číslem rozhraní, které jsou definované v deskriptorech zařízení. V případě koncového bodu, který komunikuje s aplikací je to řetězec USB\VID_046D&PID_C221&MI_0001. Pro úspěšné odeslání zprávy je nutné, aby se shodovala délka pole, které je zapisováno do zásobníku včetně identifikačního čísla zprávy, délka zprávy je specifikována v deskriptoru zprávy.

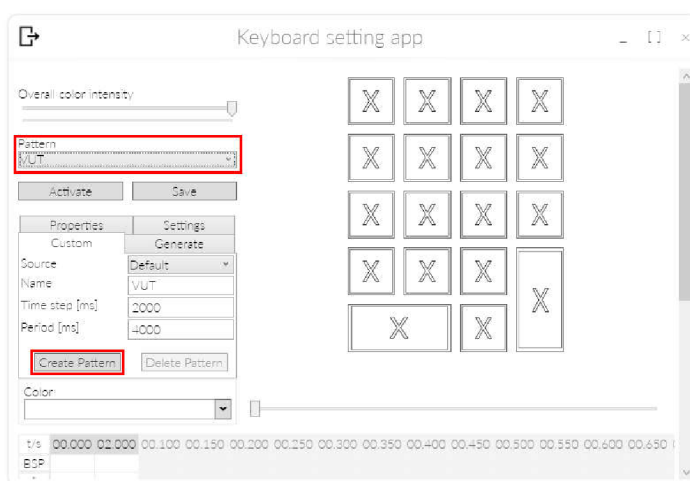
V rámci komunikace aplikace s klávesnicí byly vytvořeny tři druhy zpráv. Zpráva s hodnotou identifikačního čísla jedna je vyhrazena pro přenos hlavičky světelného motivu, který se bude následně přenášet, pomocí zprávy s hodnotou identifikačního čísla dva jsou po částech přenášeny jednotlivé rámce světelného motivu. Zprávy s hodnotou identifikačního čísla tři jsou vyhrazeny pro vykonání některých příkazů, soupis těchto příkazů je v tabulce 12.

Tabulka 12: Tabulka příkazů a hodnot USB zpráv.

ID zprávy	příkazu	Význam příkazu	Hodnota	Význam hodnoty
2	0-100	Index odesílaného rámce	0-1	Příznak horní/dolní poloviny rámce
3	0	Uložit poslední přijatý motiv do paměti	-	-
	1	Aktivovat světelný motiv	0-65535	Identifikační číslo světelného motivu
	2	Vymazat záznam o světelném motivu	0-65534	Identifikační číslo světelného motivu
			65535	Vymazat všechny záznamy o světelných motivech
	3	Nastavit intenzitu led	0-255	Hodnota intenzity
	4	Aktualizovat údaje o světelném motivu	0-65535	Identifikační číslo světelného motivu
	6	Nastavit dobu ošetření zákmitů	390-100000	Frekvence hodinového signálu pro integrované obvody MC14490

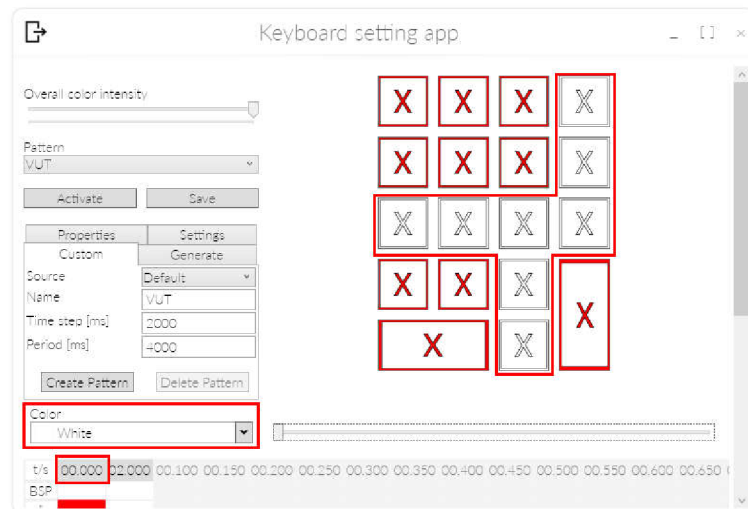
8.8 Návod k obsluze aplikace

Pro vytvoření vlastního motivu je nejprve nutno vybrat v záložce *Custom* zdrojový motiv z kterého bude nový motiv vycházet, pro čistý motiv je zde položka *Default*. Posléze je nutno zadat jméno motivu (*Name*), délku časového okna v ms (*Time step [ms]*) a periodu (*Period [ms]*). Pro statické motivy se musí shodovat délka časového okna a perioda. Po zadání požadovaných hodnot a zvolení zdrojového motivu je motiv vytvořen po stisku tlačítka *Create Pattern*. Aby byl nově vytvořený motiv vybrán pro editaci je nutné ho vybrat v kombinovaném poli *Pattern*. Na obrázku 26 je zobrazeno vytvoření alternujícího VUT loga, jež s periodou čtyři sekundy každé dvě vteřiny zamění červenou barvu za bílou a naopak.



Obr. 26: Tvorba alternujícího VUT loga.

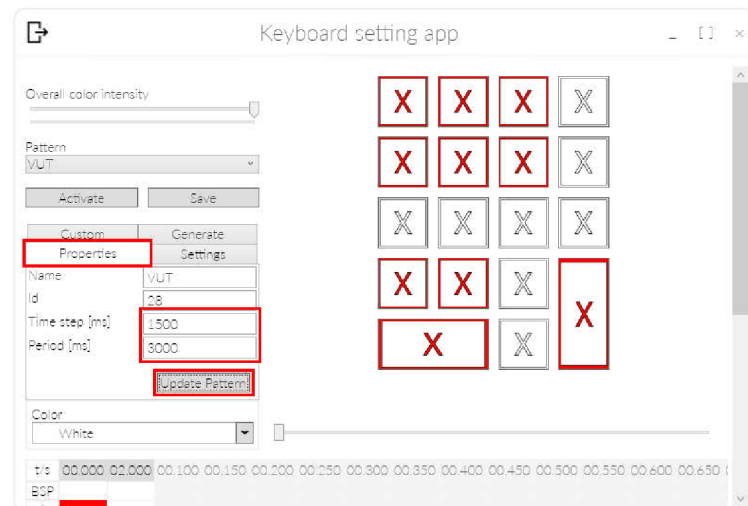
Dále je nutné vybrat výchozí barvu v editoru barev *Color*. Nejprve je vhodné vybrat barvu pozadí čili červenou barvu. Kliknutím na číslo rámece je aktivován daný rámeček pro úpravu (např. 00.000 pro rámeček od 0 do 2 vteřin), je-li daný rámeček již aktivní lze klikem na číslo rámeček přepínat mezi označením všech kláves rámeček nebo zrušením označení. Změnou výchozí barvy je změněna barva všech označených kláves v aktivním rámečku. Pro vytvoření pozadí VUT loga lze použít sekvenci: zvolit červenou barvu jako výchozí, kliknout na číslo rámeček 00.000 (aktivace rámeček), kliknout na číslo rámeček 00.000 (označení všech kláves), kliknout na číslo rámeček 00.000 (zrušení označení všech kláves), zvolit bílou barvu jako výchozí, označit klávesy BSP; -; +; 6; 3; DEL; 5; 4, kliknout na číslo rámeček 00.000 (zrušení označení všech kláves). Obdobnou sekvenci lze následně provést i pro druhý rámeček. Obrázek 27 zobrazuje nastavení prvního rámeček.



