



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**NÁVRH UNIVERZÁLNÍHO MIKROKONTROLÉRU PRO
AUTOMOBILOVÉ ECU**

DESIGN OF UNIVERSAL MICROCONTROLLER FOR AUTOMOTIVE ECUS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Midrla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Kučera, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Daniel Midrla**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Kučera, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh univerzálního mikrokontroléru pro automobilové ECU

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh univerzálního mikrokontroléru pro řídicí jednotky automobilů využitím softwaru KiCad a procesoru ARM. Přípravení základního softwarového rozhraní pro komunikaci s jednotlivými piny procesoru užitím softwaru STM32CubeMX, TrueSTUDIO nebo Simulink. Dále ověření funkčnosti mikrokontroléru.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše k dané problematice.
Návrh DPS mikrokontroléru.
Naprogramování základního rozhraní pro komunikaci se vstupy a výstupy.
Ověření funkčnosti mikrokontroléru.

Seznam doporučené literatury:

ZÁHLAVA, Vít. Metodika návrhu plošných spojů. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-2193-9.

VÁŇA, Vladimír. ARM pro začátečníky. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-73-0-246-6.

SELECKÝ, Matúš. Arduino: uživatelská příručka. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-2-1-4840-2.

ŠTĚRBA, Pavel. Elektronika a elektrotechnika motorových vozidel: Seřizování, diagnostika závad a chybové kódy OBD. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0271-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, výrobou a programováním embedded zařízení založeného na mikrokontroléru s ARM procesorem. Hlavní zamýšlená oblast aplikace tohoto zařízení je v motorových vozidlech, nicméně při návrhu je kladen důraz na univerzalitu. Úvodem jsou shrnuty teoretické poznatky související s danou problematikou. Poté následuje popis samotného procesu návrhu, výroby a programování zařízení. Závěrem je s využitím testovacího hardwaru provedeno ověření funkčnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrokontrolér, STM32, napájení, sběrnice, SMD, DPS, deska, programování, TruStudio

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the process of designing, manufacturing, and programming of an embedded device based on a microcontroller with an ARM processor. The primary field of application of this device is motor vehicles. However, there has been an emphasis on universality during the design stage. The thesis begins with a summary of theoretical knowledge concerning this topic. Then follows a description of the design, manufacturing, and programming of the device. Finally, the functionality of the device is verified with the use of testing hardware.

KEYWORDS

Microcontroller, STM32, power supply, bus, SMD, PCB, board, programming, TruStudio

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIDRLA, Daniel. *Návrh univerzálního mikrokontroléru pro automobilové ECU*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124098>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 44 s. Vedoucí práce Pavel Kučera.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Kučery, Ph.D., a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 25. června 2020

.....

Daniel Midrla

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Kučerovi, Ph.D., za vedení mé práce a cenné odborné poznatky a připomínky v průběhu tvorby práce. Velký dík patří také rodině a přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

Úvod.....	10
1 Úvod do problematiky embedded zařízení a jejich návrhu.....	11
1.1 Mikrokontrolér.....	11
1.1.1 Napájení.....	13
1.1.2 Nahrání kódu do paměti mikrokontroléru.....	13
1.2 Zpracování signálů.....	13
1.2.1 Signály ze snímačů.....	13
1.2.2 Řízení akčních členů.....	14
1.2.3 Typy sběrnic.....	14
1.2.3.1 SPI.....	14
1.2.3.2 I ² C.....	14
1.2.3.3 CAN bus.....	15
1.3 Návrh a výroba embedded zařízení.....	17
1.3.1 Tvorba schématu.....	17
1.3.2 Návrh desky plošného spoje (DPS).....	18
1.3.3 Pouzdra součástek.....	18
1.3.4 Možnosti výroby DPS.....	19
1.3.5 Osazení DPS.....	20
2 Návrh mikrokontroléru.....	21
2.1 Požadované funkce a vlastnosti.....	21
2.2 Volba mikrokontroléru.....	21
2.3 Schematický návrh.....	22
2.3.1 Zapojení mikrokontroléru.....	23
2.3.2 USB rozhraní.....	24
2.3.3 Regulace napětí.....	24
2.3.4 Krystalový oscilátor.....	25
2.3.5 SWD konektor.....	26
2.3.6 CAN transceivery.....	26
2.3.7 Výkonový spínač.....	27
2.3.8 Tlačítko reset.....	28
2.3.9 LED diody.....	28
2.3.10 Vývody desky plošného spoje.....	28
2.4 Návrh DPS.....	29
2.5 Výroba DPS a osazení součástkami.....	32
3 Programování mikrokontroléru.....	35
3.1 Konfigurace mikrokontroléru.....	35
3.2 Tvorba kódu.....	37
4 Ověření funkčnosti.....	38
Závěr.....	40
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	43

