



## Bakalářská práce

# Výuková experimentální deska s kontrolérem řady STM32

*Studijní program:*

B0714A270001 Mechatronika

*Autor práce:*

**Martin Jozífek**

*Vedoucí práce:*

Ing. Miroslav Holada, Ph.D.

Ústav informačních technologií a elektroniky

Liberec 2023



## Zadání bakalářské práce

# Výuková experimentální deska s kontrolérem řady STM32

<i>Jméno a příjmení:</i>	<b>Martin Jozífek</b>
<i>Osobní číslo:</i>	M21000216
<i>Studijní program:</i>	B0714A270001 Mechatronika
<i>Zadávací katedra:</i>	Ústav infomačních technologií a elektroniky
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s MCU řady STM32, zaměřte se na model s velkým výpočetním výkonem (max. RAM a taktovací frekvence) a úsporným provozem (Low Power).
2. Seznamte se s dostupnými rozhraními a periferiemi pro realizaci (USB, JTAG, I2C, napájecí modul, externí paměť, displej, PMOD I2S2 a další). Seznamte se se stavebnicemi RC Didactik a Hardwario, které jsou na pracovišti školitele.
3. Navrhněte výukovou experimentální desku kompatibilní se stavebnicemi na pracovišti školitele. V návrhu pracujte s minimálně čtyř-vrstvou deskou plošných spojů (DPS). Výsledný návrh nechte vyrobit.
4. Prototyp osadte a otestujte základní funkcionalitu. Napište testovací firmware, který ověří, zda prototyp funguje správně.
5. Diskutujte zvolené řešení, případná budoucí uplatnění a vylepšení.

*Rozsah grafických prací:* Dle potřeby dokumentace  
*Rozsah pracovní zprávy:* 30–40 stran  
*Forma zpracování práce:* Tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

**Seznam odborné literatury:**

- [1] ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN – technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [2] [www.st.com](http://www.st.com)
- [3] Noviello, Carmine. Mastering STM32 – Second Edition: A step-by-step guide to the most complete ARM Cortex-M platform, using the official STM32Cube development environment; <http://leanpub.com/mastering-stm32-2nd> ; published on 2022-02-13

*Vedoucí práce:* Ing. Miroslav Holada, Ph.D.  
Ústav infomačních technologií a elektroniky

*Datum zadání práce:* 20. října 2023  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 14. května 2024

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Černoorský, Ph.D.  
garant studijního programu

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

14. května 2024

Martin Jozífek

# Výuková experimentální deska s kontrolérem řady STM32

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem výukové experimentální desky s kontrolérem řady STM32.

Deska plošných spojů obsahuje řadu rozhraní, periférií a dalších komponent. Na spodní části desky jsou umístěny hřebeny sloužící k propojení s modulem Domino, zatímco na horní části se nachází USB typu C, konektor JTAG, konektor PMOD, programovatelné tlačítko, resetovací tlačítko, tři programovatelné LED diody a konektory pro využití zbylých pinů, které se nevyužijí pro propojení s modulem Domino.

Úvod práce detailně představuje obsah celé bakalářské práce. Teoretická část se věnuje analýze dostupných mikroprocesorů a detailnímu představení periférií, rozhraní a dalších komponent. Následující část práce se zabývá pravidly návrhu a možnostmi výroby desky plošných spojů. Konkrétní postup návrhu a řešení desky je popsán s ohledem na jejich aplikovatelnost a možné zlepšení.

## Klíčová slova

STM32, USB, MCU, DPS

# Educational experimental board with STM32 series controller

## Abstract

This bachelor's thesis is focused on the design of an educational experimental board with STM32 series controller.

The printed circuit board contains a variety of interfaces, peripherals, and other components. On the bottom part of the board, there are connectors used for connection with the Domino module, while the top part features a USB type C port, JTAG connector, PMOD connector, programmable button, reset button, three programmable LED diodes, and connectors for utilizing the remaining pins, which are not used for connection with the Domino module.

The introduction of the thesis provides a detailed overview of the entire bachelor's thesis. The theoretical part analyzes available microprocessors and presents peripherals, interfaces, and other components in detail. The following section of the thesis is focused on design rules and options for PCB manufacturing. The specific design process and solutions for the board are described with consideration to their applicability and potential improvements.

## Keywords

STM32, USB, MCU, PCB

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Miroslavovi Holadovi, Ph.D. a konzultantovi práce Ing. Leošovi Petržílkovi za čas a poskytnuté rady, které mi pomohly k tvorbě a dokončení této práce.

# Obsah

Úvod.....	13
<b>Teoretická část .....</b>	<b>14</b>
<b>1 Mikroprocesory STM32 .....</b>	<b>14</b>
1.1 STM32 s vysokým výpočetním výkonem .....	14
1.1.1 Řady STM32 s vysokým výkonem.....	15
1.1.2 Využití STM32 s vysokým výkonem.....	16
1.2 STM32 s vysokou úsporou energie .....	16
1.2.1 Řady STM32 s vysokou úsporou energie .....	17
1.2.2 Využití STM32 s vysokou úsporou energie .....	18
1.3 Pouzdra pro integrované obvody .....	18
1.3.1 Povrchově montované součástky .....	19
1.3.2 Pouzdra BGA .....	19
1.3.3 Pouzdra QFP .....	20
1.3.4 Pouzdra QFN .....	21
<b>2 Rozhraní a periferie .....</b>	<b>23</b>
2.1 Univerzální sériová sběrnice.....	23
2.1.1 Konektory USB.....	23
2.1.2 Rychlosti přenosu USB .....	25
2.1.3 Výhody USB .....	25
2.1.4 Nevýhody USB .....	25
2.1.5 Porovnání rychlostí přenosu USB.....	26
2.1.6 Datové a napájecí role USB.....	26
2.2 Standard JTAG.....	27
2.2.1 Testovací přístupový port.....	27
2.2.2 Ovládací signály.....	27
2.2.3 Práce s JTAG.....	28
2.3 Sběrnice I2C .....	28
2.3.1 Jak funguje I2C .....	29
2.3.2 Výhody a nevýhody I2C .....	30
2.4 Rozhraní PMOD I2S.....	30
2.4.1 Vlastnosti PMODu I2S .....	30
2.4.2 Signály PMODu I2S .....	31
<b>3 Další komponenty zapojené na DPS.....</b>	<b>32</b>
3.1 Lineární stabilizátor napětí .....	32



3.1.1	Vlastnosti LDL1117.....	32
3.1.2	Využití LDL1117 .....	32
3.1.3	Vnitřní Schéma LDL1117.....	33
3.1.4	Zapojení LDL1117.....	33
3.2	Krystaly.....	33
3.2.1	Popis funkce oscilátorů a jejich porovnání .....	34
3.2.2	Umístění krystalu na DPS.....	34
3.2.3	Trasování (routování) krystalu.....	35
3.2.4	Příklad návrhu oscilátoru na DPS.....	35
3.2.5	Příklad opravy návrhu, nerespektující pravidla návrhu .....	36
<b>4</b>	<b>Pravidla návrhu DPS.....</b>	<b>37</b>
4.1	Požadavky pro návrh DPS.....	37
4.1.1	Dimenzování obvodu (proudové, frekvenční).....	37
4.1.2	Realizovatelnost výroby.....	37
4.1.3	Dostupnost .....	38
4.2	Trasování (routování) DPS.....	38
4.2.1	Pravidla a omezení při trasování DPS .....	38
4.2.2	Schopnosti výrobců v oblasti výroby DPS .....	39
4.2.3	Pravidla návrhu napájecí a zemní roviny .....	40
<b>5</b>	<b>Možnosti výroby DPS .....</b>	<b>41</b>
5.1	3D tisk.....	41
5.1.1	Výhody.....	41
5.1.2	Nevýhody:.....	41
5.2	CNC Frézování a leptání .....	42
5.2.1	Řízení odpadů .....	42
	<b>Praktická část .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>Návrh prototypu DPS .....</b>	<b>43</b>
6.1	Rozměry DPS .....	43
6.2	Výběr MCU .....	44
6.2.1	Popis MCU řady STM32U575xx .....	44
6.3	Počet vrstev DPS .....	45
6.4	Návrh čárového schématu DPS .....	45
6.4.1	Požadavky pro návrh schématu .....	46
6.4.2	Postup návrhu čárového schématu.....	46
6.5	Trasování a umístění součástek .....	47
6.5.1	Omezení návrhu pro realizaci výroby.....	47

6.5.2	Postup návrhu schématu .....	48
6.6	Řešení .....	49
<b>7</b>	<b>Návrh finální DPS .....</b>	<b>50</b>
7.1	Rozměry finální DPS .....	50
7.2	Výběr MCU .....	50
7.2.1	Popis MCU řady STM32F765xx .....	50
7.3	Počet vrstev DPS .....	51
7.4	Návrh schématu DPS .....	51
7.4.1	Požadavky pro návrh schématu .....	51
7.4.2	Postup návrhu čárového schématu .....	53
7.5	Trasování a umístění součástek .....	53
7.5.1	Omezení návrhu pro realizaci výroby .....	53
7.5.2	Postup návrhu schématu .....	53
7.6	Řešení, uplatnění a vylepšení .....	54
7.6.1	Postup osazení DPS .....	55
7.6.2	Způsoby testování DPS .....	55
7.6.3	Uplatnění finální DPS .....	55
7.6.4	Možnosti vylepšení .....	56
<b>Závěr</b> .....	<b>57</b>	
<b>Použitá literatura</b> .....	<b>58</b>	
<b>Přílohy</b> .....	<b>61</b>	
A	Celé elektrické schéma (rozděleno na šest částí) .....	61
B	Elektrické schéma část první .....	62
C	Elektrické schéma část druhá .....	62
D	Elektrické schéma část třetí .....	63
E	Elektrické schéma část čtvrtá .....	64
F	Elektrické schéma část pátá .....	64
G	Elektrické schéma část šestá .....	65

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Různé typy pouzder integrovaných obvodů [21] .....	19
Obrázek 1.2: Geometrie kuličkových vývodů v šachovnicovém uspořádání [20] .....	19
Obrázek 1.3: Pouzdra QFP [28] .....	20
Obrázek 1.4: Pouzdra QFN [29] .....	21
Obrázek 2.1: Konektory USB [4].....	23
Obrázek 2.2: Komunikace mezi zařízeními I2C [9] .....	28
Obrázek 2.3: Zpráva I2C [9] .....	29
Obrázek 2.4: PMOD I2S2 [23] .....	31
Obrázek 3.1: Vnitřní schéma LDO [16].....	33
Obrázek 3.2: Zapojení LDO [16] .....	33
Obrázek 3.3: Ideální návrh oscilátoru [18].....	35
Obrázek 3.4: Předběžný návrh oscilátoru (nerespektuje pravidla návrhu) [18].....	36
Obrázek 3.5: Finální návrh oscilátoru (respektuje pravidla návrhu) [18] .....	36
Obrázek 6.1: Modul Domino .....	43
Obrázek 6.2: Výběr pinů pro STM32U575AII6 v STM32CubeIDE.....	45
Obrázek 6.3: Trasy a otisky součástek při návrhu prototypu DPS.....	49
Obrázek 6.4: Vytisknutá DPS se součástkami USB-C a tlačítkem reset .....	49
Obrázek 7.1: Trasy a otisky součástek při návrhu finální DPS.....	54

## Seznam grafů

Graf 1.1: Porovnání vysokovýkonných MCU STM32 [2].....	16
Graf 1.2: Porovnání vysoce úsporných MCU STM32 [3] .....	18

## Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Porovnání USB specifikací [4] [6].....	26
Tabulka 4.1: Nejdůležitější dovednosti výrobce PCBWay pro výrobu DPS [25] .....	39
Tabulka 4.2: Nejdůležitější dovednosti výrobce ALLPCB pro výrobu DPS [26] .....	39
Tabulka 4.3: Nejdůležitější dovednosti výrobce JLCPCB pro výrobu DPS [27] .....	40
Tabulka 6.1: Konfigurace hřebenů prototypu DPS pro zapojení do modulu Domino.....	46
Tabulka 7.1: Konfigurace hřebenů finálního DPS pro zapojení do modulu Domino.....	52
Tabulka 7.2: Vyvedené piny na 2 konektorech (nad rámec potřeb modulu Domino).....	52

## Seznam zkratek

A/D	Analogově-digitální převodník
CoreMark	Benchmark k měření výpočetního výkonu mikroprocesorů
DPS	Deska plošných spojů
D/A	Digitálně-analogový převodník
DMIPS	Miliony instrukcí za sekundu
EMI	Elektromagnetické rušení
FCPU	Frekvence centrálního procesoru
GND	Zemní rovina
GPS	Globální systém určování polohy
IC	Integrované obvody
LDO	Lineární stabilizátor napětí
MCU	Mikrokontrolér
NVM	Nevolativní paměť
OPAMP	Operační zesilovač
PLC	Programovatelné logické automaty
RTC	Hodiny v reálném čase
SMD	Povrchově montované součástky
SMT	Technologie povrchové montáže
SoC	Systém pro čip
ST	STMicroelectronics
STM32	Rodina mikrokontrolérů vyvinutých společností STMicroelectronics
TUL	Technická univerzita v Liberci
ULPBench	Benchmark pro měření energetické účinnosti mikrokontrolérů
USB	Univerzální sériová sběrnice

## Úvod

V první kapitole bakalářské práce byly popsány mikroprocesory řady STM32, přičemž je kladen důraz na modely s vysokým výpočetním výkonem a efektivním provozem. Jejich rozdělení a vlastnosti jsou analyzovány s cílem zlepšit porozumění jejich praktickému využití.

Druhá kapitola bakalářské práce je zaměřena na rozhraní a periferie mikroprocesorů. Jejich funkčnost a využití jsou zde popsány a vysvětleny. V této části jsou následně jejich výhody a nevýhody analyzovány a porovnány s dalšími možnostmi propojení a začlenění do systému.

Ve třetí kapitole bakalářské práce byly popsány další komponenty desky plošných spojů. Jejich funkcionální a možnosti využití byly popsány s cílem porozumět jejich významu a přínosu. Dále byly zhodnoceny výhody a nevýhody těchto součástí a provedeno jejich porovnání s alternativními možnostmi.

Ve čtvrté části bakalářské práce byly popsány klíčové aspekty návrhu desky plošných spojů, které ovlivňují výkon obvodu, realizovatelnost výroby a dostupnost. Byl zkoumán vliv těchto požadavků na samotný proces návrhu a nutnost jejich zohlednění při rozhodování o konkrétních designových volbách. Dále byla analyzována pravidla trasování DPS, která stanovují omezení a parametry pro vedení signálů. Rovněž byla věnována pozornost napájecím a zemním rovinám, které hrají klíčovou roli v zajištění stabilního a spolehlivého napájení celého obvodu.

V páté kapitole bakalářské práce byly zkoumány možnosti výroby plošných spojů a jejich příslušné výhody a nevýhody.

V šesté kapitole bakalářské práce byl představen návrh prototypu desky. Bylo uvažováno o velikosti DPS, počtu vrstev, výběru MCU, návrhu schématu, trasování a případných omezeních. Následně byl popsán postup navrhování prototypu.

V sedmé kapitole bakalářské práce byl navržen finální design DPS. Byl vybrán jiný MCU a přehodnoceny rozměry DPS. Dále byl podrobně popsán postup návrhu, který zahrnoval návrh schématu, uspořádání napájecích a zemních rovin, trasování a umístění součástek. Byl popsán postup osazení a způsoby testování DPS. A na závěr byla provedena analýza možných uplatnění a případných vylepšení finálního návrhu.

## Teoretická část

### 1 Mikroprocesory STM32

Rodina 32bitových MCU STM32, založená na procesorech Arm Cortex®-M, je navržena tak, aby uživatelům nabídla širokou škálu možností. Tyto produkty kombinují vysoký výkon, schopnosti v reálném čase, zpracování digitálního signálu a provoz s nízkou spotřebou/nízkým napětím, přičemž zachovávají plnou integraci a snadnost vývoje. [1]

Řada MCU STM32, založená na průmyslovém standardním jádru, je doprovázena širokým výběrem nástrojů a softwaru pro podporu vývoje projektů, což činí tuto rodinu produktů ideální jak pro malé projekty, tak pro komplexní platformy. [1]

Tyto MCU nabízejí uživatelům široký výběr periferních zařízení, včetně analogových a digitálních vstupů a výstupů, komunikačních rozhraní jako SPI, I2C, UART a CAN, a dalších funkcí jako jsou časovače, kanály pro modulaci šířky pulzů a rozhraní pro senzory.

Společnost ST obvykle poskytuje podporu pro své produkty po dobu 10 let od jejich uvedení na trh.

MCU STM32 se rozděluje na řady s vysokým výkonem, řady s vysokou úsporou energie, řady pro bezdrátové aplikace a řady pro obecné použití, kombinující všechny parametry.

Zaměřil jsem se na řady s vysokým výkonem a řady s vysokou úsporou energie.