Obr. 27: Nastavení vzoru prvního rámce.

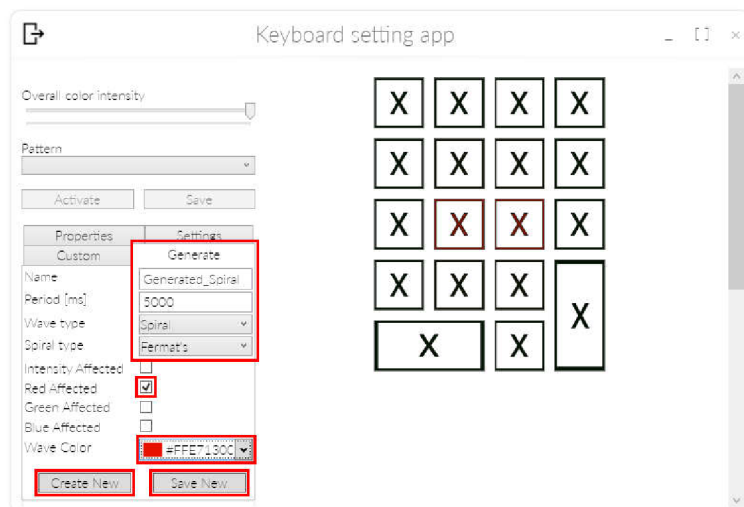
Pro odeslání hotového světelného motivu do klávesnice (je nutné, aby byla klávesnice připojena) zmáčknout tlačítko *Save* a pro jeho aktivaci tlačítko *Activate*.

Pro změnu periody, délky časového okna, nebo názvu již existujícího světelného motivu lze buďto vytvořit nový motiv s tím že jako výchozí motiv (*Source*) bude zvolen daný motiv, nebo dané vlastnosti lze upravit v záložce *Properties*. Úpravu je nutné potvrdit tlačítkem *Update Pattern*. Obrázek 28 popisuje změnu periody a délky časového okna na postupně 1,5 a 3 sekundy.



Obr. 28: Změna periody světelného motivu VUT.

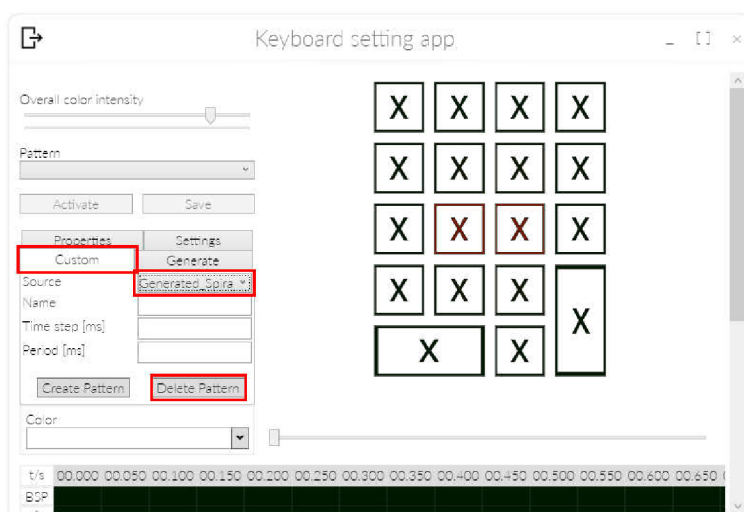
V rámci ukázky vygenerování nového motivu bude vytvořen motiv periodicky vykreslující obě větve Fermatovy spirály, přičemž pozadí motivu bude zelené a spirála



Obr. 30: Tvorba nového generovaného motivu.

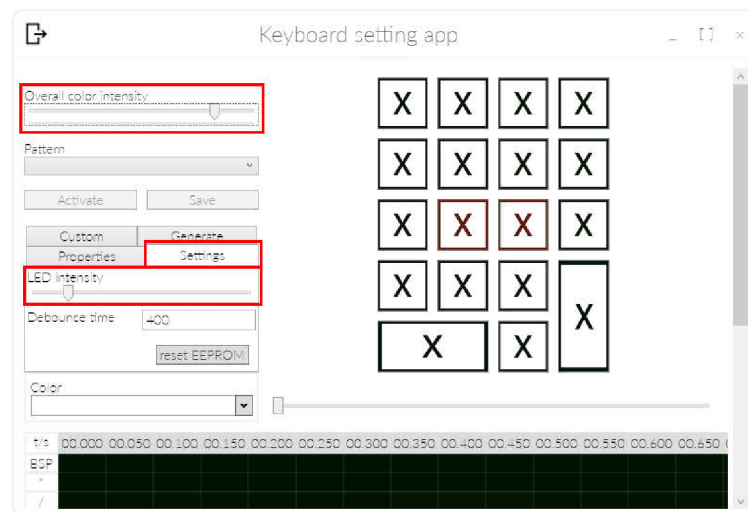
Pro vlastní úpravu vygenerovaného motivu je potřeba v záložce Custom vytvořit nový motiv na základě daného vygenerovaného motivu, jinak je generovaný motiv vždy znovu generován při aktivaci záložky *Generate* a dosavadní úpravy jsou smazány.

Pro smazání vytvořeného motivu z paměti aplikace a paměti EEPROM klávesnice je nutné daný motiv vybrat v záložce Custom jako výchozí motiv a odstranit ho stiskem tlačítka *Delete Pattern* (pro vymazání světelného motivu je potřeba, aby klávesnice byla připojena k počítači). Obrázek 31 zobrazuje mazání světelného motivu Generated_Spiral z paměti aplikace a EEPROM. Pro vymazání všech motivů z paměti EEPROM lze použít tlačítko *reset EEPROM* v záložce Settings.