ÚVOD

Automobilový průmysl během posledních několika let nepochybně prošel výraznými změnami. Jejich příčinou jsou zejména přísnější nároky na snižování emisí motorových vozidel, ale i požadavky na bezpečnost a očekávání zákazníků v oblasti komfortní výbavy. Páteří pokroku ve všech těchto oblastech je rozvoj elektrických a elektronických systémů. Zatímco v počátcích sloužily řídicí jednotky převážně k řízení elektronického vstřikování paliva, dnes zasahují do všech konstrukčních celků tvořících automobil.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, výrobou a programováním mikrokontroléru pro aplikaci v motorových vozidlech. Mikrokontrolérem se zde rozumí embedded zařízení, tedy deska schopná vykonávat samostatně určenou funkci. Základem tohoto zařízení je výkonný mikrokontrolér STM32F205RET6, který v součinnosti s dalšími součástkami na desce umožňuje široké spektrum funkcí.

První kapitola je věnována základním pojmům souvisejícím s tématem práce. Je zde uveden popis mikrokontroléru a jeho součástí. Další část kapitoly pojednává o způsobech zpracování vstupních signálů mikrokontrolérem a řízení akčních členů na základě těchto vstupů. Také jsou zde shrnuty typy sběrnic používané obecně v rámci embedded zařízení a blíže je popsána sběrnice CAN (Controller Area Network) specifická pro automobilový průmysl. Dále kapitola nabízí obecný postup návrhu DPS (desky plošného spoje). V první řadě je popsáno, jakým způsobem vybrat jednotlivé součástky. Poté následuje popis tvorby schématu a následně návrhu samotné desky plošného spoje. Rovněž jsou uvedeny základní typy pouzder SMD (Surface mount device) součástek. Kapitola pokračuje shrnutím možností výroby desek plošného spoje, podrobněji je popsána nejčastěji uplatňovaná semiaditivní výroba. Závěrem kapitoly jsou shrnuty metody osazování DPS.

Práce pokračuje kapitolou o samotném návrhu a výrobě desky mikrokontroléru. Jsou zde specifikovány požadavky na desku, následuje výběr jednotlivých součástek na základě těchto požadavků. Poté je prostřednictvím schématu popsáno zapojení součástek do obvodů a jsou uvedeny případné související výpočty. Kapitola pokračuje shrnutím procesu návrhu DPS, následné výroby a osazování desky součástkami.

Třetí kapitola shrnuje proces „oživování“ desky, tedy konfiguraci mikrokontroléru, tvorbu inicializačního kódu a následné programování. Pro demonstrativní účely a základní ověření funkčnosti je naprogramována signalizace LED (Light-emitting diode) diodami.

V poslední kapitole je popsáno ověření funkčnosti mikrokontroléru na základě vyhodnocení digitálního vstupu. To je provedeno s využitím hardwaru společnosti National Instruments.

Cílem práce je zhotovení základního univerzálního zařízení. Toto zařízení bude dle složitosti požadavku schopno buď samostatně, nebo doplněním o další obvody schopno vykonávat takřka jakoukoliv funkci nejen v motorovém vozidle.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY EMBEDDED ZAŘÍZENÍ A JEJICH NÁVRHU

Tato kapitola je určena k seznámení se základními pojmy souvisejícími s embedded zařízeními a jejich tvorbou. Základní přehled o funkci mikrokontroléru, jeho vlastnostech a možnostech konektivity je předpokladem pro jeho vhodný výběr a následný návrh desky.