#### 1.1 STM32 s vysokým výpočetním výkonem

Vysokovýkonné produkty STM32 a jejich ekosystém přispívá vynalézavosti a kreativitě vývojářů MCU. Tyto produkty přinášejí více výkonu, více paměti a více periferních zdrojů, což dává vývojářům větší volnost designu pro řešení výzev složitějších aplikací. [2]

Platforma vysokovýkonných MCU STM32 využívá nevolatilní paměti ST v technologiích 90 nm a 40 nm, aby kombinovala následující vlastnosti:

- Vynikající systémový výkon pro vykonávání kódu, přenos a zpracování dat.
- Větší flexibilitu díky široké škále vnitřní paměti a pokročilých periférií.
- Účinné využití energie. [2]

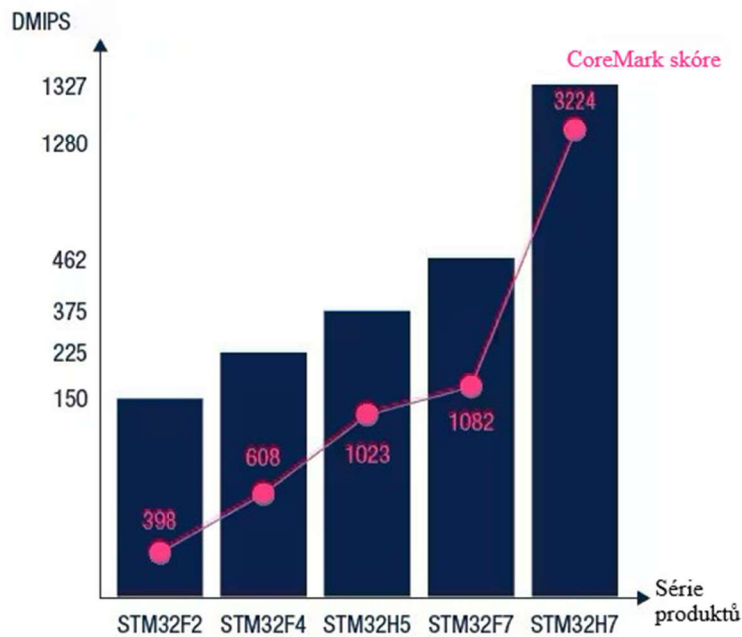
### 1.1.1 Řady STM32 s vysokým výkonem

- a) Nové MCU STM32H5 jsou založeny na jádrech Arm® Cortex®-M33 a nabízejí nejlepší kombinaci výkonu, bezpečnosti a cenové dostupnosti. Operují s frekvencí až 250 MHz a jsou vybaveny flash pamětí od 128 kB do 2 MB a až 640 kB RAM. Kromě rozsáhlého souboru bezpečnostních funkcí, jako jsou kryptografické akcelerátory, izolační mechanismy včetně TrustZone®, STM32H5 navíc poskytuje certifikovaný soubor bezpečnostních služeb SoC udržovaných společností ST po celou dobu životnosti produktu. [2]
- b) MCU STM32F4 založené na jádře Arm® Cortex®-M4 využívají technologii NVM společnosti ST a ART Accelerator™, aby dosáhly nejvyšších hodnot ve výkonnostních testech. MCU je založené na jádře Cortex-M s až 225 DMIPS/608 CoreMark prováděnými z flash paměti při frekvenci až 180 MHz. Série STM32F4 se skládá z osmi kompatibilních produktových řad digitálních signálových řadičů, což je dokonalá symbióza schopností řízení v reálném čase MCU a výkonu zpracování signálů digitálním signálovým procesorem. [2]
- c) Série MCU STM32F2 založená na jádře Arm® Cortex®-M3 využívá pokročilou 90 nm technologii NVM společnosti ST s ART Accelerator™ a vícevrstvou sběrnicovou maticí. To nabízí dosud nevídanou obchodní nabídku mezi cenou a výkonem. Akcelerační technologie společnosti ST umožňuje těmto MCU dosáhnout až 150 DMIPS/398 CoreMark při 120 MHz FCPU, což odpovídá provedení kódu bez čekacího cyklu (procesor může provádět kód bez nutnosti čekat na dokončení nějaké operace), a současně udržovat dynamickou spotřebu energie na mimořádně nízké úrovni 175  $\mu$ A/MHz. [2]
- d) MCU STM32F7 využívají ART Accelerator™ společnosti ST a mezipaměť L1, aby dosáhly maximální teoretické výkonnosti jádra Cortex-M7, ať už je kód prováděn z vestavěné flash paměti nebo externí paměti. Dosahují skóre 1082 CoreMark/462 DMIPS při 216 MHz FCPU. [2]
- e) MCU STM32H7 založené na jádře Arm® Cortex®-M7 využívají technologii NVM společnosti ST, aby dosáhly nejvyšších hodnot v benchmarku průmyslu pro MCU založené na jádře Cortex-M s až 1327 DMIPS/3224 CoreMark prováděnými z vestavěné flash paměti. [2]

Vysvětlivky:

1 DMIPS = Provedení 1 milionu instrukcí za sekundu (čím vyšší, tím lepší).

Skóre CoreMark měří výkon procesoru pomocí benchmark testu (čím vyšší, tím lepší).



Graf 1.1: Porovnání vysokovýkonných MCU STM32 [2]

### 1.1.2 Využití STM32 s vysokým výkonem

Průmyslová zařízení

- PLC, řízení průmyslových motorů, čerpadla a kompresory

Chytré domácnosti

- Klimatizace, chladničky a mrazáky, centrální poplachový systém, prací stroje

Osobní elektronika

- Klávesnice, chytré telefony

Chytrá města

- Průmyslová komunikace, řízení osvětlení

Zdravotnictví a zdravotní péče

- Dialyzátory, distributory tablet, poháněná lůžka pro pacienty [2]

## 1.2 STM32 s vysokou úsporou energie

MCU STM32 s vysokou úsporou energie jsou založeny na vlastní technologii s extrémně nízkou spotřebou energie a optimalizovaném designu. [3]

Vysoce úsporné STM32 nabízejí návrhářům energeticky účinné vestavěné systémy a vyváženost mezi výkonem, spotřebou energie, bezpečností a náklady. [3]



## 1.2.1 Řady STM32 s vysokou úsporou energie

- a) Nová řada STM32U5 kombinuje nejnovější a nejefektivnější jádro Arm® Cortex®-M33 s inovativní platformou ve velikosti 40 nm, která snižuje spotřebu energie na minimum a zároveň zvyšuje výkon. Tato řada také přidává funkcionalitu, která je vyžadována v dnešních aplikacích, včetně pokročilé kybernetické bezpečnosti s ochranou na hardwarové úrovni a grafických akceleratorů pro bohatá grafická uživatelská rozhraní. [3]
- b) Řada STM32L5 využívá vylepšené bezpečnostní prvky a využívá jádro Arm® Cortex®-M33 s technologií TrustZone® pro Armv8-M. Díky tomuto novému jádru a novému ST ART Accelerator™, který podporuje také externí paměť, dosahuje 443 CoreMark. [3]
- c) Řada STM32L4 nabízí vynikající vlastnosti s velmi nízkou spotřebou a výkon o 100 DMIPS s instrukcemi pro zpracování digitálního signálu a jednotkou s plovoucí desetinnou čárkou, dále nabízí větší paměť (až 1 MB paměti Flash) a inovativní funkce. [3]
- d) Řada STM32L4+ rozšiřuje technologii STM32L4 nabídkou vyššího výkonu (120 MHz/409 CoreMark vykonáváno z interní paměti Flash), většími vestavěnými paměťmi (až 2 MB paměti Flash a 640 kB SRAM) a vykreslováním pokročilé grafiky bez zvyšování spotřeby energie. [3]
- e) Nejnovější generace vysoce úsporných MCU, řada STM32U0, nabízí ideální kombinaci spotřeby energie, funkcí a nákladů pro vstupní aplikace. Tato řada byla označena jako "Udržitelná technologie", protože přispívá ke snížení uhlíkové stopy minimalizací spotřeby energie ve výsledných zařízeních, a tak pomáhá snižovat jejich environmentální dopad. [3]
- f) Řada STM32L0 nabízí skutečné úspory energie pro vstupní aplikace. Dostupná v malých pouzdrech už od 14 pinů a s paměti Flash od 8 do 192 kB, STM32L0 nabízí velmi nízkou spotřebu energie v konkurenceschopném portfoliu. [3]

Vysvětlivky:

ULPBench skóre porovnává výkon a spotřebu energie pomocí benchmark testu

(čím vyšší, tím lepší).

Skóre CoreMark měří výkon procesoru pomocí benchmark testu (čím vyšší, tím lepší).



Graf 1.2: Porovnání vysoce úsporných MCU STM32 [3]

## 1.2.2 Využití STM32 s vysokou úsporou energie

Průmyslová zařízení

- Pokročilá rozhraní mezi člověkem a strojem, měření, senzory, zdravotnictví a zdravotní péče

Chytré domácnosti

- Domácí spotřebiče

Osobní elektronika

- Elektrické kolo, nabíjení elektromobilů, nositelné technologie, chytrý reproduktor a zvukový rozvaděč

## 1.3 Pouzdra pro integrované obvody

Posledním krokem pro vytvoření polovodičového zařízení je zabalení bloku polovodičového materiálu (na kterém je vyroben daný funkční obvod) do ochranného pouzdra, které jej chrání před fyzickým poškozením a korozí. Existuje mnoho typů balení integrovaných obvodů, přičemž každý má jedinečné rozměry, styly montáže a počet pinů. [21]

V této kapitole popisují styl montáže SMT a některé typy pouzder, používaná pro řady MCU STM32.



Obrázek 1.1: Různé typy pouzder integrovaných obvodů [21]

### 1.3.1 Povrchově montované součástky

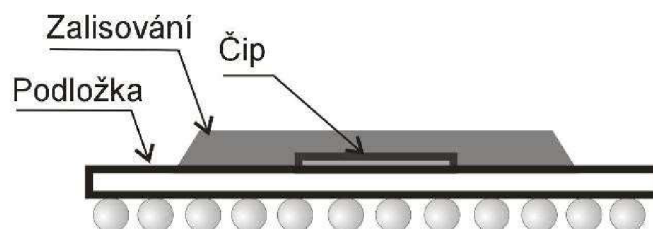
Pro zrychlení výroby se v současné době používají povrchově montované součástky.

Je to typ součástky navržený pro montáž na DPS, pomocí technologie povrchové montáže (SMT). SMD součástky mají kontakty umístěné na jejich povrchu, umožňuje to jejich připojení přímo na povrch DPS, což je odlišuje od tradičních součástek, které se připojují prostřednictvím otvorů v desce. SMD součástky jsou často menší, lépe využívají dostupný prostor na desce a umožňují automatizovanou výrobu DPS.

### 1.3.2 Pouzdra BGA

Integrované obvody jsou dostupné v pouzdech BGA. Tyto pouzdra mají malé kuličky pájky uspořádané do 2D mřížky na spodní straně. Obvykle je umístění těchto pouzder na desku plošných spojů prováděno automatizovaným postupem pomocí strojů, které pouzdra vezmou a položí na DPS, kterou následně umístí do pece pro pájení. [21]

Piny jsou umístěny v šachovnicovém uspořádání obvykle ve vzdálenosti 0,5 až 0,8 mm od sebe.



Obrázek 1.2: Geometrie kuličkových vývodů v šachovnicovém uspořádání [20]

## Výhody BGA

Prostorově úsporné.

Efektivní odvod tepla.

Účinnost a spolehlivost.

Nákladově výhodné.

Montáž SMT.

## Nevýhody BGA

Komplikovaná vizuální kontrola pájených spojů.

Nemožné ruční dodělávky.

Komplikovaný vývod pinů u BGA s malou vzdáleností mezi piny, nutnost použití vícevrstvé DPS (MCU STM32U575AII6 má piny od sebe vzdáleny 0,5 mm a tyto piny mají průměr 0,25 mm, mezera mezi piny je pouze 0,25 mm).

Při chybném pájení je nutné celé BGA odpájet a celý proces opakovat. [20] [24]

### 1.3.3 Pouzdra QFP

Integrované obvody v pouzdech QFP mají piny na všech čtyřech stranách. Tyto pouzdra mohou mít piny po osmi na každé straně (celkem 32) a až po více než sedmdesát (300+). Piny jsou obvykle umístěny ve vzdálenosti od 0,4 mm do 1 mm. [21]



Obrázek 1.3: Pouzdra QFP [28]

## Výhody QFP

Prostorově úsporné (méně než BGA).

Nákladově výhodné.

Montáž SMT.

Snadný vývod pinů.

Možná vizuální kontrola všech nožiček po zapájení.

Možné ruční dodělávky (piny jsou fyzicky přístupné).

## Nevýhody QFP

Omezený odvod tepla.

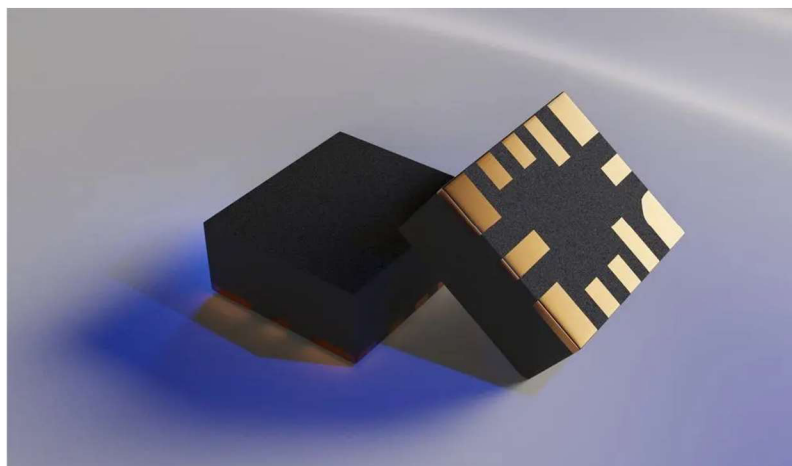
Omezená hustota pinů (ve srovnání s BGA).

Náchylné na mechanické poškození (možnost ohnutí nožiček).

### 1.3.4 Pouzdra QFN

Integrované obvody v pouzdech QFN vynikají pájitelnými bočními stěnami.

Nejvíce využívány v automobilovém průmyslu. [29]



Obrázek 1.4: Pouzdra QFN [29]

## **Výhody QFN**

Prostorově úsporné (nízký profil).

Nákladově výhodné.

Montáž SMT.

Možnosti připojení z boku i ze spodu.

Efektivní odvod tepla.

## **Nevýhody QFN**

Omezená hustota pinů.

Komplikovaná vizuální kontrola pájených spojů (pokud se pájí ze spodu).

## 2 Rozhraní a periferie

### 2.1 Univerzální sériová sběrnice

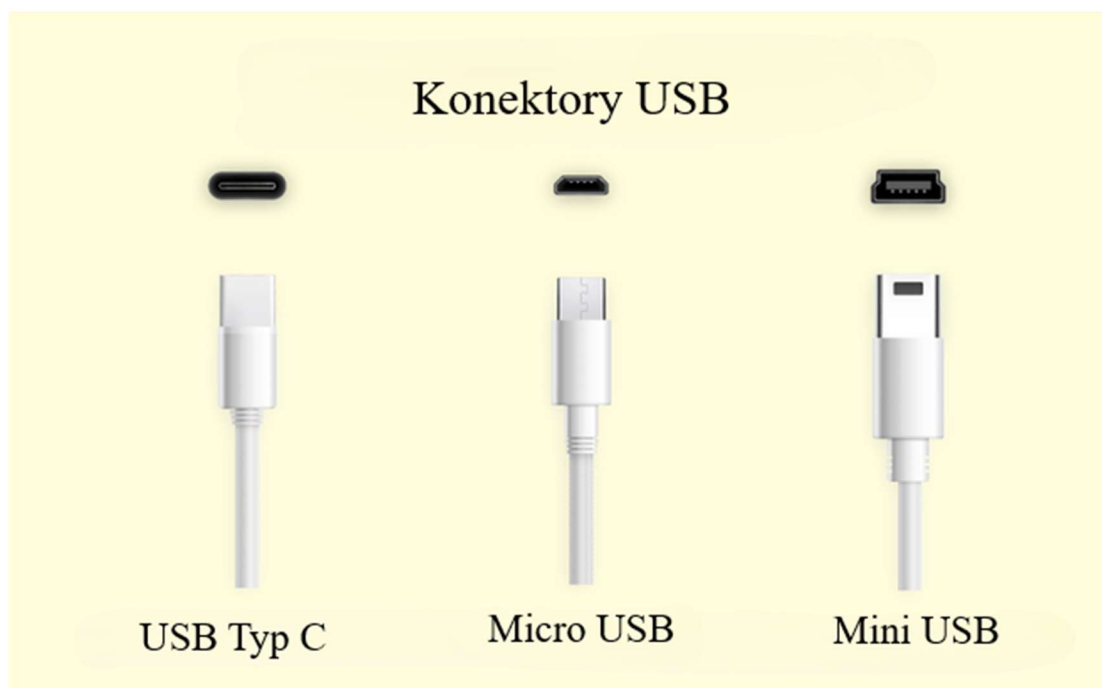
USB bylo navrženo s cílem vytvoření společné a univerzální normy pro připojení periferních zařízení, jako je myš, joystick, klávesnice, digitální fotoaparáty a videokamery. Nicméně některá zařízení, jako jsou tiskárny, přenosné přehrávače médií, diskové jednotky a síťové adaptéry, využívají USB ke komunikaci a dodávání elektrické energie. USB je běžné v mnoha zařízeních a v mnoha případech nahradilo rozhraní, jako jsou sériové porty a paralelní porty. USB konektory nahradily jiné typy nabíječek pro přenosné zařízení. [4]

Standardizace USB umožňuje zařízením od různých výrobců komunikovat a fungovat spolehlivě spolu bez ohledu na jejich původ.