Obr. 31: Odstranění světelného motivu z paměti aplikace a EEPROM klávesnice.

Nastavení intenzity podsvícení lze provést na dvou místech aplikace, jednak za pomoci posuvníku *Overall color intensity* nebo v záložce *Settings* pomocí posuvníku *LED intensity*, nicméně druhé nastavení intenzity zkresluje zbarvení podsvícení, jelikož nejvíce ovlivňuje červenou složku podsvícení. Proto je toto nastavení doporučeno pouze pro nastavení barevní palety. Optimální hodnota posuvníku *LED intensity* je 3-5, jelikož při této intenzitě je stále do jisté míry zachována bílá barva, při vyšších hodnotách intenzit přechází spíše do oranžové barvy. Obrázek 32 zobrazuje úpravu intenzity podsvícení pomocí aplikace.



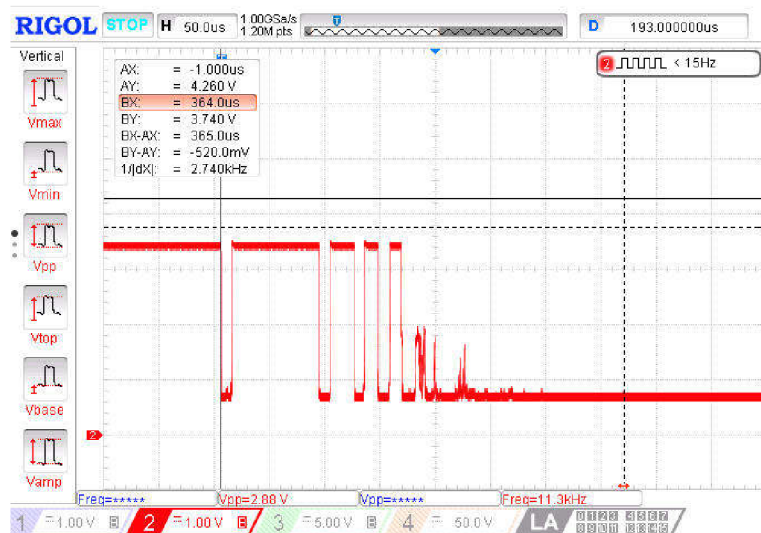
Obr. 32: Nastavení podsvícení klávesnice.

Přizpůsobení doby ošetření zákmitů tlačítka lze nastavit v záložce *Settings* v položce *Debounce time*. Na obrázku 32 lze vidět, že aktuálně je nastavena doba ošetření zákmitů 400 μ s, což odpovídá frekvenci hodinového signálu pro časování integrovaného obvodu MC14490 10 kHz.

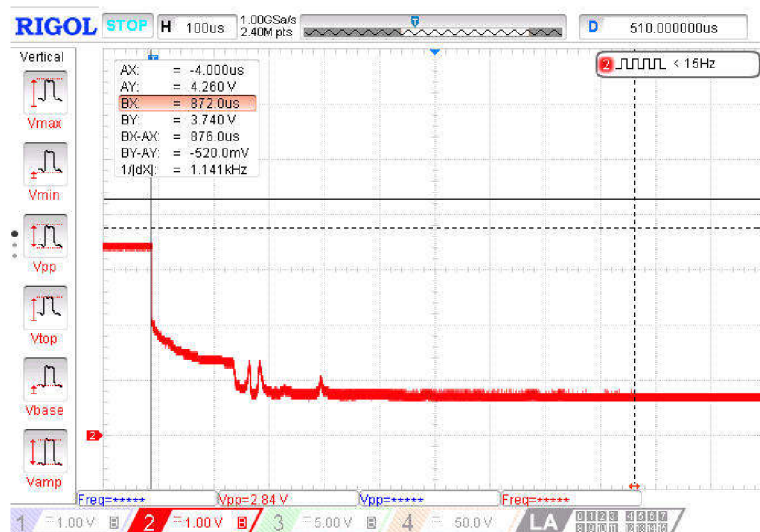
9 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK SPÍNAČŮ

V rámci semestrální práce byla vytvořena testovací klávesnice, která využívala maticovou detekci stisknutí spínače, popisovanou v kapitole 3.2 a pro potlačení efektu zákmitů využívala softwarové ošetření popisované v kapitole 2.2. Tato testovací klávesnice obsahovala čtyři spínače, z nichž dva spínače byly typu Kailh low profile red a zbylé dva spínače byly typu Kailh low profile brown čili popořadě dva lineární a dva taktilní mechanické spínače.

Na tomto přípravku byly změřeny spínací charakteristiky pro účely nastavení vhodného časování softwarového ošetření zákmitů, pro každý typ spínače bylo provedeno deset měření a z nich byla vypočítána přibližná doba odeznění zákmitů. Na obrázku 33 a 34 jsou zobrazeny měřené průběhy zákmitů výše zmíněných spínačů.



Obr. 33: Průběh zákmitů spínače Kailh low profile brown měřený osciloskopem.



Obr. 34: Průběh zákmitů spínače Kailh low profile red měřený osciloskopem.

Z měřených hodnot byly poté vypočteny střední hodnoty a směrodatná odchylka. Tabulky 13 a 14 zobrazují měřené hodnoty dob odeznění zákmitů taktilních a lineárních spínačů. Měřená doba odeznění zákmitů taktilních spínačů je tedy $299,5 \pm 35,16 \mu\text{s}$ a lineárních spínačů $906 \pm 72 \mu\text{s}$.