Samotnému návrhu předchází specifikace požadavků na funkce desky. Na základě toho jsou poté voleny součástky, které budou dané funkce zajišťovat. Při návrhu plošného spoje je třeba dodržovat stanovená pravidla, obzvláště s ohledem na častější výskyt rychlých a výkonných obvodů. Jejich nedodržení může mít za následek nejen horší výdrž výrobku, ale mnohdy i jeho úplnou nefunkčnost. [1]

Centrálním prvkem desky mikrokontroléru je mikrokontrolérová jednotka (MCU – Microcontroller unit), taktéž označovaná jako mikrokontrolér. Je tedy třeba dbát na rozlišení těchto dvou pojmů, mikrokontrolér označuje jak zhotovenou desku, tak i samotnou součástku. MCU v sobě zahrnuje kromě procesoru i paměti a další prvky, například obvod krystalového oscilátoru. Při volbě MCU je třeba dbát na dostatečný výkon procesoru, velikost paměti, počet vstupních a výstupních pinů a s tím související možnosti konektivity. [2]

Mikrokontrolér je v rámci desky doplněn integrovanými obvody zajišťujícími požadované funkce. Mohou to být napětíové regulátory, výkonové spínače k řízení akčních členů nebo různé signálové převodníky pro umožnění komunikace s dalšími jednotkami prostřednictvím sběrnic. Příkladem poslední zmíněné skupiny je budič neboli transceiver pro sběrnici CAN. Dále je obvod doplněn pasivními součástkami dle katalogových listů součástek a teoretických znalostí elektrotechniky (např. blokovací kondenzátory) a součástkami pro signalizaci a ovládání, jako jsou tlačítka a LED diody.

1.1 MIKROKONTROLÉR

Mikrokontrolér je základní součástí jakékoliv řídicí jednotky. Za pomoci předepsaných instrukcí umožňuje ovládním dalších prvků na desce vykonávat funkci řízení. Skládá se z procesoru, vstupních a výstupních zařízení, programové paměti, operační paměti, sběrnice systému, oscilátoru, časovačů, watchdogů a dalších periférií (obr. 1). [3]

Procesor vykonává instrukce uložené v programové paměti a také aritmetické a logické operace. [3]

Vstupní a výstupní zařízení řídí výměnu dat s perifériemi. Jedná se například o digitální vstupy a výstupy, A/D (analogově digitální) a D/A (digitálně analogový) převodníky pro zpracování analogového signálu a v neposlední řadě sériová rozhraní pro komunikaci prostřednictvím sběrnic, jako jsou I²C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface) a zejména v automobilovém průmyslu CAN bus. Jednotlivé typy sběrnic a rozdíly mezi nimi budou popsány dále. [3]

V programové paměti je uložen kód uživatelského programu a další data. Tato paměť musí být nevolatilní, tedy schopna uchovat uložené informace i po přerušení dodávky elektrické energie. Dle možnosti prepisovat uložená data se rozlišují různé typy programové paměti. Základními typy jsou paměti ROM (Read-only memory) a PROM (Programmable ROM), u kterých není po prvním uložení možné smazat a přepsat uložená data. To umožňují paměti typů EPROM

(Erasable PROM), EEPROM (Electrically erasable PROM) a flash EEPROM. Tyto tři zmíněné se dále liší způsobem, jakým je možné paměť vymazat. Nejpoužívanějším je typ flash EEPROM. Je to dáno možností odstranit data bez nutnosti demontáže celé jednotky. Kapacita těchto pamětí se u mikrokontrolérů typicky pohybuje přibližně v rozmezí 2 až 512 kB. [3]

Operační paměť slouží k dočasnému ukládání právě zpracovávaných dat. S ohledem na to není nutné zachování dat po přerušení napájení. [3]