Pro uživatele je standardizace obrovskou výhodou, protože mohou USB použít pro širokou škálu periferních zařízení a očekávat, že zařízení s rozhraním USB budou fungovat bez problémů.

#### 2.1.1 Konektory USB

Konektory USB mají různé tvary a velikosti. Dělí se na USB typu C, Mini USB a Micro USB, které mají dva nebo více variant konektorů. [4]



Obrázek 2.1: Konektory USB [4]

## **Mini USB**

Mini USB je k dispozici ve třech různých typech: typ A, typ B a typ AB. Používá se s periferními zařízeními počítače a digitálními fotoaparáty. Nejběžnější druh rozhraní je mini B. Kabele Micro USB a USB-C přebírá místo mini USB na nejnovějších zařízeních. Používají koaxiální kabel k přenosu dat a napájení mezi dvěma zařízeními. Jedna strana kabelu Micro USB má menší čtvercový konektor a druhá strana má běžný USB konektor s plochou hlavou. I když je mini USB primárně navržený pro nabíjení, lze jej také použít k přenosu dat. [4]

## **Micro USB**

Micro USB byl vytvořen pro připojení malých a mobilních zařízení, včetně digitálních fotoaparátů, chytrých telefonů, GPS komponent, MP3 přehrávačů a foto tiskáren a byl poprvé oznámen v roce 2007 jako náhrada za mini USB. [4]

Tři různé typy Micro USB jsou Micro-A, Micro-B a Micro USB 3. Micro USB jsou po připojení ihned použitelné a podporují možnost změny zařízení za chodu, proto jsou stále široce používány s elektronickými zařízeními. [4]

## **USB Typ C**

USB Typ C port je relativně nový typ konektoru, který lze nalézt na většině současných chytrých telefonech a dalších zařízeních, připojených do USB. USB zajišťuje napájení těchto periférií a vyměňuje si s nimi data. Na rozdíl od ostatních USB připojení, mohou být kabely USB-C připojeny do zařízení v obráceném směru. [4]



## 2.1.2 Rychlosti přenosu USB

USB 1.0, jedná se o externí sběrnici, může obsahovat až 127 periferních zařízení a rychlosti přenosu dat až 12 Mb/s. [4]

Standard USB 2.0, obvykle označovaný jako High Speed USB, byl vytvořen v roce 2001 společnostmi Philips, Lucent, Microsoft, Hewlett-Packard, Intel, NEC a Compaq. Podporuje přenosovou rychlost 60 Mb/s až do 480 Mb/s. [4]

USB 3.0, obecně známé jako SuperSpeed USB 3.0, bylo poprvé zpřístupněno společností Buffalo Technology v roce 2009. Vylepšené funkce a rychlost USB 3.0 přispěly k pokrokům v řízení napájení, zlepšené kapacitě šířky pásma a technologii USB 2.0. USB 3.0 Může podporovat 5 Gb/s nebo 640 Mb/s. [4]

Nejnovější verze protokolu USB obecně známá jako SuperSpeed+, která byla zpřístupněna do roku 2013, je USB 3.1. Může podporovat rychlosti přenosu až 10 Gb/s. [4]

## 2.1.3 Výhody USB

- Jednoduchost použití. Rozhraní USB se samo konfiguruje. To znamená, že uživatel nemusí upravovat nastavení na zařízení a rozhraní pro rychlost nebo formát dat, nebo konfigurovat přerušení, vstupní/výstupní adresy nebo kanály pro přímý přístup k paměti.
- USB konektory jsou standardizovány na hostiteli, takže kterékoliv periferní zařízení může používat kterýkoliv dostupný konektor.
- Rozhraní USB lze připojit k zařízením za chodu, to znamená, že jde vyměňovat zařízení bez restartování hostitelského počítače. Malá zařízení lze napájet přímo z rozhraní USB, čímž se odstraní další kabely napájení. [4]
- Standardizovaný USB konektor je možno připojit k různým zařízením.
- Umožňuje jak přenos dat, tak i možnost napájení.

## 2.1.4 Nevýhody USB

- Kabely USB mají omezenou délku.
- USB má přísnou stromovou topologii a protokol master-slave pro adresování periferních zařízení. Periferní zařízení mohou komunikovat mezi sebou pouze prostřednictvím hostitelského zařízení. Stejně tak dva hostitelské přístroje nemohou komunikovat přímo přes své USB porty.
- Některá velmi rychlá periferní zařízení vyžadují konstantní přenosové rychlosti, které nejsou dostupné v USB standardu.
- Pro vývojáře produktů používajících USB je nutné implementovat složitý protokol a vyžaduje inteligentní řadič v periferním zařízení. [4]

## 2.1.5 Porovnání rychlostí přenosu USB

Tabulka 2.1: Porovnání USB specifikací [4] [6]

Specifikace	USB 1.x	USB 2.0	USB 3.x
Rok vydání	1996	2000	2008
Přenosová rychlost	Low Speed: 1,5 Mb/s; Full Speed: 12 Mb/s	High Speed: 480 Mb/s	SuperSpeed: 5 Gb/s; SuperSpeed+: 10 Gb/s
Dodávka napájení	5 V, 500 mA (2,5 W)	5 V, 500 mA (2,5W)	5 V, 900 mA (4,5 W) pro USB 3.x; 20 V, 5 A (100 W) pro USB 3.1
Typy konektorů	Typ A, Typ B, Mini USB, Micro USB	Typ A, Typ B, Mini USB, Micro USB, Typ C	Typ A, Typ B, Mini USB, Micro USB, Typ C
Omezení délky kabelu	5 metrů	4 metry	2 metry pro USB 3.0; 1 metr pro USB 3.1
Zpětná kompatibilita	Ano	Ano	Ano

Standard USB 3.2 zahrnuje dva další přenosové režimy, které mohou přenášet data rychlostí až 20 Gb/s, resp. 40 Gb/s. [4]

## 2.1.6 Datové a napájecí role USB

Existují tři typy datového toku v USB zapojení:

Port směřující k nižší úrovni (DFP) odesílá data k připojeným zařízením; obvykle se jedná o port na hostiteli nebo rozvaděči, ke kterému se připojují zařízení. Příklad: dokovací stanice. [5]

Port směřující k vyšší úrovni (UFP), přijímá data ze zařízení nebo rozvaděče. Tyto porty obvykle využívají napájení VBUS. Příklad: displej. [5]

Obousměrný tok dat (DRD) může fungovat jako DFP (hostitel) nebo jako UFP (zařízení). Při připojení určuje počáteční roli portu jeho napájecí role. Zdrojový port přebírá datovou roli DFP, zatímco přijímací port přebírá datovou roli UFP. Použitím výměny datové role pomocí USB PD lze dynamicky změnit datovou roli portu. Příklad: notebooky, tablety a chytré telefony. [5]

## 2.2 Standard JTAG

Standard JTAG (IEEE 1149.1), je jednoduchý systém pro komunikaci se zařízením a jeho vzdálené testování. [30]

JTAG umožňuje přístup k interním komponentám čipu, což je užitečné pro ladění, testování a programování integrovaných obvodů.

Metoda testování implementovaná ve standardu se nazývá Boundary Scan. Název odráží myšlenku procesu: Funkční bloky uvnitř čipu jsou izolovány, a na jejich vstupy jsou poslány specifické kombinace signálů. Stav výstupu každého bloku je poté vyhodnocen. Celý proces se provádí pomocí speciálních příkazů prostřednictvím rozhraní JTAG a není vyžadován žádný fyzický zásah. [7]

### 2.2.1 Testovací přístupový port

TAP je jedním z klíčových prvků protokolu JTAG navrženého pro řízení a konfiguraci čipů připojených k JTAG řetězci. [7]

TAP funguje jako jednoduchý konečný automat, který je řízen signálem TMS (Výběr testovacího módu) Umožňuje přístup k interním registrům MCU a dalších zařízení prostřednictvím JTAG příkazů. [7]

Každé zařízení připojené k JTAG řetězci má svůj vlastní TAP, který se skládá z registrů IR (Registr instrukcí) a DR (Registr dat). Registr IR slouží k výběru instrukce, která má být provedena na zařízení, a registr DR slouží k přenosu dat. [7]

### 2.2.2 Ovládací signály

TAP se skládá ze čtyř povinných signálů (TCK, TMS, TDI, TDO) a jednoho nepovinného signálu (TRST). [7]

- TDI (Vstupní testovací data) – Příkazy a data jsou vkládána do čipu prostřednictvím tohoto pinu na náběžné hraně signálu TCK.
- TDO (Výstupní testovací data) – Příkazy a data vystupují z čipu prostřednictvím tohoto pinu na sestupné hraně signálu TCK.
- TCK (Vstup hodinového signálu)
- TMS (Signál pro výběr testovacího módu) – Řídí přechody mezi stavy stavového automatu TAP.
- TRST (Signál resetu) – Signál slouží k resetu stavového automatu TAP. [7]

Obecným pravidlem je, že modul JTAG čte data z linek TMS a TDI na náběžné hraně signálu TCK. [7]

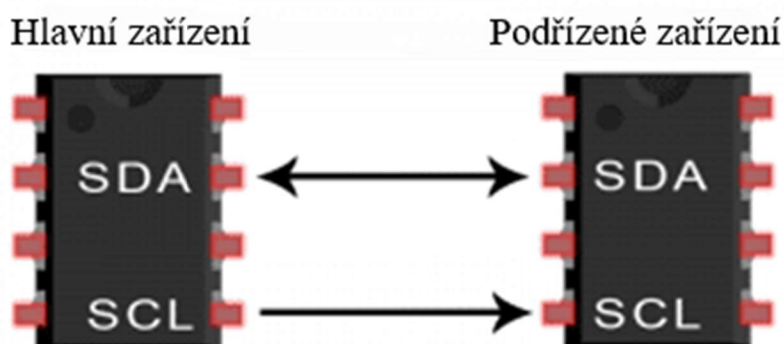
### 2.2.3 Práce s JTAG

- Nejprve je vybrán instrukční režim. Jedno z nastavení v rámci instrukčního režimu umožňuje uživateli nahrát instrukci přes TDI.
- Poté se stavový automat posouvá, dokud se nevrátí do výchozího stavu.
- Pro většinu instrukcí je následujícím krokem výběr datového režimu. V tomto režimu jsou data načítána přes TDI a/nebo čtena z TDO. Datové cesty pro TDI a TDO budou konfigurovány v souladu s instrukcí, která byla nahrána.
- Po dokončení operace čtení nebo zápisu se stavový automat opět posouvá do výchozího stavu. [8]

## 2.3 Sběrnice I2C

S I2C je možné připojit více podřízených zařízení k jedinému hlavnímu zařízení, které rozesílá příkazy. Také je možné mít více hlavních zařízení, které ovládají jedno nebo více podřízených zařízení. Tato vlastnost je velmi užitečná v případech, kdy je potřeba více než jedno MCU, které zaznamenává data na jednu paměťovou kartu nebo zobrazuje text na jediném displeji. [9]

I2C používá pouze dva dráty pro přenos dat mezi zařízeními:



Obrázek 2.2: Komunikace mezi zařízeními I2C [9]

SDA (Sériová data) – Linka pro posílání a přijímání dat mezi hlavním a podřízeným zařízením.

SCL (Sériový hodinový signál).

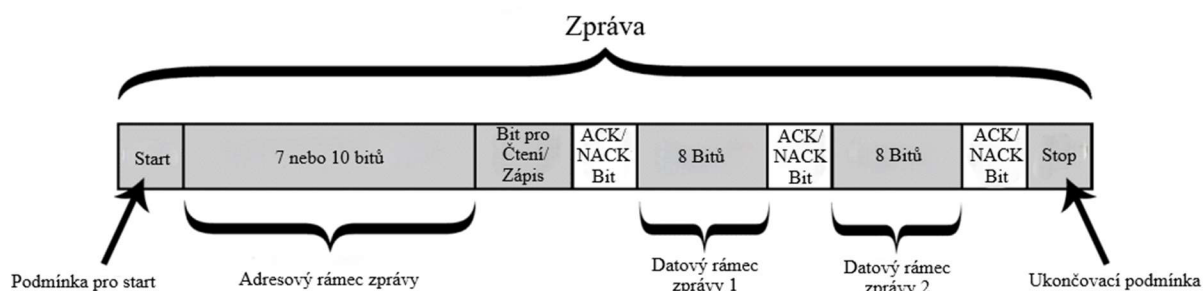
I2C je sériový komunikační protokol, takže data jsou přenášena bit po bitu po jediném vodiči (SDA).

I2C je synchronní, takže výstup bitů je synchronizován s odebráním bitů pomocí hodinového signálu sdíleného mezi hlavním a podřízeným zařízením. Hodinový signál vždy řídí hlavní zařízení. [9]

### 2.3.1 Jak funguje I2C

S I2C se data přenášejí ve zprávách. Zprávy jsou rozděleny na rámce dat. Každá zpráva obsahuje rámec adresy, který obsahuje binární adresu podřízeného zařízení, a jeden nebo více rámců dat, které obsahují přenášená data. [9]

Zpráva také obsahuje podmínky startu a ukončení, bity pro Čtení/Zápis a bity ACK/NACK mezi každým rámcem dat:



Obrázek 2.3: Zpráva I2C [9]

Podmínka pro start: SDA přepne z vysoké úrovně napětí na nízkou úroveň napětí před tím, než SCL přepne z vysoké na nízkou.

Ukončovací podmínka: SDA přepne z nízké úrovně napětí na vysokou úroveň napětí poté, co SCL přepne z nízké na vysokou. [9]

Adresový rámec zprávy: 7 nebo 10bitová sekvence, která je jedinečná pro každé podřízené zařízení, která ho identifikuje, když s ním chce hlavní zařízení komunikovat. Hlavní zařízení pošle zprávu s adresou podřízeného, se kterým chce komunikovat, všem podřízenému, které jsou k němu připojené. Každé podřízené zařízení pak porovná přijatou adresu se svou vlastní adresou. Pokud adresa odpovídá, podřízené zařízení pošle zpět hlavnímu zařízení ACK bit s nízkou úrovní. Pokud adresa nesouhlasí, podřízené zařízení nic nedělá a hodnota SDA zůstane vysoká.

Bit pro čtení/zápis: Jednabitové označení, zda hlavní zařízení posílá data podřízenému (nízká úroveň) nebo si od něj data žádá (vysoká úroveň).

Bit ACK/NACK: Každý rámec ve zprávě je následován bitem pro potvrzení/neúspěch. Pokud byl rámec adresy nebo rámec dat úspěšně přijat, zařízení na straně příjemce pošle zpět hlavnímu zařízení ACK bit. [9]

## 2.3.2 Výhody a nevýhody I2C

### Výhody:

- Používá pouze dva vodiče.
- Podporuje více hlavních a více podřízených zařízení.
- Bit ACK/NACK poskytuje potvrzení, že každý rámeček adresy je přenesen úspěšně.
- Hardware je méně složitý než u rozhraní UART.
- Dobře známý a široce používaný protokol [9].