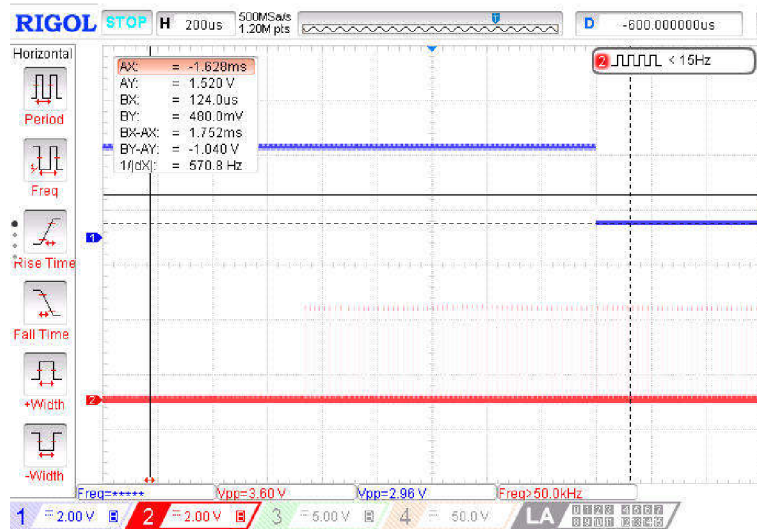
Tabulka 13: Měřené doby odeznění zákmitů taktilních spínačů Kailh low profile brown.

měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Doba odeznění zákmitů [μs]	252	260	259	298	352	333	299	316	337	289

Tabulka 14: Měřené doby odeznění zákmitů lineárních spínačů Kailh low profile red.

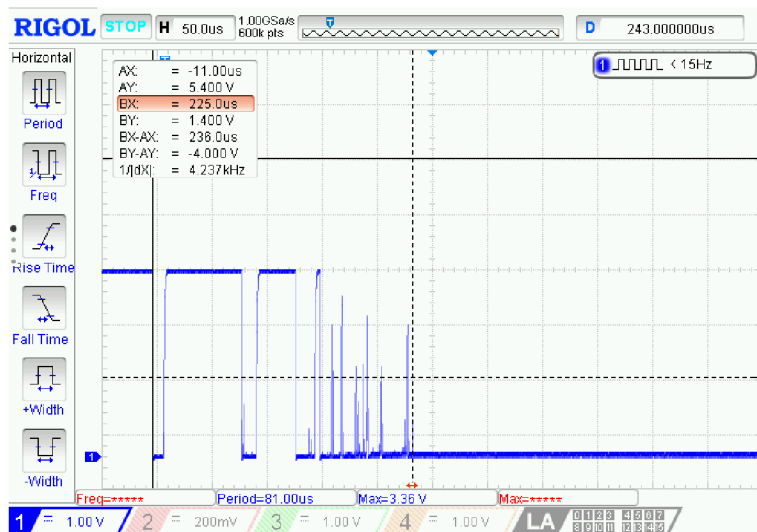
měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Doba odeznění zákmitů [μs]	810	826	904	984	932	888	954	1040	846	876

Dále bylo provedeno měření doby od stisku spínače po softwarové vyhodnocení stisku spínače, průběh tohoto měření je zobrazen na obrázku 35. Změna napěťové úrovně modrého signálu představuje softwarové vyhodnocení stisku tlačítka, krátké impulzy červeného signálu signalizují že dochází ke skenování spínačů klávesnice, počátek těchto impulzů lze tedy považovat za dobu stisknutí spínače. Tato doba byla přibližně $1060 \mu\text{s}$.



Obr. 35: Průběhy zobrazující dobu vyhodnocení stisku spínače na maticové klávesnici.

Pro klávesnici vyrobenou v rámci diplomové práce byly zvoleny taktilní spínače Kailh low profile burnt orange, jelikož z předchozích průběhů se konstrukce taktilních spínačů ukázala jako méně náchylná na záškrtí způsobené elastickými silami. U daných spínačů byla změřena délka a průběh záškrtí. Tento průběh lze vidět na obrázku 36. Délka tohoto záškrtí byla přibližně 236 μ s, což je obdobná hodnota jako v případě spínačů Kailh low profile brown, které jsou také taktilní.



Obr. 36: Průběh záškrtí spínače Kailh low profile burnt orange měřený osciloskopem.

Aby byly obě metody detekce stisku tlačítka porovnány byly změřeny doby od stisku spínače po vyhodnocení stisknutého spínače i u nově navržené klávesnice. Tento průběh zobrazuje obrázek 37 a měřené hodnoty jsou v tabulce 15.



Obr. 37: Průběhy zobrazující dobu vyhodnocení stisku spínače na klávesnici s použitím integrovaných obvodů MC14490.

Tabulka 15: Měřené doby od stisku spínače po jeho vyhodnocení za použití integrovaného obvodu MC14490.

měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Doba odeznění zákmitů [μs]	676	652	546	666	690	510	498	622	584	516

Délka doby od stisku spínače až po jeho vyhodnocení za pomoci integrovaného obvodu MC14490 je přibližně $541,8 \pm 92,3 \mu\text{s}$, což je přibližně o $518 \mu\text{s}$ méně než v případě maticové detekce, nehledě na fakt, že doba vyhodnocení stisku u maticové klávesnice o 18 spínačích by byla větší než v případě testovací klávesnice o velikosti 2x2 spínače.

Jelikož detekce stisku všech spínačů není provedena pomocí řadiče externích přerušení, ale tři spínače jsou převedeny pomocí převodních tabulek a systému událostí na přerušení vyvolané časovačem, je nutno ověřit, že tímto převodem nevzniklo příliš velké zpoždění. Pro toto měření byl použit spínač detekovaný na pinu PA_17, jelikož sdílí převodní tabulku s pinem PA_18, tudíž doba vyhodnocení stisku těchto dvou spínačů by měla být delší než v případě pinu PB_10, který nesdílí převodní tabulku s jiným pinem. Měřené doby od stisku spínače po jeho vyhodnocení pro piny PA_17 a PA_18 jsou v tabulce 16. Tato doba je přibližně $724,4 \pm 90,5 \mu\text{s}$, což je o 25 % více než v případě pinů detekovaných řadičem externích přerušení. Tento nárůst může být částečně způsoben i faktem, že působící síla na spínače není ve všech případech stejná.

Tabulka 16: Měřené doby od stisku spínače po jeho vyhodnocení za použití integrovaného obvodu MC14490 pro piny PA_17 a PA_18.

měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Doba odeznění zákmitů [μs]	632	584	748	772	888	636	732	784	780	688

Dále bylo provedeno měření délky doby od stisku spínače až po potvrzující paket od hostitele o přijetí zprávy. Jelikož full-speed USB sběrnice klávesnice má periodu dotazování 1 ms, značně záleží na okamžiku, v kterém bylo tlačítko vyhodnoceno. Z tohoto důvodu bylo provedeno více měření než v případě měření délky zákmitů a doby detekce stisku integrovaným obvodem MC14490. Naměřené hodnoty lze vidět v tabulce 17. Pro změřené údaje byla dále vypočtena směrodatná odchylka jako v předchozích měřeních. Délka doby od stisku spínače po obdržení potvrzujícího paketu je přibližně $1045,2 \pm 344,4 \mu\text{s}$, což je téměř dvakrát více než je doba od stisku spínače po jeho vyhodnocení.