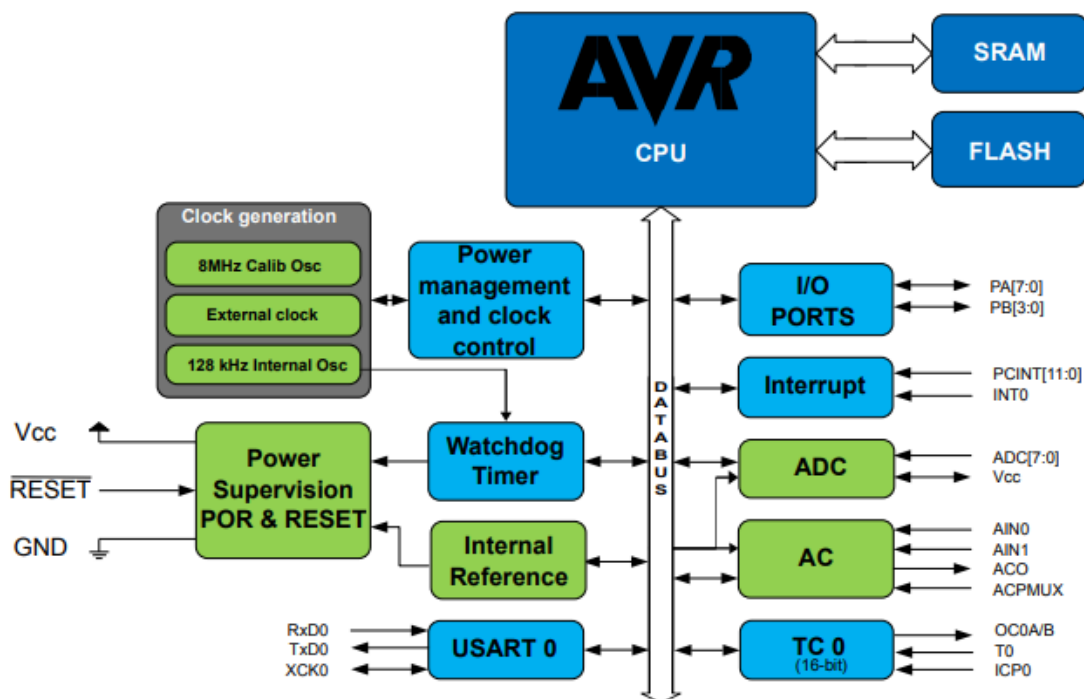
Sběrnicevým systémem propojuje v rámci mikrokontroléru jeho jednotlivé části. [3]

Obvod oscilátoru zajišťuje, aby průběh operací v mikrokontroléru probíhal v rámci předdefinovaného časového cyklu. Frekvence krystalu tak udává i výslednou frekvenci procesoru a tím i jeho výkon. Frekvence procesorů mikrokontrolérů se běžně pohybuje v řádech desítek až stovek MHz. [3] Vestavěný krystal MCU je ale často vhodné nahradit externím, a to za účelem zvýšení přesnosti a stability frekvence.

Časovače umožňují mikrokontroléru měřit čas, díky čemuž je možné efektivně spouštět úlohy v pravidelných intervalech. V případě jejich správného využití tak systém může působit dojmem, že vykonává zároveň více funkcí. [4]

Watchdog je specifický druh časovače. Jeho úkolem je hlídání správné funkce zařízení a jeho restartování v případě chyby. Může mít podobu programu nebo fyzické periferie mikrokontroléru. [4]

Vztahy mezi jednotlivými částmi mikrokontroléru popisuje blokový diagram (obr. 1).



Obr. 1 Příklad blokového diagramu AVR mikrokontroléru [5]

Mikrokontrolér je soustava komponentů podobná běžnému stolnímu počítači. Spojení součástek je ale realizováno v mnohem menším měřítku, a to v rámci jednoho pouzdra. [2]

Další rozdíl oproti běžnému počítači je nemožnost přepínání mezi programy. V mikrokontroléru běží v nekonečné smyčce nahraný jeden program, který zajišťuje regulaci daného systému. [3] Výjimkou je případ implementace operačního systému v reálném čase (RTOS, Real-time operating system), jako je například FreeRTOS. Takový operační systém umožňuje funkci multitaskingu, díky čemuž je mikrokontrolér schopný vykonávat současně více operací. [4]

1.1.1 NAPÁJENÍ

Deska mikrokontroléru může být napájena různými způsoby dle požadované aplikace. V případě prototypování a experimentálního použití je často zprostředkováno pomocí USB (Universal Serial Bus) konektoru. Další možností může být napájení z baterie nebo externího zdroje. [4] V každém případě je při návrhu desky nutno vstupní napětí ošetřit výkonovým spínačem, který při přetížení napájení automaticky odpojí. Dále je dle potřeby nutno regulovat vstupní napětí na požadovanou hodnotu mikrokontroléru a dalších součástek.