### Nevýhody:

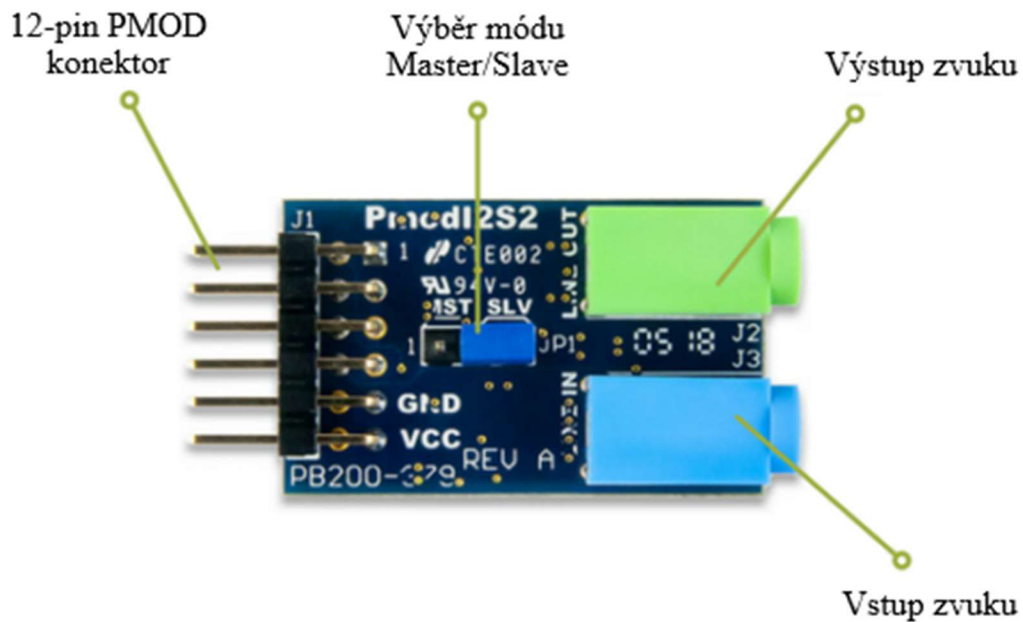
- Přenos dat je pomalejší, než u SPI.
- Velikost datového rámce je omezena na 8 bitů.
- Pro implementaci je potřeba složitější hardware, než u SPI. [9]

## 2.4 Rozhraní PMOD I2S2

PMOD I2S2 využívá stereo D/A převodník k převodu digitálních zvukových dat na odpovídající analogový signál prostřednictvím standardního stereo sluchátkového konektoru (označeného jako Výstup zvuku). Kromě toho je použit stereo A/D převodník k převodu analogových zvukových signálů z druhého audio konektoru 3,5mm (označeného jako Vstup zvuku) na digitální zvuková data. Je navržen tak, aby fungoval při široké škále standardních vzorkovacích frekvencí zvuku. [10]

### 2.4.1 Vlastnosti PMODu I2S2

- Stereo 24bitové A/D a D/A převodníky pro vstup a výstup zvuku pomocí rozhraní I2S.
- Standardní stereo audio konektory 3,5 mm.
- Volitelné automatické generování sériového hodinového signálu pro vstup zvuku.
- 12pinový PMOD Port s dvěma rozhraními I2S. [10]



Obrázek 2.4: PMOD I2S2 [23]

## 2.4.2 Signály PMODu I2S

Nejrychlejší hodinový signál každého rozhraní I2S je hlavní hodinový signál (MCLK). Tento signál zajistí plynulou synchronizaci. Hodinový signál pro levou a pravou stranu (LRCK), též známý jako hodinový signál výběru slov, indikuje, zda jsou konkrétní vzorky dat spojeny s levým nebo pravým zvukovým kanálem při přenosu stereofonního zvuku.

Posledním hodinovým signálem je sériový hodinový signál (SCLK), též známý jako bitový hodinový signál. Výstupní a vstupní převodníky mohou buď obdržet tento hodinový signál, nebo jej generovat interně.

Protokol I2S vyžaduje, aby byla data zaznamenávána na klesající hraně SCLK. První bit dat není zaznamenáván na klesající hraně, dokud neuplynul první úplný sériový hodinový cyklus po změně stavu LRCK. Data musí být platná na vzestupné hraně SCLK. [10]

## 3 Další komponenty zapojené na DPS

Další komponenty nutné k funkčnosti a stabilitě DPS jako je LDO nebo krystal poskytují stabilní napájení a přesné časování a přispívají k delší životnosti elektronických systémů.

### 3.1 Lineární stabilizátor napětí

LDL1117 je LDO s vysokou útlumovou charakteristikou a nízkým napěťovým poklesem, dokáže efektivně potlačit šумы a rušení pro napájení DPS a zajistit stabilní napětí i při změnách vstupního napětí, což přispívá k celkové stabilitě a výkonu DPS.

#### 3.1.1 Vlastnosti LDL1117

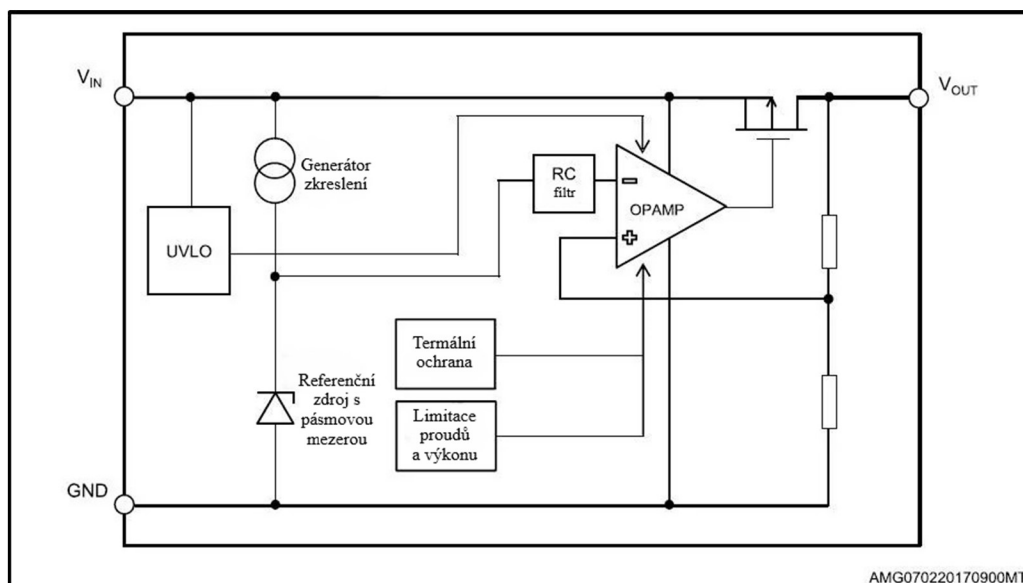
- Vstupní napětí od 2,5 V do 18 V.
- K dispozici ve fixních výstupních napětích: 1,2 V (1,185 V), 1,5 V, 1,8 V, 2,5 V, 3 V, 3,3 V, 5 V (další možnosti jsou k dispozici na vyžádání).
- Zaručený výstupní proud 1,2 A.
- Pokles napětí 350 mV při 1,2 A.
- Tepelná, proudová a výkonová omezení.
- Vysoké PSRR 87 dB při 120 Hz (I při fluktuacích vstupního napětí, které mají frekvenci 120 Hz, LDO udržuje konstantní a stabilní výstupní napětí s minimálním vlivem těchto změn).
- Provozní teplotní rozsah: -40 °C až 125 °C.
- Pouzdro SOT223. [16]

#### 3.1.2 Využití LDL1117

- Spotřební elektronika.
- Průmyslové aplikace.
- Spínané zdroje.
- Napájecí moduly DPS.
- Měníč DC-DC. [16]

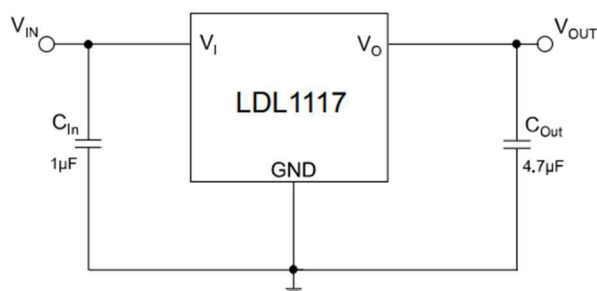


### 3.1.3 Vnitřní Schéma LDL1117



Obrázek 3.1: Vnitřní schéma LDO [16]

### 3.1.4 Zapojení LDL1117



Obrázek 3.2: Zapojení LDO [16]

## 3.2 Krystaly

Krystaly hrají zásadní roli v elektronice a lze je nalézt v několika zařízeních, která pravidelně používáme, jako jsou chytré telefony, počítače, digitální fotoaparáty a kamery.

Rezonance vibrujícího křemenného krystalu je v elektronice využívána k určení oscilační frekvence pro časovací signály. Ačkoliv existují různé způsoby, jak tuto časovací frekvenci vytvářet, křemenné krystaly jsou dobře známy svou účinností a stabilitou. Obvody oscilátorů musí být pečlivě uspořádány, aby se předešlo problémům se signální integritou. [17]

### 3.2.1 Popis funkce oscilátorů a jejich porovnání

Schopnost synchronizace signálů digitálních obvodů je zásadní ve většině elektronických systémů a zařízení. Synchronizace signálů se provádí pomocí oscilujícího obvodu, a buď keramický nebo krystalový rezonátor generuje stabilní a přesnou rezonanční frekvenci. Jak keramický, tak i krystalový rezonátor mají piezoelektrické vlastnosti, které způsobují jejich deformaci. Po odebrání napětí se rezonátor vrátí do své původní podoby a generuje elektrické pole, které osciluje při určité frekvenci. [17]

Krystalové oscilátory se v elektronice často preferují před keramickými rezonátory díky své vyšší přesnosti, stabilitě a kvalitě. Jsou také cenově dostupnější, menší a baleny v hermeticky uzavřených komponentech, což je činí odolnějšími při instalaci. Křemenné krystaly byly dříve vyráběny z přírodního křemene. Nyní se však používají syntetické křemenné krystaly, což vede k téměř dokonalým krystalickým strukturám s lepšími výnosy a konzistentním výkonem. [17]

Oscilační frekvence, generovaná krystalem, produkuje stabilní pulzy, které poskytují hodinové signály, které regulují digitální obvody. Mezi elektronické aplikace využívající krystalové oscilátory patří spotřební elektronika, jako jsou počítače a chytré telefony, automobilové řídicí a navigační systémy, průmyslové senzory, telekomunikace a vojenské a letecké systémy. Přestože existují i jiné typy oscilátorů, krystalové oscilátory zůstávají nejpoužívanějšími součástkami pro generaci hodinových signálů. [17]

### 3.2.2 Umístění krystalu na DPS

Krystalový oscilátor je velmi citlivý na EMI a musí být do návrhu DPS začleněn opatrně.

Krystalový oscilátor by měl být umístěn co nejbližně příslušným vstupním a výstupním pinům MCU.

Je důležité vyhnout se umístění oscilátoru poblíž zařízení a tras s vysokými frekvencemi, abychom zabránili kapacitnímu propojení.

Kondenzátory přidružené k oscilátoru by měly být umístěny blízko pinů krystalu.

Je vhodné izolovat krystalový oscilátor od ostatních zařízení co nejvíce. [17] [18]

### 3.2.3 Trasování (routování) krystalu

Trasy propojující krystal, kondenzátory a MCU by měly být udržovány co nejkratší a co nejširší. Tímto způsobem lze nejen snížit možnost rušení signálu, ale také minimalizovat parazitní indukčnost a odpor.

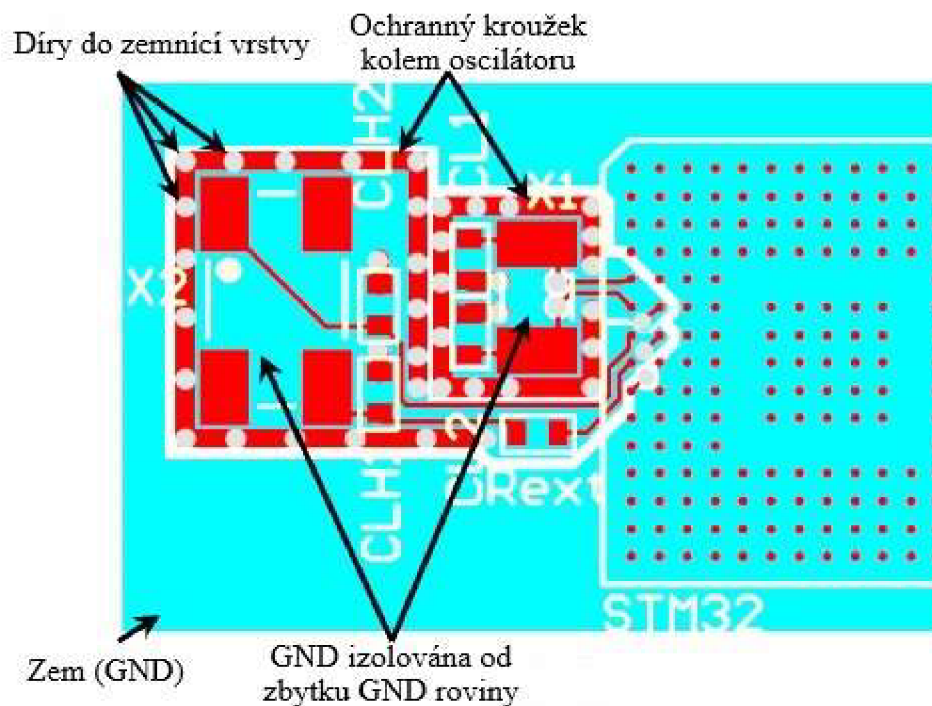
Je důležité vyhnout se pravým úhlům na těchto trasách, které by mohly změnit charakteristickou impedanci a vést k odrazům.

Trasy výstupů diferenciálního páru by měly být udržovány co nejbližší u sebe a stejně dlouhé.

Časové signály a signály přepínání by neměly být trasovány v oblasti krystalu a jeho tras.

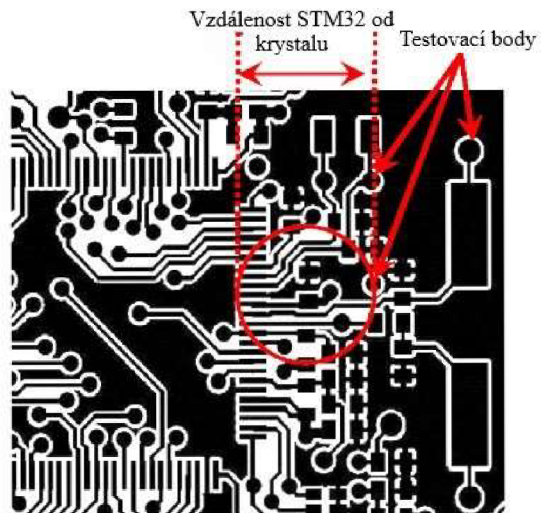
Důležité je také udržovat oblast pod krystalem dobře uzemněnou. [17] [18]

### 3.2.4 Příklad návrhu oscilátoru na DPS



Obrázek 3.3: Ideální návrh oscilátoru [18]

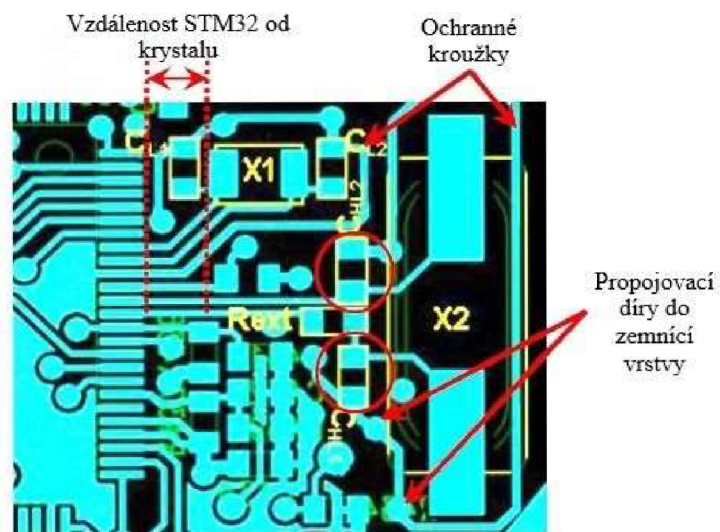
### 3.2.5 Příklad opravy návrhu, nerespektující pravidla návrhu



Obrázek 3.4: Předběžný návrh oscilátoru (nerespektuje pravidla návrhu) [18]

Příklad nerespektuje pravidla návrhu z následujících důvodů:

- Žádné uzemňovací roviny kolem oscilátoru.
- Příliš dlouhé trasy.
- Nesymetrické kapacity oscilátoru.
- Vysoké rušení mezi trasami.
- Příliš mnoho testovacích bodů.



Obrázek 3.5: Finální návrh oscilátoru (respektuje pravidla návrhu) [18]

## 4 Pravidla návrhu DPS

Pravidla návrhu DPS zahrnují aspekty jako distribuci napájení, trasování signálů, správné umístění součástek a mechanickou stabilitu. Dodržování pravidel návrhu je nutné pro minimalizaci rušení, zajištění správné funkcionality a snadnou výrobu DPS.

### 4.1 Požadavky pro návrh DPS

Při umístění součástek na DPS se musí splnit tři hlavní požadavky: dimenzování obvodu, realizovatelnost výroby a dostupnost. [11]

#### 4.1.1 Dimenzování obvodu (proudové, frekvenční)

Vysokofrekvenční obvody vyžadují umístění součástek co nejbližší k MCU, aby byly trasy signálů krátké a přímé. Tento požadavek ovšem neplatí pouze pro vysokofrekvenční obvody. Analogové a výkonové součástky také musí být umístěny co nejbližší k MCU, aby jejich citlivé trasy s vysokým proudem byly co nejkratší. Toto uspořádání pomáhá snížit indukčnost a zlepšit integritu signálů a výkonu. V některých případech mohou být tyto součástky rozmístěny tak, aby lépe odpovídaly tepelné izolaci nebo se vyhnuly křížení tras. [11]

#### 4.1.2 Realizovatelnost výroby

Aby se udržely výrobní náklady co nejnižší, je důležité umístit součástky tak, aby celý výrobní proces byl co nejjednodušší. Například umístění součástek příliš blízko u sebe může způsobit potíže s automatizovanými procesy sestavování a pájení. Vyšší součástky, umístěné blízko menších, mohou při vlnovém pájení vytvořit stínový efekt, což může způsobit špatně provedené spoje. Nevyvážené rozložení mědi mezi dvěma ploškami malých čipů může vést k nerovnoměrnému ohřívání, což způsobuje roztavení jedné plošky dříve než druhé a vytažení druhé plošky ze svého umístění. [11]

### 4.1.3 Dostupnost

DPS musí často projít manuálním testováním a opravami, což vyžaduje přístup k částem, na kterých je potřeba pracovat. Pokud jiné, větší součástky překrývají tyto části, může to práci na nich prodloužit nebo způsobit nepřímou škodu sousedním součástkám. Stejně tak konektory, přepínače a další rozhraní, které nejsou dosažitelné, mohou také zpomalit výrobu a opravy DPS. [11]

Aby uživatelé věděli, jak rozdělit různé oblasti obvodů na desce, je doporučeno nejprve začít vypracováním základního plánu součástí na desce. [11]

## 4.2 Trasování (routování) DPS

DPS jsou navrhovány s cílem dosáhnout co nejlepší integrity signálů a napájení tím, že se součástky umístí s cílem o co nejkratší a nejrovnější trasy. Současně je nezbytné zajistit, aby bylo možné spojit všechny součástky na DPS. V hustě osazených návrzích je vyvážení těchto požadavků často velkou výzvou. [11]

Například, u BGA pouzder je obtížné vyvedení vnitřních pinů, tím může dojít ke křížení tras.