Tabulka 17: Naměřené doby t od stisku spínače po potvrzující paket.

měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t [μs]	876	1368	536	764	548	652	1656	828	860	1188
měření	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t [μs]	836	1624	1104	1304	1292	1292	684	980	1492	1020

Naměřené doby od stisku spínače po potvrzující paket pro piny PA_17 a PA_18 popisuje tabulka 18. Tato doba je přibližně $1339,3 \pm 282,5 \mu\text{s}$, což je přibližně o 22 % více než u spínačů detekovaných řadičem externích přerušení.

Tabulka 18: Naměřené doby t od stisku spínače po potvrzující paket pro piny PA_17 a PA_18.

měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t [μs]	1604	1084	716	1040	1376	1368	1454	1636	1332	1032
měření	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t [μs]	1744	1572	1212	1468	1652	1636	1244	836	1408	1372

10 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byly popsány typy a vlastnosti spínačů, způsoby ošetření zákmitů, které vznikají působením elastických sil kontaktů při spínání a možné způsoby detekce stisku klávesnic. Na základě těchto poznatků bylo zvoleny vhodné spínače pro realizace prototypu klávesnice. Stěžejním požadavkem pro výběr spínačů bylo provedení s nízkým profilem, na základě tohoto požadavku byly provedeny měření pro porovnání doby zákmitů u taktilních a lineárních spínačů.

Nejdříve byl navržen program pro obsluhu navrženého obvodu, který zpracovává informace o stavech spínačů numerické klávesnice. Pro detekci stisku spínače byl využit způsob maticové detekce. Obslužný program softwarově ošetřoval zákmity spínačů. Na tomto testovacím obvodu bylo provedeno i měření doby zákmitů lineárních a taktilních nízkoprofilových spínačů Kailh. Tyto spínače měli měřenou dobu zákmitů popořadě $299 \pm 35 \mu\text{s}$ a $906 \pm 72 \mu\text{s}$. Na základě těchto měření byly zvoleny taktilní spínače jako vhodnější pro realizaci klávesnice. Dále byly do tohoto měření zahrnuty taktilní spínače s vyšší aktivační silou, které měly naměřenou dobu zákmitů přibližně $236 \mu\text{s}$. Následně bylo provedení měření doby od stisku spínače až po jeho softwarové vyhodnocení. V případě maticové detekce a softwarového ošetření zákmitů byla naměřena doba detekce stisku spínače přibližně $1060 \mu\text{s}$.

Na základě dlouhé doby detekce stisku v případě softwarového ošetření a maticového uspořádání spínačů byla navržena klávesnice využívající k ošetření zákmitů integrované obvody MC14490. Hlavní výhodou tohoto hardwarového způsobu ošetření zákmitů je možnost změny citlivosti detekce zákmitů bez nutnosti měnit součástkovou základnu. Pro tuto klávesnici byly posléze provedena měření, jak od stisku spínače až po jeho softwarové vyhodnocení, tak od stisku spínače až po obdržení potvrzujícího paketu o doručení od hostitele. V případě doby po softwarové vyhodnocení byla naměřena doba přibližně $541 \pm 92 \mu\text{s}$, což je o 51 % méně než v případě maticové detekce a softwarovém ošetření zákmitů. V případě, kdy bylo zahrnuto i odeslání zprávy o stisku byla naměřena doba $1045 \pm 344 \mu\text{s}$. Nárůst doby detekce je způsoben dotazovací frekvencí hostitele, která je v případě full-speed komunikace nejvýše 1 kHz. Pro další snížení této doby by bylo nutné vybrat mikrokontrolér, který podporuje vyšší rychlost sběrnice USB 2.0 nebo podporuje vyšší verze sběrnice USB (3.0 a výše).

V rámci diplomové práce byla vytvořena aplikace pro operační systém Windows, která jednosměrně komunikuje s klávesnicí a lze přes ní nastavovat některé parametry jako například citlivost detekce stisku spínače. Dále je možné pomocí této aplikace vytvářet statické i proměnlivé světelné motivy pro podsvícení klávesnice. Mezi proměnlivé světelné motivy spadají motivy generované na základě vstupních požadavků jako například výchozí barva nebo perioda motivu. V aplikaci bylo vytvořeno 5 typů generovaných motivů z toho první dva motivy reprezentují průběh funkce sinus, třetí motiv reprezentuje rotaci přímky ve středu klávesnice, čtvrtý motiv reprezentuje „dýchání barvy“ a pátý motiv reprezentuje pohyb bodu na klávesnici ve spirálovitých útvarech.

Na základě návrhu klávesnice byl poté vytvořen funkční prototyp podsvícené numerické klávesnice a vytvořen 3D model schránky pro klávesnici. Na tomto prototypu byla realizována některá již výše zmíněná měření doby odezvy klávesnice na stisk spínače.

V rámci diplomové práce bylo dosaženo stanovených cílů, tato práce může být předlohou pro návrh herních zařízení, kde je kladen důraz jak na nízkou odezvu při stisku spínače, tak na vizuální zpracování, v tomto případě podsvícení spínačů.



Obr. 38: Fotografie prototypu numerické klávesnice.

LITERATURA

- [1] Portál meckeys.com. My favourite CHERRY MX switch [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.meckeys.com/wp-content/uploads/2019/01/CherryBlue.gif>.
- [2] Portál cdn.shopify.com. [online]. 2016-06-07 [cit. 2019-12-12].
- [3] FIJALKOWSKI, B. T. *Mechatronics: Dynamical systems approach and theory of holors*; IOP: Bristol, UK, 2016 [cit. 2019-12-12]. 557 s. ISBN 978-0-7503-1350-6.
- [4] GANSSLE, J. G. A guide to debouncing. [online]. Rev. 3. 6-2008. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://my.eng.utah.edu/~cs5780/debouncing.pdf>.
- [5] USB.ORG. Device Class Definition for Human Interface Devices (HID) [online]. Usb.org. 27. 6. 2001 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: https://www.usb.org/sites/default/files/documents/hid1_11.pdf.
- [6] USB.ORG. Universal Serial Bus Specification [online]. Usb.org. Rev 2.0, 27. 6. 2000 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.usb.org/document-library/usb-20-specification>.
- [7] THE LAB BOOK PAGES. Debounce circuit [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.labbookpages.co.uk/electronics/files/debounce/debounceCircuit.png>.
- [8] MICROCHIP. SAM L21 Family Data Sheet [online]. 2017-06-15 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/60001477A.pdf>.
- [9] STMICROELECTRONICS. VERY LOW DROP VOLTAGE REGULATORS WITH INHIBIT [online]. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.330-165.1.pdf>.
- [10] LEVEK, V. MNEN: vstupní a výstupní ovládací prvky [online]. 2017 [cit. 2019-12-12].
- [11] IQD FREQUENCY PRODUCTS. Quartz Crystal Specification V1.00014 [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/741/LFXTAL036391Bulk-998594.pdf>.
- [12] TAIWAN SEMICONDUCTOR. TS1117B Series [online]. 2018-07-18 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/395/TS1117B_H1607-1114639.pdf.
- [13] ON SEMICONDUCTOR. MC14490-Hex Contact Bounce Eliminator [online]. 2013-05-24 [cit. 2020-05-31] Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC14490-D.PDF>.
- [14] ATMEL CORPORATION. AT24CM02 [online]. 2018-08-09 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/Atmel-8828-SEEPR0M-AT24CM02-Datasheet-1398087.pdf>.
- [15] BLACKWELL, G. *The Electronic Packaging Handbook* [online]; CRC Press, 2017 [cit. 2020-05-30].
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. I2C Bus Pull-Up Resistor Calculation [online]. 2018-06-28 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva689/slva689.pdf?ts=1590092284193>.
- [17] NXP SEMICONDUCTORS. UM10204 I2C-bus specification and user manual [online]. 2014-04-07 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
- [18] JAN SYCHRA. Úvod do databázových systémů [online]. 2005-09-06 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.fi.muni.cz/~xdohnal/lectures/PB154/czech/zezula11.pdf>.

- [19] ANGELSIX LTD. Fasetto-word [online]. Konverzační aplikace. Dostupné z: <https://github.com/angelsix/fasetto-word>.
- [20] Portál e-fyzika.cz. Vlnění [online]. 2009-01-10 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.e-fyzika.cz/kapitoly/16-vlneni.pdf>.
- [21] LORENZO, Carl F. a T. T. HARTLEY. The fractional trigonometry: with applications to fractional differential equations and science. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 1119139406.
- [22] Portál history-computer.com. Keyboard [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://history-computer.com/ModernComputer/Basis/keyboard.html>.
- [23] DŘÍNOVSKÝ, J, FRÝZA, T, RŮŽEK, V, ZACHAR, J. Elektromagnetická kompatibilita. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, Technická 12, 616 00 Brno, 2017. [cit. 2020-05-31].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Závislost síly potřebné pro stisk spínače v závislosti na uražené dráze (převzato a upraveno z [2]).	2
Obr. 2: Zjednodušené schéma spínače mechanické membránové klávesnice.	3
Obr. 3: Průřez mechanického spínače Cherry MX s proklikem (převzato a upraveno z [1]).	3
Obr. 4: Průřez kapacitním spínačem (převzato a upraveno z [3]).	5
Obr. 5: Zapojení jednopólového spínače pro odstranění zákmitů (převzato z [7]).	6
Obr. 6: Schéma binárně kódované klávesnice (převzato z [10]).	8
Obr. 7: Schéma zapojení matice pro detekci stisku spínače (převzato a upraveno z [10]).	9
Obr. 8: Zobrazení hierarchie deskriptorů (převzato z [5]).	13
Obr. 9: Stavový automat popisující stav sběrnice z pohledu zařízení v modu Master. (převzato a upraveno z [8]).	18
Obr. 10: Příklad komunikace na sběrnici (převzato a upraveno z [14]).	18
Obr. 11: Schéma zapojení lineárního regulátoru TS1117B (převzato z [9]).	22
Obr. 12: Schéma zapojení paměti EEPROM.	24
Obr. 13: Schéma zapojení chytré LED APA102.	25
Obr. 14: Částečné schéma vnitřního zapojení ESD ochrany DVIULC6+4SC6Y.	26
Obr. 15: Schéma zapojení ESD ochrany DVIULC6-4SC6Y.	27
Obr. 16: Schéma zapojení mikrokontroléru ATSAML21G18B.	28
Obr. 17: Srovnání hodinového signálu v pořadí prvního (modrý) a třetího (červený) integrovaného obvodu MC14490.	29
Obr. 18: Zjednodušené schéma propojení modulů mikrokontroléru a okolních zařízení.	30
Obr. 19: Logické rozdělení aplikace.	34
Obr. 20: Zobrazení segmentu časové osy aplikace.	36
Obr. 21: Fotografie klávesnice s aktivním statickým motivem.	37
Obr. 22: Fotografie klávesnice s kativovaným motivem Radial.	38
Obr. 23: Fotografie klávesnice s aktivním motivem Linear.	39
Obr. 24: Fotografie numerické klávesnice s aktivním motivem Whirling.	40
Obr. 25: Fotografie klávesnice s aktivním motivem Spiral.	41
Obr. 26: Tvorba alternujícího VUT loga.	43
Obr. 27: Nastavení vzoru prvního rámce.	44
Obr. 28: Změna periody světelného motivu VUT.	44