### 4.2.1 Pravidla a omezení při trasování DPS

Pravidla a omezení slouží k řízení tras, mezer, děr, rozměrů mezi součástkami, otisků součástek, mechanických odstupů a dalších parametrů. Lze je nastavit v jednotlivých CAD aplikacích. [11]

Existují některá pravidla, která, pokud jsou stanovena brzy v průběhu návrhu, eliminují mnoho posunů součástek a pozdějšího přeroutování. Tyto pravidla lze zjistit po konzultaci výrobní továrny pro výrobu DPS. Kvalitní výrobce obvykle zveřejní své výrobní schopnosti online nebo poskytne tyto informace v dokumentu. Pokud se nenachází na zřejmém místě na jejich webových stránkách, lze výrobce kontaktovat. [12]

## 4.2.2 Schopnosti výrobců v oblasti výroby DPS

Jako příklad jsou uvedeny schopnosti tří cenově dostupných výrobců (k datu 10.05.2024):

### PCBWay

Tabulka 4.1: Nejdůležitější dovednosti výrobce PCBWay pro výrobu DPS [25]

Parametr	Hodnota
Maximální rozměr DPS	500 x 1100 mm
Minimální rozměr DPS	5 x 6 mm
Tloušťka DPS	0,2–2,4 mm
Tolerance tloušťky DPS ( $t \geq 1,0$ mm)	$\pm 10$ %
Tolerance tloušťky DPS ( $t < 1,0$ mm)	$\pm 0,1$ mm
Minimální šířka tras	0,1 mm (4 mil)
Minimální mezera mezi trasami	0,1 mm (4 mil)
Velikost vrtů (CNC)	0,2–6,3 mm

Dále PCBWay umožňuje vrtat slepé díry (díry v mezivrstvách DPS). [25]

Cena pro výrobu 20 kusů DPS o velikosti 33x65 mm s 6 vrstvami a šablonou s dopravou je 255 dolarů.

### ALLPCB

Tabulka 4.2: Nejdůležitější dovednosti výrobce ALLPCB pro výrobu DPS [26]

Parametr	Hodnota
Maximální rozměr DPS	506 x 580 mm
Minimální rozměr DPS	80 x 80 mm
Tloušťka DPS	0,4–3,2 mm
Tolerance tloušťky DPS ( $t \geq 1,0$ mm)	$\pm 10$ %
Tolerance tloušťky DPS ( $t < 1,0$ mm)	$\pm 0,1$ mm
Minimální šířka tras	0,1 mm (4 mil)
Minimální mezera mezi trasami	0,1 mm (4 mil)
Velikost vrtů (CNC)	0,2–6,5 mm

ALLPCB také umožňuje vrtání slepých děr. [26]

Cena pro výrobu 20 kusů DPS o velikosti 33x65 mm s 6 vrstvami a šablonou s dopravou je 255 dolarů.

## JLCPCB

Tabulka 4.3: Nejdůležitější dovednosti výrobce JLCPCB pro výrobu DPS [27]

Parametr	Hodnota
Maximální rozměr DPS	400 x 500 mm
Tloušťka DPS	0,4–2,5 mm
Tolerance tloušťky DPS ( $t \geq 1,0$ mm)	$\pm 10$ %
Tolerance tloušťky DPS ( $t < 1,0$ mm)	$\pm 0,1$ mm
Minimální šířka tras (4-6 vrstev)	0,09 mm (3,5 mil)
Minimální mezera mezi trasami (4-6 vrstev)	0,09 mm (3,5 mil)
Velikost vrtů (CNC)	0,15–6,3 mm

JLCPCB nepodporuje slepé díry, nabízí pouze možnost výroby s dírami přes celou DPS. [27]

Cena pro výrobu 20 kusů DPS o velikosti 33x65 mm s 6 vrstvami a šablonou bez dopravy je 127 dolarů. Cena je nízká z důvodu možnosti vrtání pouze děr skrz celou DPS.

### 4.2.3 Pravidla návrhu napájecí a zemní roviny

U moderních vysokofrekvenčních návrhů je typicky nejlepší strategií uzemnění použití jedné nebo více nepřerušovaných zemních rovin na vnitřní vrstvě desky. Toto poskytuje nejlepší ochranu před EMI a zajišťuje jasné signálové trasy, což zlepšuje celkovou integritu signálu. Je důležité se vyvarovat trasování přes jakékoliv zemní mezery v oblastech, kde je zemní rovina rozdělena kvůli jedinečným tvarům nebo vlastnostem DPS. Šum může vzniknout v důsledku přerušované a odlehle zemní roviny k signálové rovině a vést k oklikám návratových tras, což má za následek výraznou EMI. [11]

#### Pokyny pro návrh napájecí a zemní roviny:

- Zemní roviny musí být přilehlé k signálovým vrstvám v rozložení vrstev DPS s vysokofrekvenčními trasami. To pomůže chránit vysokofrekvenční trasy před interferencí a poskytne dobrou referenční rovinu pro návratové trasy signálu.
- Pro napájecí a zemní připojení k rovinám je nutné používat tepelné úlevy a pečlivě s nimi zacházet. Výstupky tepelných úlev musí být dostatečně široké pro vysoké proudy a zároveň eliminovat šance, že se tato připojení budou chovat jako chladiče. [11]



## 5 Možnosti výroby DPS

Základními možnostmi pro výrobu DPS je 3D tisk, frézování a leptání.

### 5.1 3D tisk

3D tisk má potenciál změnit způsob, jakým jsou navrhovány a vyráběny DPS. Umožňuje efektivnější využití materiálů, zrychlení výrobních cyklů a zvýšení automatizace. 3D tisk může vést ke větší efektivitě výroby, která více vyhovuje potřebám koncových uživatelů. [13]

#### 5.1.1 Výhody

- Je ekologicky šetrný a vytváří méně odpadu (zanedbatelné množství oproti leptání nebo frézování).
- Nyní vytváří výrobní DPS za nižší náklady než v minulosti, kdy byl primárně určen pro prototypování.
- Výrobci získávají včasné, hotové a kompletní prototypové a výrobní DPS.
- Návrhy CAD souborů dávají možnost vytvořit jakýkoliv druh DPS.
- Existuje několik různých metod 3D tisku.
- Lehké DPS.
- Rychlý výstup umožňuje obsloužit mnoho zákazníků.
- Po dokončení tisku je DPS ihned použitelná. [13]

#### 5.1.2 Nevýhody:

- Jsou vhodnější pro menší zakázky než hromadnou výrobu.
- Mnoho 3D tiskáren nemá dostatečnou softwarovou podporu.
- Některé součásti nevydrží zkoušky pevnosti.
- Velikost tisknutelných objektů je omezena.
- Některé materiály jsou méně vodivé a nejsou tak vhodné pro 3D tisk. [13]

## 5.2 CNC Frézování a leptání

Frézování desek plošných spojů je proces odstraňování částí mědi z desky plošných spojů, aby se vytvořily kontaktní plochy, signální trasy a struktury podle vzorů z digitálního návrhu DPS. Podobně jako častější a známější chemický proces leptání desek plošných spojů je i proces frézování desek plošných spojů, odčítací: materiál je odstraněn k vytvoření elektrické izolace a uzemnění. [14]

Nicméně, na rozdíl od chemického procesu leptání, frézování desek plošných spojů je obvykle nechemický proces, a jako takový může být proveden v běžném kancelářském nebo laboratorním prostředí bez vystavení nebezpečným chemikáliím. Obě metody mohou produkovat DPS vysoké kvality. [14]

### 5.2.1 Řízení odpadů

Řízení odpadů je důležitým aspektem environmentálních úvah při výrobě DPS. Proces generuje různé typy odpadů, včetně pevných odpadů, odpadních vod a emisí do ovzduší, které je třeba řádně řešit, aby se minimalizoval jejich environmentální dopad. [15]

Mezi pevný odpad patří odpadní DPS a použité součástky, které mohou obsahovat nebezpečné látky. Tyto odpady musí být správně likvidovány, aby se zabránilo kontaminaci životního prostředí. Mnoho výrobců zavedlo recyklační programy pro získání cenných materiálů z odpadu, jako je měď a drahé kovy. [15]

Odpadní voda vzniká při čištění a oplachování během procesu výroby. Může obsahovat zbytky pájky, tavidla a dalších chemikálií, které mohou být škodlivé, pokud se dostanou do životního prostředí. Čistící systémy pro odpadní vody odstraňují tyto kontaminanty před vypuštěním vody. [15]

Emise do ovzduší mohou zahrnovat těkavé organické sloučeniny a další znečišťující látky uvolňované během pájení a vytvrzování. Zařízení na kontrolu znečištění ovzduší, jako jsou odsávače a filtry, zachytávají tyto emise a snižují jejich environmentální dopad. [15]

Efektivní řízení odpadů vyžaduje komplexní přístup, včetně minimalizace odpadů, recyklace a správné likvidace. Je to zásadní součást environmentální odpovědnosti výrobců DPS. [15]

## Praktická část

Cílem praktické části bylo navrhnout reálný návrh DPS, který bude odpovídat požadavkům zadání. Celkově byly navrženy dvě DPS. První DPS je označena jako prototyp, protože se z části použil její čárový návrh i pro finální DPS. Na závěr se posuzují možná řešení, uplatnění a vylepšení DPS.

## 6 Návrh prototypu DPS

V této části práce se zabýváme návrhem prototypu DPS. Je popsán celý proces návrhu DPS. Nejprve jsem určil rozměry DPS a vybral MCU.

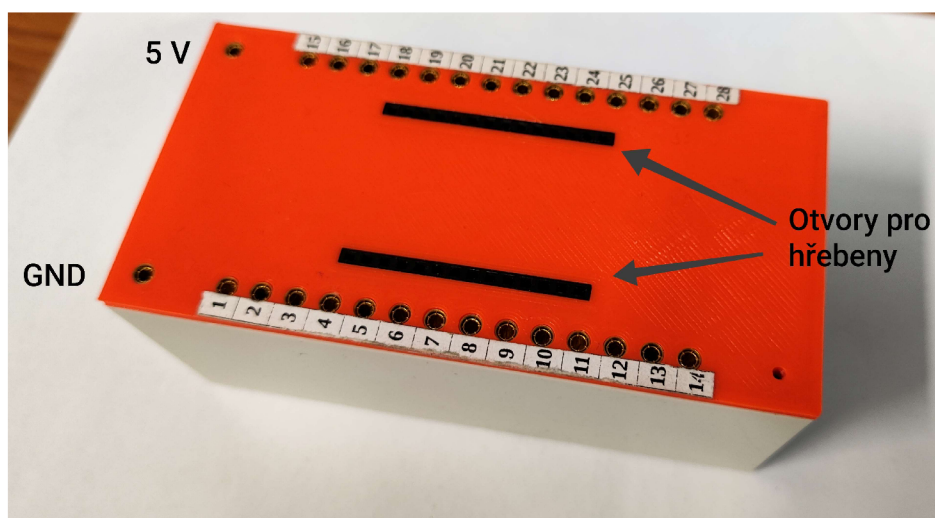
### 6.1 Rozměry DPS

V průběhu mé bakalářské práce jsem se nejdříve zaměřil na stanovení rozměrů DPS, aby byla moje DPS kompatibilní s modulem Domino, který je k dispozici na pracovišti školitele.

Šířku DPS jsem zvolil 33 mm. Šířku limitují vycházející piny z modulu Domino (očíslované 1 až 28 na obrázku 6.1) a zároveň jsem byl limitován hřebeny, kterými mojí DPS zapojím do zmíněného modulu (vyznačeno šipkami na obrázku 6.1). Jak vidíme tyto hřebeny se zapojují do obou stran modulu, tím moje DPS v klidu drží a nepotřebuji k ní navrhovat stojany.

Dále jsem byl omezen výškou, protože na horní straně modulu je umístěn jeho napájecí a uzemňovací vstup. Z tohoto důvodu jsem zvolil výšku mé DPS 55 mm.

Tato specifikace rozměrů byla zásadní pro návrh a výrobu DPS, aby byla kompatibilní s existujícím modulem a umožnila snadné a bezproblémové použití.



Obrázek 6.1: Modul Domino

## 6.2 Výběr MCU

Z řady STM32 jsem vybral model STM32U575AII6, který patří mezi STM32 s vysokou úsporou energie. Obsahuje nejmodernější patentovanou technologii od ST. Obsahuje nejnovější a nejúčinnější jádro a je cenově přívětivé. Toto MCU má vzdálenost mezi piny pouze 0,5 mm s velikostí pinů 0,25 mm. To znamená, že na nevodivé mezery mezi piny zbývá pouze 0,25 mm.

### 6.2.1 Popis MCU řady STM32U575xx

- Napájecí napětí v rozsahu od 1,71 V do 3,6 V.
- Teplotní rozsah od -40 °C do +85/125 °C.
- 4 až 50 MHz a 32 kHz krystalové oscilátory.
- Nabízí režimy nízké spotřeby energie:
  - o Využívá pouze 160 nA v režimu vypnutí (s 24 probuzenými piny).
  - o Využívá 210 nA v režimu pohotovosti (s 24 probuzenými piny).
  - o Využívá 440 nA v režimu pohotovosti s RTC.
  - o Využívá 1,9 µA v režimu Stop 3 s 16 kB SRAM.
  - o Využívá 4,3 µA v režimu Stop 3 s plnou SRAM.
  - o Využívá 4,0 µA v režimu Stop 2 s 16 kB SRAM.
  - o Využívá 8,95 µA v režimu Stop 2 s plnou SRAM.
  - o Využívá 19,5 µA/MHz v režimu spuštění @ 3,3 V.
- Obsahuje až 17 časovačů, 22 komunikačních periférií, 22 kanálů pro snímání kapacit, analogové periferie a další.
- Zahrnuje režim VBAT pro napájení RTC.
- obsahuje 2 MB flash paměti a 786 kB SRAM. [22]

Flash paměť slouží k ukládání programového kódu a dat, které mají zůstat zachovány i po vypnutí napájení, zatímco SRAM je využívána pro dočasné ukládání dat během provozu procesoru.

MCU nabízí různé režimy spotřeby energie, vyplatí se je využít například pro delší testování a měření.

#### Processor:

Obsahuje Arm® 32bitový Cortex®-M33 s TrustZone®.

1,5 DMIPS/MHz. [22]

To znamená, že procesor dokáže provést 1,5 milionu instrukcí za sekundu při frekvenci jednoho MHz (Tímto máme lepší představu o výkonu procesoru).



## 6.4.1 Požadavky pro návrh schématu

K návrhu schématu jsem potřeboval informace o modulu, do kterého je hřeben DPS zapojen (viz. Tabulka 6.1).

Dále jsem měl za úkol zakomponovat do DPS:

Konektor pro připojení PMOD.

USB-C konektor s možnostmi napájení a komunikace s DPS.

Konektor JTAG.

Akcelerometr a gyroskop.

Resetovací tlačítko.

Tabulka 6.1: Konfigurace hřebenů prototypu DPS pro zapojení do modulu Domino

Index	Název pinu	Index	Název pinu
1	GND	15	NC
2	+3V3	16	NC
3	I2C SCL	17	NC
4	I2C SDA	18	NRST
5	NC	19	TIM5
6	KLÍČ	20	TIM4
7	ADC IN1	21	TIM3
8	ADC IN2	22	TIM1
9	ADC IN3	23	DAC OUT2
10	ADC IN6	24	DAC OUT1
11	ADC IN7	25	ADC IN4
12	ADC IN11	26	ADC IN3
13	COMP INP	27	ADC IN2
14	COMP INM	28	COMP OUT

NC – Nepřipojeno.

KLÍČ – Ochranný klíč pro zamezení chybného připojení.

## 6.4.2 Postup návrhu čárového schématu

Pro zajištění napájení byl použit konektor USB-C, tento konektor také slouží pro komunikaci s MCU. Napětí je přiváděno signálem VBUS, který je chráněn přepětíovou ochranou TCPP01-M12, nastavitelnou od 5 V do 22 V a výstupním signálem pro ovládání mosfetu STL11N3LLH6. Tato dvojice zajišťuje přívod napájecího napětí 5 V. Napětí 5 V vede na LDO LDL1117, které pomocí vnitřního tranzistoru snižuje toto napětí na 3,3 V. Toto napětí je následně rozlito ve třetí vrstvě DPS a napájí celou DPS.