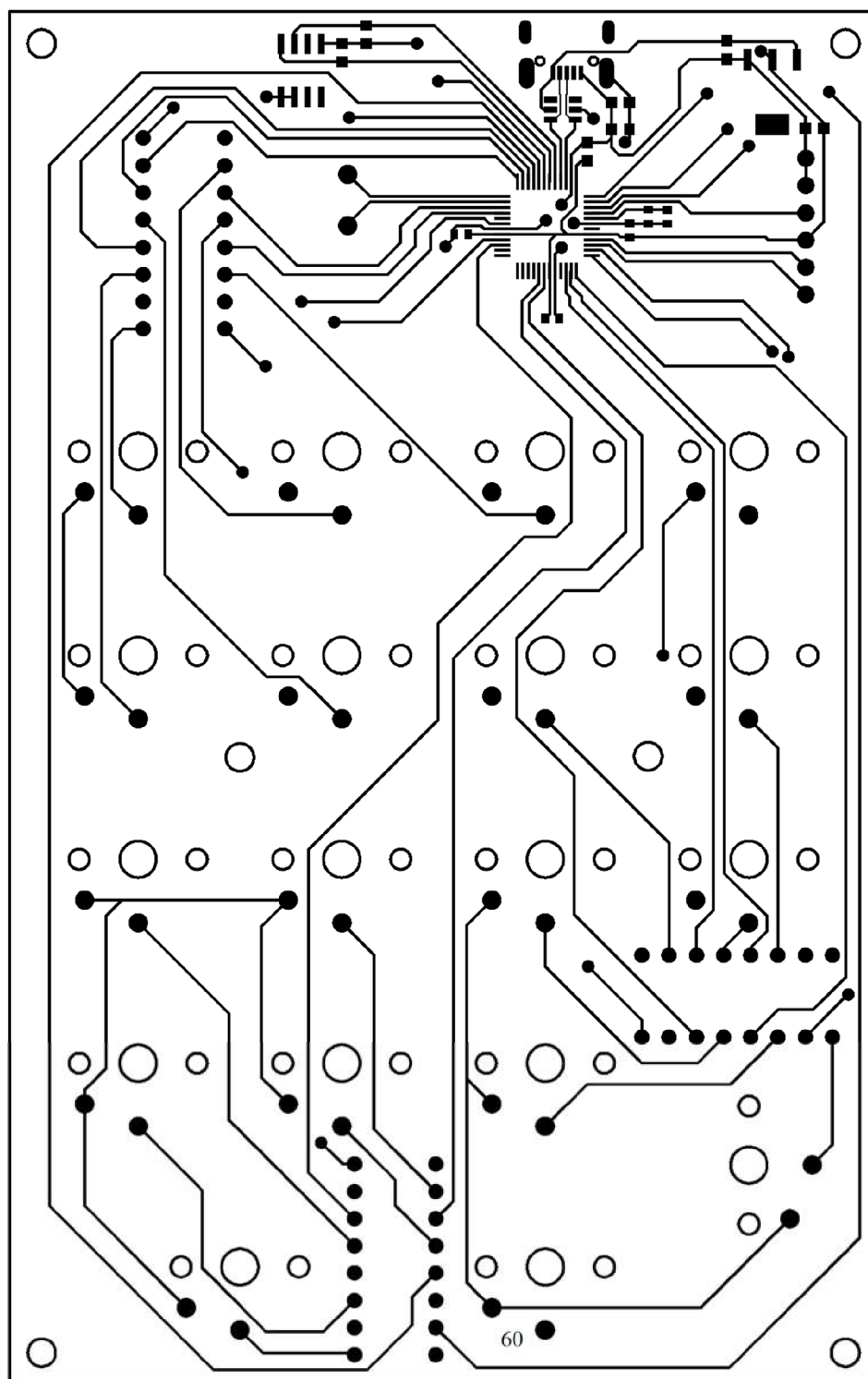
Obr. 29: Volba barvy generovaného motivu.	45
Obr. 30: Tvorba nového generovaného motivu.	46
Obr. 31: Odstranění světelného motivu z paměti aplikace a EEPROM klávesnice.	46
Obr. 32: Nastavení podsvícení klávesnice.	47
Obr. 33: Průběh zákmitů spínače Kailh low profile brown měřený osciloskopem.	48
Obr. 34: Průběh zákmitů spínače Kailh low profile red měřený osciloskopem.	49
Obr. 35: Průběhy zobrazující dobu vyhodnocení stisku spínače na maticové klávesnici.	50
Obr. 36: Průběh zákmitů spínače Kailh low profile burnt orange měřený osciloskopem.	50
Obr. 37: Průběhy zobrazující dobu vyhodnocení stisku spínače na klávesnici s použitím integrovanych obvodů MC14490.	51

SEZNAM TABULEK

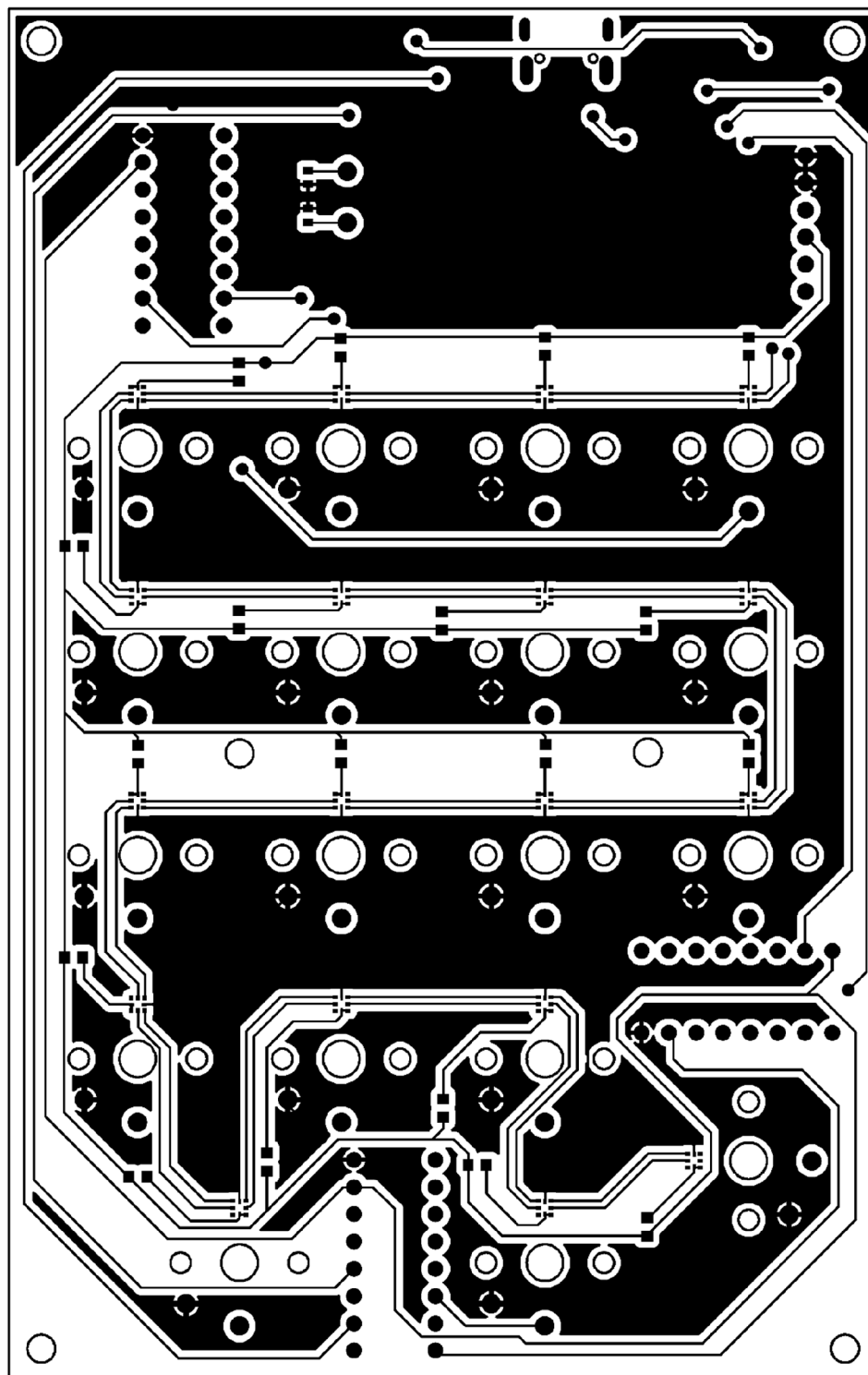
Tabulka 1: Porovnání parametrů některých značek mechanických spínačů.	4
Tabulka 2: Kódování spínačů v závislosti na napěťové úrovni na vstupech A, B a C.	9
Tabulka 3: Seznam předmětů, které musí obsahovat každý deskriptor zprávy [5].	14
Tabulka 4: Reprezentace příkladového deskriptoru koncového bodu.	15
Tabulka 5: Bytová reprezentace příkladového deskriptoru zprávy (převzato a upraveno z [5]).	16
Tabulka 6: Formát I ² C komunikace při sekvenčním zápisu.	19
Tabulka 7: Formát I ² C komunikace při sekvenčním čtení.	19
Tabulka 8: Formát I ² C komunikace v kombinaci sekvenčního zápisu a čtení.	19
Tabulka 9: Srovnání jednotlivých kategorií rychlostí I ² C.	21
Tabulka 10: Struktura LED_PATTERN definující světelný motiv.	32
Tabulka 11: Struktura pole záznamů o světelných motivech uložených v paměti EEPROM.	33
Tabulka 12: Tabulka příkazů a hodnot USB zpráv.	42
Tabulka 13: Měřené doby odeznění zákmitů taktálních spínačů Kailh low profile brown.	49
Tabulka 14: Měřené doby odeznění zákmitů lineárních spínačů Kailh low profile red.	49
Tabulka 15: Měřené doby od stisku spínače po jeho vyhodnocení za použití integrovaného obvodu MC14490.	51
Tabulka 16: Měřené doby od stisku spínače po jeho vyhodnocení za použití integrovaného obvodu MC14490 pro piny PA_17 a PA_18.	52
Tabulka 17: Naměřené doby t od stisku spínače po potvrzující paket.	52
Tabulka 18: Naměřené doby t od stisku spínače po potvrzující paket pro piny PA_17 a PA_18.	52