TCPP01-M12 také slouží k přepěťové ochraně CC signálů, CC signály dále vedou přes odpor na zem. Tím jsem určil, že DPS využívá USB jako zdroj napájení (DPS nemůže sloužit jako zdroj napájení pro zařízení připojená k USB). Dále je signál VBUS veden přes ochrany do MCU, aby MCU detekovalo zdroj napájení. USB k přenosu dat využívá signály data plus (DP) a data minus (DM), datové signály jsou chráněny USBLC6-2SC6 a k přenosu dat je využita rychlost full speed.

Dále je navržena ochrana napájení MCU, ochranné kondenzátory jsou vybrány podle technického dokumentu MCU. Dále jsou zapojeny krystaly, resetovací tlačítko, konektor JTAG, gyroskop a akcelerometr a konektor PMOD podle jejich technických dokumentů. Dále jsou zapojeny hřebeny podle tabulky 6.1 pro potřeby modulu Domino.

## 6.5 Trasování a umístění součástek

Dalším krokem při návrhu DPS bylo umístění všech prvků, periférií a rozhraní tak, aby byly zajištěny optimální vlastnosti celé DPS. Tento proces zahrnoval snahu minimalizovat křížení signálů a zajistit co nejkratší a nejrovnější spoje.

### 6.5.1 Omezení návrhu pro realizaci výroby

Pro prototyp jsme se rozhodli pro možnost jeho výroby pomocí 3D tisku.

S ohledem na požadavek na výrobu této desky pomocí 3D tisku jsem při návrhu použil spoje a mezery mezi spoji o minimální tloušťce 0,2 mm. Při nanášení vodivého materiálu pomocí 3D tisku se může stát, že dojde k náhodnému propojení dvou různých signálů nebo se naopak může stát, že spoj nebude dostatečně spojený a tím by mohl úplně prasknout nebo nemusel optimálně fungovat. Tloušťka tras a jejich odstup 0,2 mm by měly zamezit těmto jevům. Toto omezení je vybráno s ohledem na 3D tiskárnu, která se nachází na pracovišti TUL. Tato šířka také prospívá kvalitě spojů, proto bych jí dodržel i kdyby nebyla specifikována požadavky 3D tiskárny.

## 6.5.2 Postup návrhu schématu

Nejdříve jsem nastavil vrstvy a jejich propojení. Propojení pomocí děr se nastavuje pro každé dvě vrstvy, které plánuji propojit, toto nastavení není v aplikaci EAGLE snadné, protože po nastavení několika propojovacích děr mezi vrstvami, aplikace hlásí chybu. Tyto díry se musí nastavit pomocí rovnice, kterou aplikace z neznámého důvodu nedokáže vygenerovat sama. Dokáže to pouze pro několik děr. Což pro můj návrh nebylo dostatečné.

Potřeboval jsem propojit první vrstvu se všemi ostatními vrstvami, protože jsem potřeboval využít všechny vrstvy pro vyvedení signálů z MCU, dále jsem propojil napájecí a zemní vrstvy s šestou vrstvou pro přívod napájení hřebenu. A z důvodu propojení všech součástek jsem spojil druhou a pátou vrstvu s šestou vrstvou. Po dlouhém zkoumání a několika pokusech se mi podařila rovnice napsat, optimální pro můj návrh.

Rovnice z programu EAGLE: ([3:[2:[14:[15:1+2\*3+14\*15+16:15]:14]:3]:2])

Dále jsem nastavil rozměry DPS a ve třetí a čtvrté vrstvě jsem rozlil napájecí roviny, jejich vzor jsem vybral tabulkový, protože při výrobě 3D tiskem je tento vzor mechanicky odolnější.

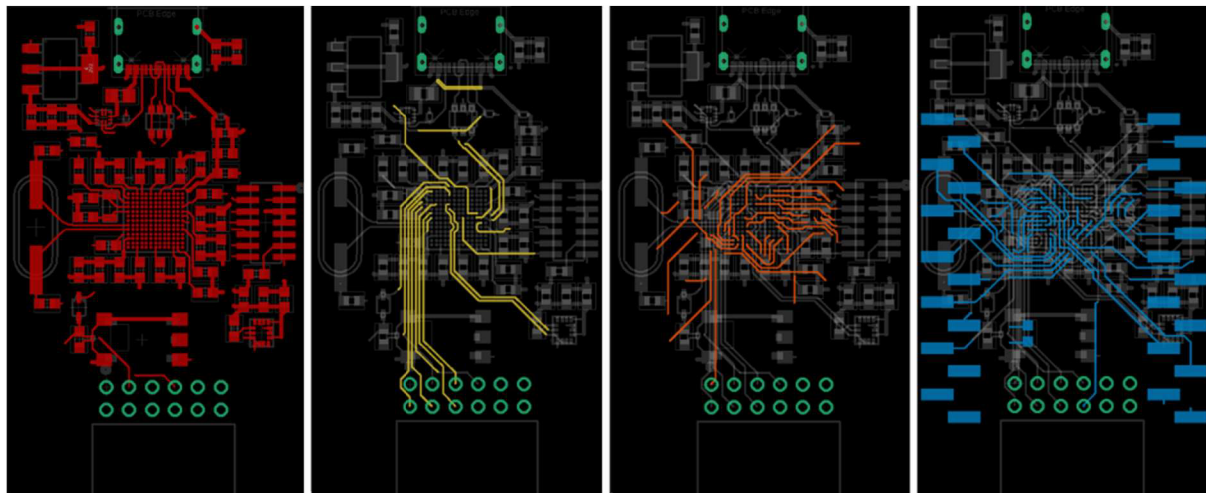
Dalším krokem bylo umístění součástek. Nejdříve jsem umístil MCU, které jsem umístil doprostřed a natočil jeho piny, tak aby se trasy, které vedou k plánovanému umístění všech součástek co nejméně křížily. Při dalším kroku jsem umístil krystaly co nejblíže k MCU. Krystaly mají prioritu, protože jsou velmi náchylné na vzdálenost od MCU, také u nich musím dodržet stejnou délku diferenciálních spojů. Další součástky s nutností umístění okolo MCU jsou napájecí kondenzátory. Umístění kondenzátorů blízko MCU pomáhá absorbovat přechodné výkyvy napětí, což zajišťuje stabilní napájení pro správnou funkci MCU. Tyto spoje jsou více tepelně namáhány, a tak musí být dostatečně široké, tím se teplo rozloží a lépe odvede. Zajistil jsem tím spolehlivost napájecích kondenzátorů a optimální funkčnost krystalů.

Posledním krokem bylo umístit a propojit všechny periferie, rozhraní a další komponenty. Umístil jsem všechny součástky na plánovaná místa a začal s trasováním. Tento krok byl největší výzvou, protože vyvést piny z pouzdra BGA s 0,25 mm mezerami mezi piny je možné pouze s využitím dalších vrstev.

Krajní piny jsem vyvedl bez problému. Vnitřní piny, které jsou ve druhé řadě jsem vyvedl dle možností druhou vrstvou a obdobně jsem učinil pro další řady, pro které jsem využil pátou a šestou vrstvu. Dbal jsem, aby se signály, které chci připojit do první vrstvy nemuseli zbytečně vést přes napájecí vrstvy, což by neprospělo jejich kvalitě signálu. Také jsem se snažil použít co nejméně propojovacích děr, abych signál ideálně přivedl rovnou do vrstvy, ve které ho zapojím. Při takto velkém počtu tras bylo náročné si dopředu naplánovat všechny trasy, což vedlo k několika předělání tras a přesunů součástek. Dbal jsem také na vedení diferenciálních párů vedle sebe, jako jsou například SDA a SCL nebo datové signály USB data plus a data minus. Počet propojovacích děr jsem co nejvíce omezil. Dbal jsem také na symetrické rozpojení všech součástek pro usnadnění výroby, a osazení DPS.



## 6.6 Řešení



a) První vrstva

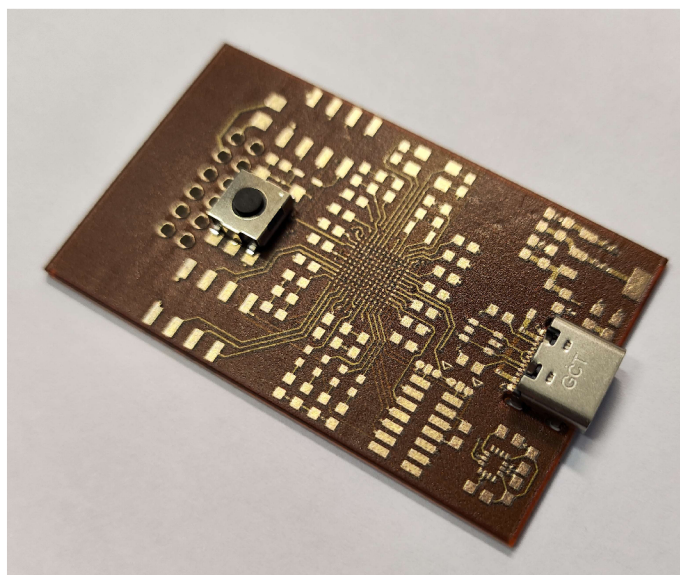
b) Druhá vrstva

c) Pátá vrstva

d) Šestá vrstva

Obrázek 6.3: Trasy a otisky součástek při návrhu prototypu DPS

DPS se následně nechala na pracovišti TUL vytisknout 3D tiskárnou.



Obrázek 6.4: Vytisknutá DPS se součástkami USB-C a tlačítkem reset

## 7 Návrh finální DPS

Po získání zkušeností z návrhu prototypu DPS jsem navrhl finální návrh DPS.

### 7.1 Rozměry finální DPS

Rozměry DPS jsem upravil na 33x65 mm z předchozích 33x55 mm. Jak už víme, tak šířka 33 mm je pevně daná, ale DPS bylo možné prodloužit, protože jsem omezen napájecím a zemnicím vstupem do modulu Domino pouze z horní části. Přidáním místa jsem vylepšil DPS o další komponenty.

### 7.2 Výběr MCU

Pro finální návrh DPS jsem si vybral MCU STM32F765VIH6 z kategorie STM32 s vysokým výkonem, protože má 0,8 mm vzdálenost mezi piny s velikostí pinů 0,4 mm. Takže zbývá mezera mezi piny 0,4 mm, což se domnívám, že je neoptimálnější volba pro trasování DPS.

Moje DPS je omezena rozměry, takže záleží na velikosti každé součástky. STM32F765VIH6 je 8x8 mm velké MCU se 100 piny, což je podobně velké jako MCU STM32U575AII6 s velikostí 7x7 mm a 169 piny.

#### 7.2.1 Popis MCU řady STM32F765xx

- Napájecí napětí v rozsahu od 1,7 V do 3,6 V.
- Obsahuje RTC s přesností na zlomky sekundy.
- 4 až 26 MHz a 32 kHz krystalové oscilátory.
- Nízká spotřeba energie: Režimy spánku, zastavení a pohotovosti.
- Obsahuje až 18 časovačů, 168 I/O portů s možností přerušení, 28 komunikačních rozhraní a další.
- obsahuje až 2 MB flash paměti a 512 kB SRAM. [19]

Flash paměť slouží k ukládání programového kódu a dat, které mají zůstat zachovány i po vypnutí napájení, zatímco SRAM je využívána pro dočasné ukládání dat během provozu procesoru.

Procesor podporuje režim spánku, při kterém je procesor zastaven. Všechny periferie, jako jsou komunikační rozhraní nebo senzory, nadále fungují a mohou probudit procesor v případě, že dojde k přerušení nebo nějaké události, která vyžaduje pozornost procesoru. Tento režim pomáhá šetřit energii a umožňuje periferiím provádět své funkce i v době, kdy procesor nepracuje.

## **Processor:**

Arm® 32bitový procesor Cortex®-M7.

2,14 DMIPS/MHz. [19]

To znamená, že procesor dokáže provést 2,14 milionu instrukcí za sekundu při frekvenci jednoho MHz (Tímto máme lepší představu o výkonu procesoru).

## **7.3 Počet vrstev DPS**

MCU STM32F765VIH6 má 0,8 mm vzdálenost mezi piny, to znamená, že můžu lépe vyvádět piny z BGA pouzdra. I přesto jsem si zvolil šestivrstvou DPS.

## **7.4 Návrh schématu DPS**

Schéma jsem měl částečně navržené z návrhu prototypu DPS. Finální DPS má větší rozměry, a tím pádem jsem ještě přidal různé komponenty do návrhu. V programu STM32cubeIDE jsem si našel MCU STM32U575AII6 a vytáhl jsem si piny, které využiji ve svém návrhu DPS.

Plánoval jsem, kde budou všechny komponenty umístěné a podle toho jsem v aplikaci experimentoval s výběrem alternativních pinů pro různé signály. Piny jsem změnil podle náčrtu, kde jsem si návrh naplánoval.

Po zvolení všech pinů jsem si stáhl symbol a otisk pouzdra MCU pro CAD aplikace.

Pro návrh jsem znovu zvolil CAD aplikaci EAGLE a přešel jsem k návrhu čárového schéma.

### **7.4.1 Požadavky pro návrh schématu**

Požadavky na návrh jsou podobné jako u prototypu DPS.

Návrh hřebenů pro zapojení modulu se částečně změnil (viz Tabulka 7.1).

Dále jsem měl za úkol zakomponovat do DPS:

Konektor pro připojení PMOD.

USB-C konektor s možnostmi napájení a komunikace s DPS.

Konektor JTAG.

Akcelerometr a gyroskop.

Resetovací tlačítko.

Programovatelné tlačítko.

3 programovatelné LED diody.

2 konektory s 8 piny, piny vybrány podle možností zapojení a využitelnosti (viz Tabulka 7.2).

Tabulka 7.1: Konfigurace hřebenů finálního DPS pro zapojení do modulu Domino

Index	Název pinu
1	GND
2	+3V3
3	I2C SCL
4	I2C SDA
5	NC
6	KLÍČ
7	ADC IN15
8	ADC IN14
9	ADC IN13
10	ADC IN12
11	ADC IN11
12	ADC IN10
13	ADC IN0
14	ADC IN1

Index	Název pinu
15	NC
16	NC
17	NC
18	NRST
19	TIM3 CH1
20	TIM12 CH1
21	TIM8 CH3
22	TIM4 CH3
23	DAC OUT2
24	DAC OUT1
25	ADC IN9
26	ADC IN7
27	ADC IN3
28	ADC IN2

NC – Nepřipojeno.

KLÍČ – Ochranný klíč pro zamezení chybného připojení.

Tabulka 7.2: Vyvedené piny na 2 konektorech (nad rámeček potřeb modulu Domino)

Index	Název pinu
1	+3V3
2	+3V3
3	GND
4	GND
5	PC10/SPI SCK
6	PC11/SPI MISO
7	PE3
8	PB5/SPI MOSI

Index	Název pinu
1	PB0
2	PA6
3	PD15
4	PE9
5	PD8
6	PB12
7	PD10
8	PB13

## 7.4.2 Postup návrhu čárového schématu

Z navrženého čárového schéma prototypu jsem převzal zapojení USB-C, zapojení krystalů, resetovacího tlačítka, konektoru JTAG, gyroskopu a akcelometru a konektoru PMOD.

Dále jsem navrhnul ochranu napájení MCU, ochranné kondenzátory jsem vybral podle technického dokumentu MCU. Hřebeny jsem zapojil podle tabulky 7.1 a konektory podle tabulky 7.2, programovatelné tlačítko a 3 programovatelné LED diody jsem zapojil podle technického dokumentu.

## 7.5 Trasování a umístění součástek

Protože jsem si vybral jiné MCU, celý fyzický návrh jsem navrhl od znova, narozdíl od návrhu schématu, které jsem měl částečně hotové,

### 7.5.1 Omezení návrhu pro realizaci výroby

Pro výrobu finální DPS jsem se rozhodl využít některé z výrobců DPS, tím pádem jsem byl omezen požadavky výrobců.

Potřeboval jsem použít slepé díry (díry pro spojení vnitřních vrstev DPS), takže možnost výroby u JLCPCB jsem vyřadil. Dále ALLPCB uvádí minimální požadavky na velikost DPS 80x80 mm, ale po kontaktování výrobce jsem se dozvěděl, že moji 33x65 mm DPS budou schopni vyrobit. Jak ALLPCB, tak i PCBWay má stejná omezení při výrobě. Obě společnosti podporují výrobu DPS s 0,1 mm spoji. Rozhodl jsem se ale použít 0,2 mm spoje, protože jsem nechtěl testovat limity výrobních společností a chtěl jsem zajistit spolehlivé trasy s co nejnižší možností rušení.

### 7.5.2 Postup návrhu schématu

Parametry pro návrh jsem už měl nastavené z návrhu prototypu. Pro třetí vrstvu DPS jsem zvolil zemnicí rovinu, aby také sloužila k oddělení napájecí vrstvy od zbytku obvodu. Napájecí rovinu jsem rozlil ve čtvrté vrstvě.

Nejdříve jsem umístil MCU doprostřed desky a natočil potřebné piny USB tak, aby směřovaly k plánovanému umístění USB-C. Dalším krokem bylo umístění a zapojení krystalů, které jsem umístil co nejbližší MCU a trasoval stejně dlouhými spoji, vedenými vedle sebe. Obvod a vrstvu pod krystaly jsem ohraničil GND, abych minimalizoval jakoukoli šanci na rušení těchto signálů od sousedních signálů. Dále jsem umístil a zapojil napájecí kondenzátory, tak aby jejich spoj byl dost široký a jejich vzdálenost byla co nejkratší k napájecím pinům MCU. Toto MCU má některé napájecí piny uprostřed pouzdra, jejich propojení s kondenzátory jsem vyřešil spojením přes druhou vrstvu.

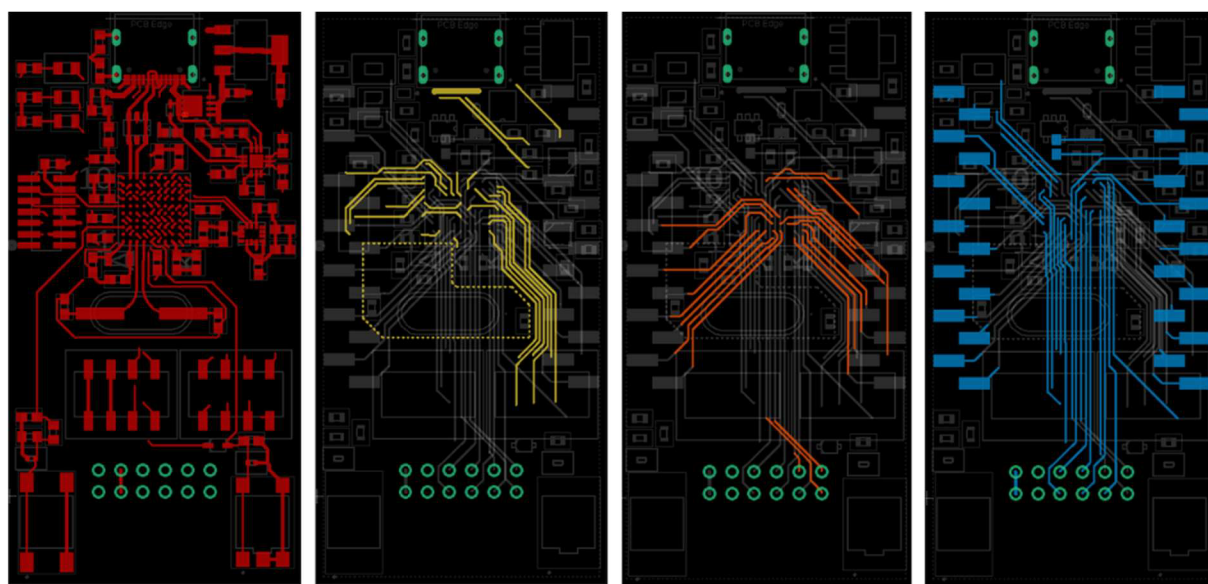
Pokračoval jsem umístěním USB. Napájení z USB jsem optimálně širokou a co nejkratší trasou propojil přes mosfet a LDO. Do čtvrté vrstvy jsem napětí 3,3 V přivedl třemi propojovacími dírami. Dále jsem zapojil vysokofrekvenční signály a diferenciální signály. Dále jsem zapojil zbývající součástky. Signály jsem mohl vést vedle sebe a propojit je bez potřeby jejich křížení. Při návrhu jsem použil pouze pár nezbytných propojovacích děr.

## 7.6 Řešení, uplatnění a vylepšení

Finální DPS je kvalitně navrhnutá a naroutována. Je dbáno na USB data plus a data minus, tyto signály jsou routovány trasou pouze o délce 12 mm. Vzdálenosti spojů krystalů jsou 2 mm a 8 mm, protože druhý krystal je větší a musí být umístěn za prvním krystalem. MCU má možnost i využití vnitřních krystalů.

Rušení a zkreslení signálu by mělo být minimální.

Návrh je jednoduše vyrobitelný, protože jsem použil minimální šířku tras a mezeru mezi trasami 0,2 mm, přestože výrobci podporují i 0,1 mm. Také jsem použil minimální počet propojovacích děr.



a) První vrstva

b) Druhá vrstva

c) Pátá vrstva

d) Šestá vrstva

Obrázek 7.1: Trasy a otisky součástek při návrhu finální DPS

### 7.6.1 Postup osazení DPS

DPS se osazuje pomocí šablony, která má otvory odpovídající umístění a rozměrům součástek. Šablona slouží k nanesení pájky na DPS. Poté se na DPS umístí součástky, které se z pájky při šetrném zacházení nepohnou. Poté se DPS položí do pece. V pájecí peci je dosaženo teploty, která roztaví pájku a vytvoří trvalé spoje mezi součástkami a DPS.

### 7.6.2 Způsoby testování DPS

DPS lze otestovat pomocí multimetru a rozhraní JTAG.

Spoje v první vrstvě DPS lze proměřit multimetrem v režimu kontinuity a tím zjistit, jestli jsou trasy propojeny. Dále lze změřit přívod napájení na dostupných bodech, zda přívod napájení funguje. Dále lze změřit odpor vodičů a odpor mezi dvěma různými vodiči.

Standard JTAG lze využít k testování komunikace mezi MCU a USB. Tím lze ověřit, zda jsou správně nastaveny komunikační registry a zda jsou signály USB řádně propojeny.

Pomocí JTAG lze také ověřit propojení všech konektorů, včetně hřebenů propojených s modulem. Také lze ověřit správnost oscilace krystalu a stabilitu generovaného hodinového signálu.

### 7.6.3 Uplatnění finální DPS

DPS se prvotně uplatní ve výuce. Dále lze DPS použít pro jakékoli využití v aplikační elektronice, v domácnosti nebo průmyslu.

DPS obsahuje a umožňuje:

USB typ C, který slouží pro oboustrannou komunikaci s MCU s rychlostí full speed a napájení DPS.

Možnost připojení PMOD I2S2.

Možnost připojení JTAG.

Gyroskop a akcelerometr.

3x programovatelné LED diody.

Reset tlačítko.

1x programovatelné tlačítko.

2x konektory, každý s 8 vyvedenými piny, například SPI.

Hřebený pro zapojení DPS do modulu Domino. Po propojení je možnost napájení DPS také z modulu a možnost využití modulu ke připojení dalších periférií.

#### 7.6.4 Možnosti vylepšení

I když jsem využil téměř všechny funkce MCU, tak by se DPS dala vylepšit například přidáním dalšího programovatelného tlačítka pro různé účely nebo přidáním dalších prvků. Byl jsem ale omezen rozměry DPS, což mi už neumožnilo přidat cokoliv navíc.

Nepoužité I/O by se mohli využít k připojení dalších periférií, například nevyužití rozhraní SPI se může využít ke komunikaci MCU se senzory nebo displejem.

Byly použity pouzdra MCU BGA, protože nejvíce šetří prostor. Použil bych pouze BGA s 0,8 mm vzdáleností mezi piny. Nebo pokud bych nebyl omezen místem, tak pouzdra QFP jsou možným řešením pro DPS s menším počtem vrstev. Hlavním důvodem pro použití MCU STM32F765VIH6 byla možnost snazšího vyvedení signálů. To nejen přispívá ke snadnějšímu routování, ale hlavně k lepším podmínkám signálů. Pro výběr MCU řad STM32 je nejlepší použít filtr v aplikaci STM32CubeIDE, můžeme si zde zvolit pouzdra našeho výběru a další parametry.

Protože jsou napájecí kondenzátory umístěny vedle sebe okolo MCU, tak je možné je propojit se zemí pomocí jedné díry pro více kondenzátorů, tím zlepšíme mechanické vlastnosti DPS. Pokud použijeme jednu díru pro každý z kondenzátorů, tak zlepšíme elektrické vlastnosti DPS.

Tyto MCU mají obecně nepřehledné využití a použití, z toho vyplývá, že vylepšení mohou být velmi rozsáhlá.



## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout a nechat vyrobit výukovou experimentální desku kompatibilní se stavebnicemi na pracovišti školitele. Pro návrh jsem použil šesti-vrstvou desku plošných spojů (DPS). Pro zajištění kvalitního návrhu DPS byly navrženy 2 DPS. První DPS je označena jako prototyp a druhá je pojmenována jako finální DPS. Na základě rešerše byly pro obě DPS zvoleny MCU řady STM32. Pro prototyp byl zvolen MCU STM32U575AII6, který vyniká svými režimy pro nízkou spotřebu, tím je ideální pro časově dlouhé testování a měření. STM32U575AII6 také splňuje požadavky pro velký výpočetní výkon, obsahuje SRAM o velikosti 786 kB, procesor, který dokáže provést 1,5 milionu instrukcí za sekundu při frekvenci jednoho MHz a krystalové oscilátory s 4 až 50 MHz a 32 kHz. Navíc je prototyp vybaven krystaly s 8 MHz a 32 kHz. Prototyp je dále vybaven konektorem pro připojení PMOD, USB-C konektorem s možnostmi napájení a komunikace s DPS, konektorem JTAG, akcelerometrem a gyroskopem, resetovacím tlačítkem a hřebeny pro zapojení do modulu Domino, se kterým jsem se seznámil na pracovišti školitele.

Pro finální DPS byl zvolen MCU STM32F765VIH6, který vyniká procesorem, který dokáže provést 2,14 milionu instrukcí za sekundu při frekvenci jednoho MHz. Dále obsahuje SRAM o velikosti 512 kB a krystalové oscilátory s 4 až 26 MHz a 32 kHz. Navíc je prototyp vybaven krystaly s 8 MHz a 32 kHz. STM32F765VIH6 také splňuje požadavky pro úsporný provoz, je vybaven režimem spánku, kde je procesor zastaven a probudí se jen v případě přerušení. Finální DPS je dále vybavena konektorem pro připojení PMOD, USB-C konektorem s možnostmi napájení a komunikace s DPS, konektorem JTAG, akcelerometrem a gyroskopem, resetovacím tlačítkem, jedním programovatelným tlačítkem, třemi programovatelnými LED diody, dvěma konektory s osmi piny pro libovolné využití a hřebeny pro zapojení do modulu Domino.

V první části práce jsem se zabýval mikroprocesory STM32, zaměřil jsem se na řady s velkým výpočetním výkonem, které jsem porovnal podle počtu instrukcí za sekundu při frekvenci jednoho MHz. A na řady s úsporným provozem, které jsem porovnal podle benchmarku porovnávající výkon a spotřebu energie.

Ve druhé části práce jsem popsal a vysvětlil funkci periférií a rozhraní použitých v DPS.

Při tvorbě návrhu DPS byl brán zřetel na to, aby DPS fungovala efektivně a spolehlivě. Zajistil jsem optimální rozvržení vrstev a důkladně jsem propojil jednotlivé komponenty s MCU, tak abych minimalizoval rušení signálů a maximalizoval propustnost dat.

V sedmé kapitole práce je popisováno zvolené řešení, postup osazení, způsoby testování, případná budoucí uplatnění a vylepšení.

## Použitá literatura

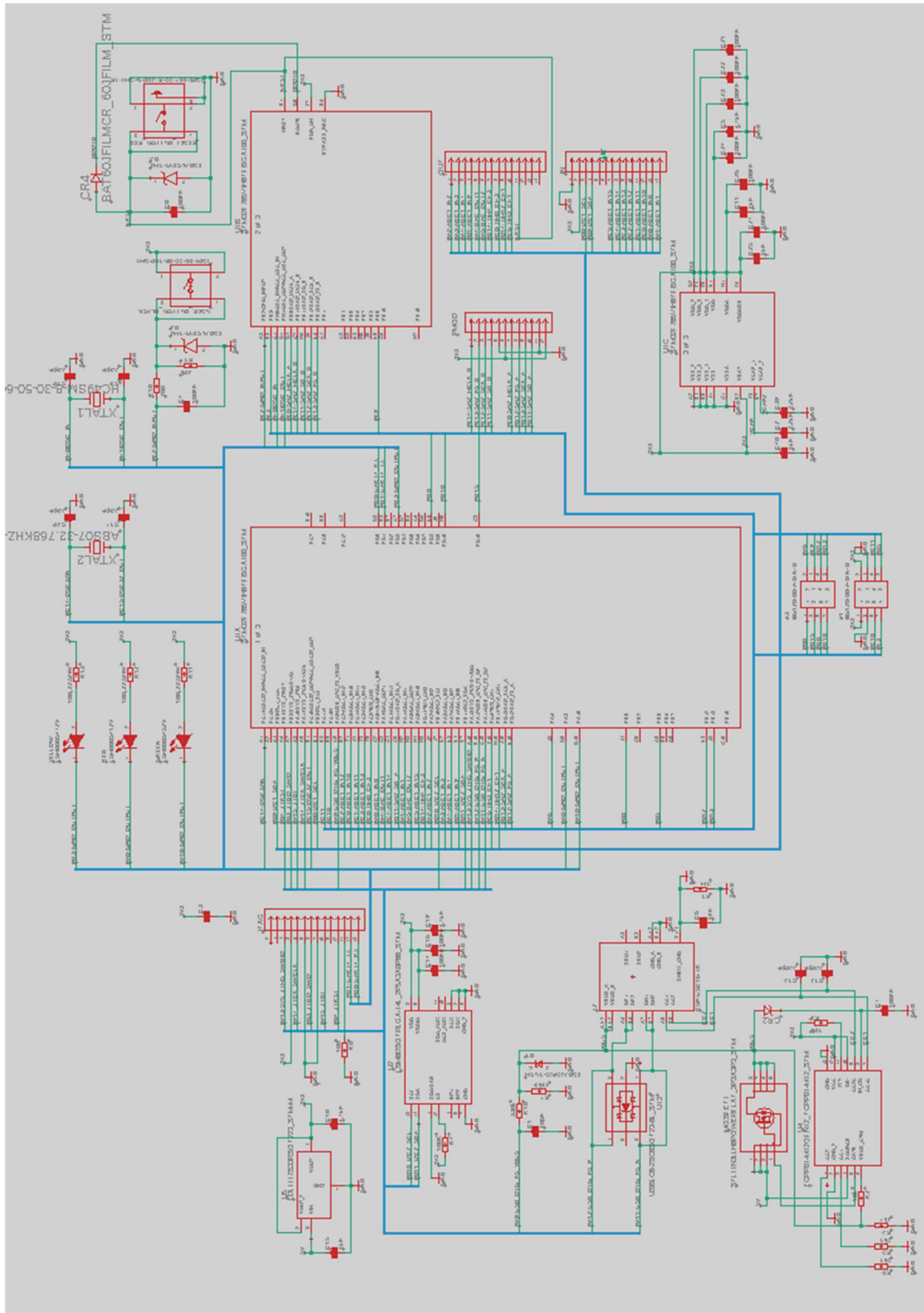
- [1] STMICROELECTRONICS. *STM32 32-bit Arm Cortex MCUs*. Online. ST. Dostupné z: <https://www.st.com/en/Microcontrollers-Microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>. [cit. 2024-04-13].
- [2] STMICROELECTRONICS. *STM32 High Performance MCUs*. Online. ST. [https://www.st.com/content/st\\_com/en.html](https://www.st.com/content/st_com/en.html). Dostupné z: <https://www.st.com/en/Microcontrollers-Microprocessors/stm32-high-performance-mcus.html>. [cit. 2024-04-13].
- [3] STMICROELECTRONICS. *STM32 Ultra Low Power MCUs*. Online. ST. Dostupné z: <https://www.st.com/en/Microcontrollers-Microprocessors/stm32-ultra-low-power-mcus.html>. [cit. 2024-04-13].
- [4] *Universal Serial Bus (USB)*. Online. Geeksforgeeks. 23 Jan, 2024. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/universal-serial-bus-usb/>. [cit. 2024-04-13].
- [5] TEXAS INSTRUMENTS. *A Primer on USB Type-C® and USB Power Delivery Applications and Requirements*. Online. March 2022. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/wp/slyy109b/slyy109b.pdf?ts=1713728007650&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/wp/slyy109b/slyy109b.pdf?ts=1713728007650&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). [cit. 2024-04-13].
- [6] ROGERS, Andrew. *Introduction to USB Type-C™*. Online. 2015 Microchip Technology Inc. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00001953a.pdf>. [cit. 2024-04-16].
- [7] KAVALCHUK, Aliaksandr. *Diving into JTAG protocol. Part 1 — Overview*. Online. Medium. Jul 27, 2023. Dostupné z: <https://medium.com/@aliaksandr.kavalchuk/diving-into-jtag-protocol-part-1-overview-fbdc428d3a16>. [cit. 2024-04-16].
- [8] GALLAGHER, Sam. *Introduction to JTAG and the Test Access Port (TAP)*. Online. Allaboutcircuits. November 18, 2020. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-jtag-test-access-port-tap/>. [cit. 2024-04-16].
- [9] CAMPBELL, Scott. *BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL*. Online. Circuitbasics. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>. [cit. 2024-04-16].
- [10] DIGILENT, INC. *Pmod I2S2 Reference Manual*. Online. Digilent. Dostupné z: <https://digilent.com/reference/pmod/pmodi2s2/reference-manual>. [cit. 2024-04-19].
- [11] CADENCE DESIGN SYSTEMS. *PCB Design Layout Guidelines for Engineers*. Online. Cadence. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-pcb-design-layout-guidelines-for-engineers>. [cit. 2024-04-19].
- [12] PETERSON, Zachariah. *Top 5 PCB Design Rules You Need to Know*. Online. Altium. March 15, 2024. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/pcb-layout-guidelines>. [cit. 2024-04-25].