A NÁVRH DESKY

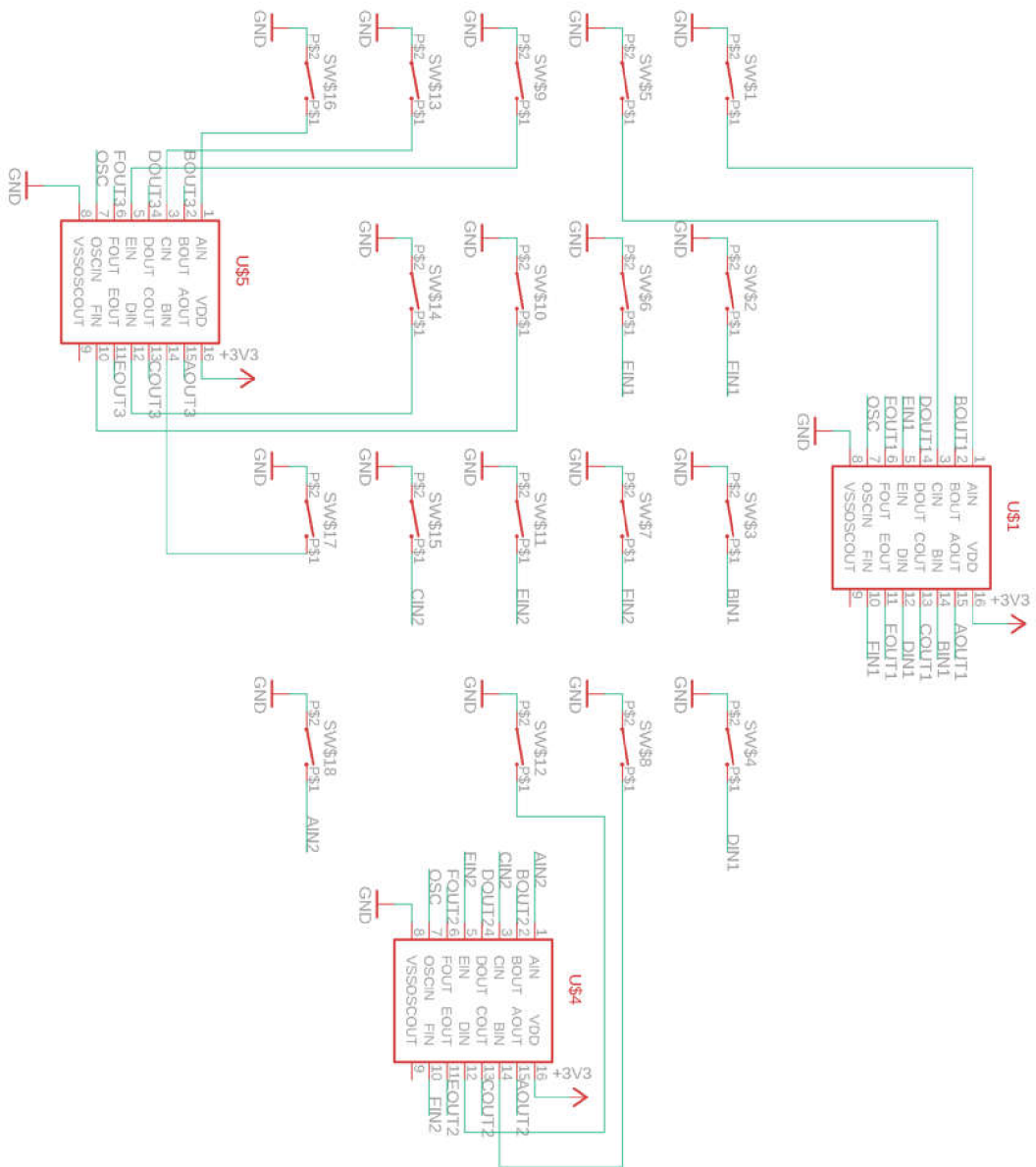
A.1 Spodní strana



A.2 Horní strana



B.2 Spínače



B.3 podsvícení