- [13] BEA ELECTRONICS. *Innovations With PCB Manufacturing Through 3D Printing*. Online. Beadelectronics. May 26, 2023. Dostupné z: <https://www.beadelectronics.com/blog/innovations-with-pcb-manufacturing-through-3d-printing>. [cit. 2024-04-25].
- [14] PCBBUY. *How Does PCB Milling Work in the PCB Industry?* Online. PCBBUY. Pcbbuy. 2022. Dostupné z: <https://www.pcbbuy.com/news/How-Does-PCB-Milling-Work-in-the-PCB-Industry.html>. [cit. 2024-04-26].
- [15] AYODELE, Abiola. *PCB Manufacturing Process: A Comprehensive Guide to Understanding and Mastering the Techniques*. Online. Wevolver. 02 Feb, 2024. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/pcb-manufacturing-process>. [cit. 2024-05-05].
- [16] STMICROELECTRONICS. *1.2 A high PSRR low-dropout linear voltage regulator*. Online. Mouser. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/ld11117-1849797.pdf>. [cit. 2024-05-06].
- [17] VSE CORPORATION. *Crystal Oscillator PCB Layout Guidelines*. Online. VSE. June 2, 2021. Dostupné z: <https://www.vse.com/blog/2021/06/02/crystal-oscillator-pcb-layout-guidelines/>. [cit. 2024-05-06].
- [18] STMICROELECTRONICS. *Guidelines for oscillator design on STM8AF/AL/S, and STM32 MCUs/MPUs - Application note*. Online. ST. March 2024. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an2867-guidelines-for-oscillator-design-on-stm8afals-and-stm32-mcusmpus-stMicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an2867-guidelines-for-oscillator-design-on-stm8afals-and-stm32-mcusmpus-stMicroelectronics.pdf). [cit. 2024-05-07].
- [19] STMICROELECTRONICS. *Datasheet - STM32F765xx STM32F767xx STM32F768Ax STM32F769xx*. Online. ST. August 2023. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f765vi.pdf>. [cit. 2024-05-08].
- [20] ABE.TEC, S.R.O. *BGA - pouzdra s kulovými vývody*. Online. SMT centrum. 2017. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/pouzdra-smd/bga-pouzdra-s-kulovymi-vyvody/>. [cit. 2024-05-09].
- [21] EFY Bureau. *Understanding IC Packaging: Types and Applications*. Online. Electronicsforu. January 5, 2024. Dostupné z: <https://www.electronicsforu.com/resources/dip-smd-qfp-bga-ic-packages>. [cit. 2024-05-09].
- [22] STMICROELECTRONICS. *Datasheet - STM32U575xx*. Online. ST. June 2022. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/stm32u575ag-2585562.pdf>. [cit. 2024-05-09].
- [23] *PMOD I2S2*. Online. Wordpress. Dostupné z: <https://audiodsplab.wordpress.com/pmod-i2s2/>. [cit. 2024-05-10].
- [24] JLCPCB. *Everything You Need to Know about BGA Technology in PCB Assembly*. Online. JLCPCB. Feb 27, 2024. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/blog/152-everything-you-need-to-know-about-bga-technology-in-pcb-assembly>. [cit. 2024-05-10].
- [25] *PCBWay PCB Capabilities*. Online. PCBWAY. PCBWAY. Dostupné z: <https://www.pcbway.com/capabilities.html>. [cit. 2024-05-10].

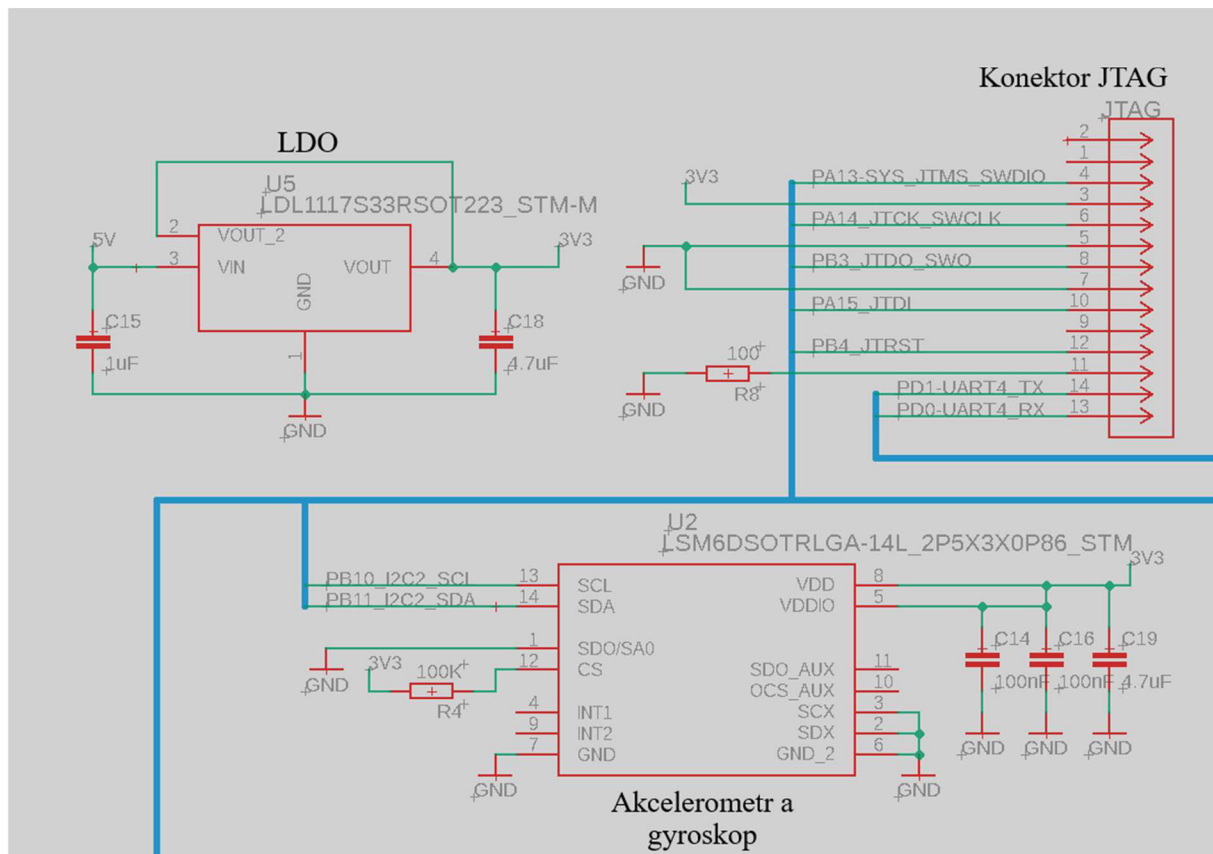
- [26] ALLPCB. *Advanced PCB Capability*. Online. ALLPCB. Dostupné z: [https://www.allpcb.com/standard\\_pcb\\_manufacturing\\_capability.html](https://www.allpcb.com/standard_pcb_manufacturing_capability.html). [cit. 2024-05-10].
- [27] JLCPCB. *PCB Manufacturing & Assembly Capabilities*. Online. JLCPCB. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>. [cit. 2024-05-10].
- [28] HOLTEK SEMICONDUCTOR INC. *Uživatelská příručka doporučených Footprints řady HOLTEK QFP*. Online. Manuals.plus. 2023. Dostupné z: <https://manuals.plus/cs/holtek/qfp-series-recommended-footprints-manual>. [cit. 2024-05-10].
- [29] CADENCE DESIGN SYSTEMS. *QFN Package Process Flow: Advantages and Types*. Online. Cadence. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-qfn-package-process-flow-advantages-and-types>. [cit. 2024-05-10].
- [30] VOJÁČEK, Antonín. *Komunikační standard IEEE 1149.1 (JTAG)*. Online. Automatizace.hw.cz. 2005. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005031501>. [cit. 2024-05-10].

# Přílohy

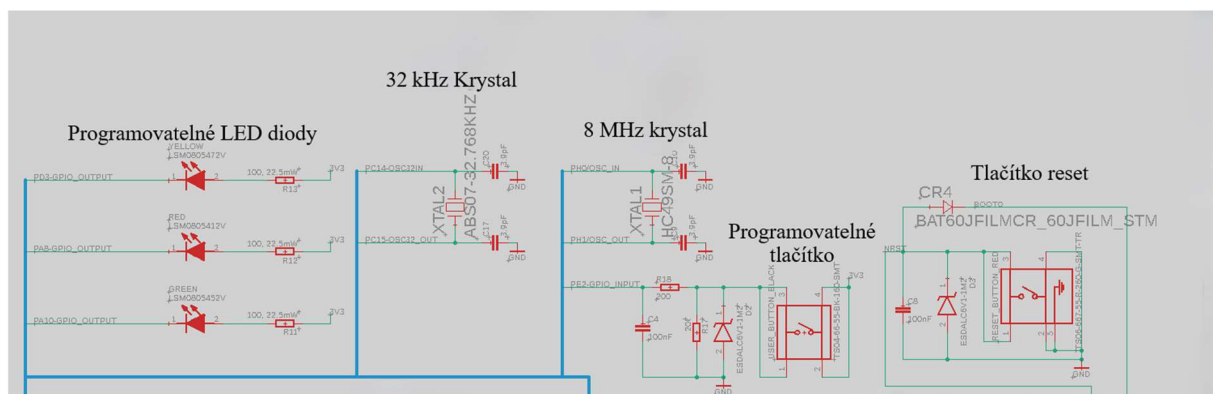
## A Celé elektrické schéma (rozděleno na šest částí)



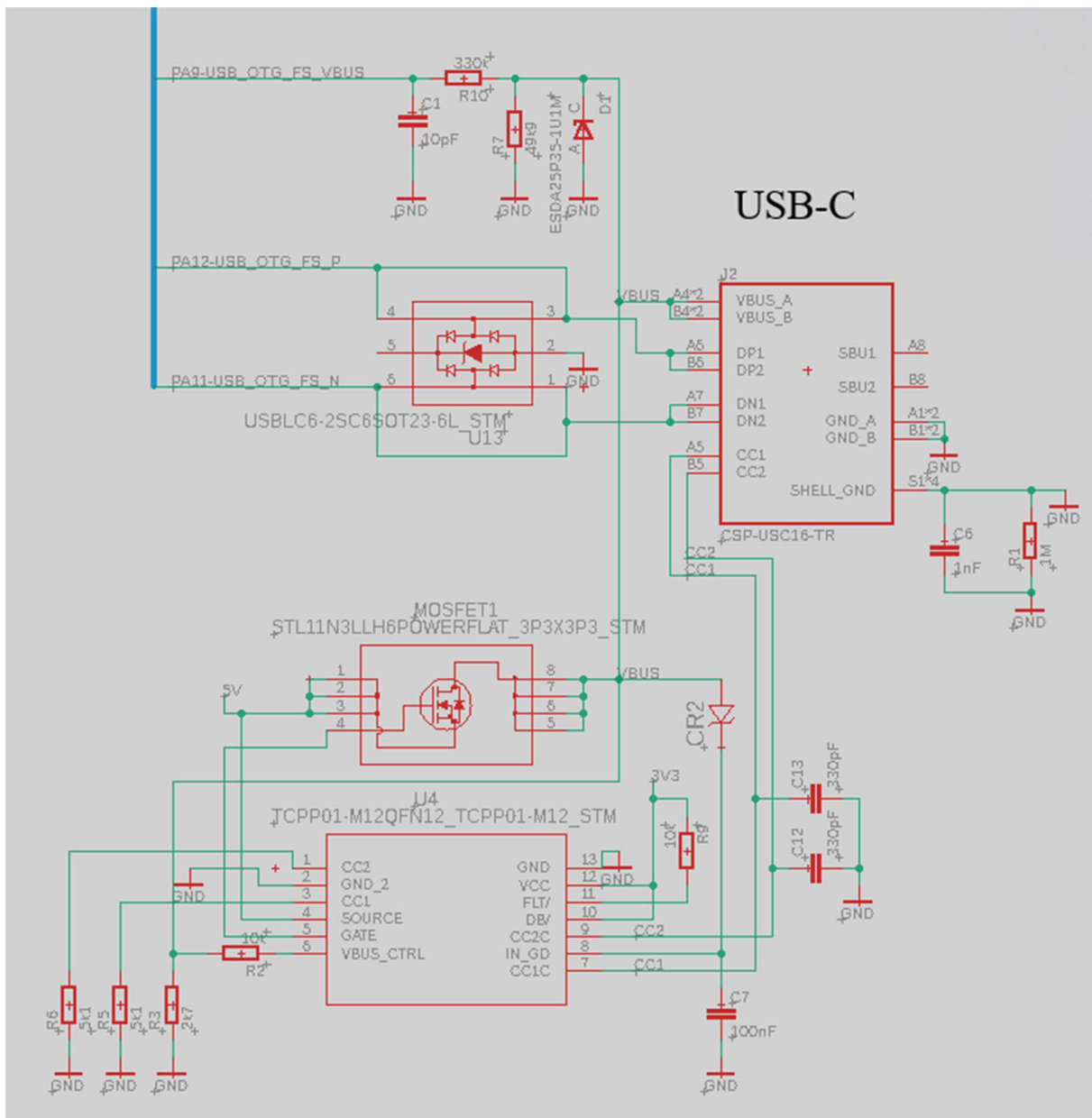
## B Elektrické schéma část první



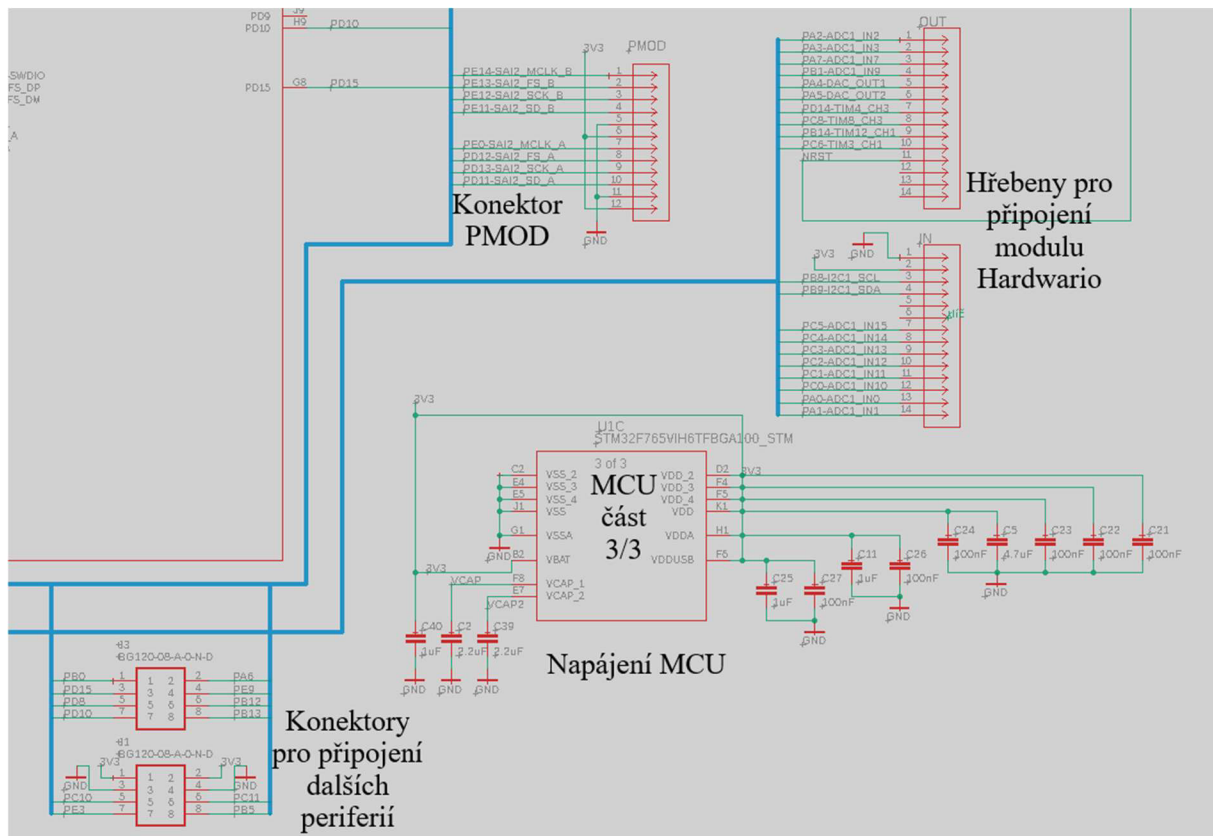
## C Elektrické schéma část druhá



## D Elektrické schéma část třetí



## E Elektrické schéma část čtvrtá



## F Elektrické schéma část pátá