1.1.2 NAHRÁNÍ KÓDU DO PAMĚTI MIKROKONTROLÉRU

K nahrání uživatelského kódu do flash paměti mikrokontroléru se používají různá rozhraní. Podle vybavy mikrokontroléru je možné nahrát kód prostřednictvím I²C, CAN, SPI, JTAG nebo SWD (Serial Wire Debug). [4] Nahrání kódu přes zmíněná rozhraní se provádí s využitím debuggerů a adaptérů, umožňujících propojení s USB portem počítače. [2] Například v případě mikrokontrolérů společnosti STMicroelectronics se používá zařízení ST-Link s využitím rozhraní SWD.

V případě některých běžnějších vývojových desek, jako jsou například desky Arduino, se nahrání kódu provádí přímo propojením desky a počítače přes USB. Toho je docíleno obsazením adaptéru ze sériového rozhraní na USB přímo na desce. [4] Podobné řešení nabízí i vývojové desky DISCOVERY již zmíněného výrobce STMicroelectronics. V jejich případě je už na desce obsaženo zařízení ST-Link, není tedy třeba jej externě připojovat. [6]

1.2 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ

Řídící jednotky motorových vozidel korigují provozní parametry na základě zpracovaných vstupních signálů, ať už analogových nebo digitálních, jejichž zdrojem jsou snímače. [7] Jelikož navrhovaný mikrokontrolér je určen právě pro jednodušší aplikace na vozidle, je nutno se touto problematikou zabývat.

1.2.1 SIGNÁLY ZE SNÍMAČŮ

K zpracování analogového signálu číslicovým obvodem je třeba jeho převedení A/D převodníkem. Tím dojde k diskretizaci spojitého vstupního signálu. Počet stupňů, na které je možné požadovaný rozsah signálu rozložit, je určen bitovým počtem převodníku. S rostoucím počtem bitů je při tom dosaženo výrazného nárůstu přesnosti. Například při skoku z 8bitového rozlišení na 16bitové se zvýší počet stupňů z 255 na 65535. Není ale vhodné vždy aplikovat nejvyšší možné rozlišení převodníku. Naopak je žádoucí zvolit nejnižší dostačující rozlišení, protože je tím zaručeno rychlejší zpracování dat. [7]

Digitální vstupní signály jsou binárního charakteru, rozlišuje se stav logické 1 a logické 0. Příkladem je signál, který informuje o stavu sledovaného zařízení, tedy jestli je zapnuto nebo vypnuto. Tyto signály mikrokontrolér zpracovává přímo. [3]

1.2.2 ŘÍZENÍ AKČNÍCH ČLENŮ

Při řízení akčních členů jsou požadované veličiny regulovány analogově, kdy je velikost regulované veličiny závislá na řídicím signálu, či pulsně, což je dnes díky kvalitnější regulaci dominantní způsob. [7]

Pulsní řízení je realizováno přepínáním opačných stavů (např. zapnuto/vypnuto) v různých intervalech. Dle typu akčního členu probíhá řízení buď ve dvou vodičovém nebo třívodičovém zapojení. Při zapojení dvou vodičů je jeden vývod akčního členu trvale napájen a druhý je pulsně uzemňován. V případě tří vodičů je napájecí i zemnicí vodič trvale zapojen, řídicí jednotka pak třetím vodičem posílá impuls k sepnutí. To eliminuje vedení vysokého napětí řídicí jednotkou a tím i nutnost zahrnout na desce výkonové obvody. Pro ovládání vstřikovačů, podtlakových a obtokových ventilů se používá dvou vodičové zapojení. Oba typy zapojení se uplatňují v případě spínání zapalovacích cívek. [7]

Závislost změny stavu akčního členu na změně požadované veličiny popisují regulační algoritmy. Rozlišuje se regulace proporcionální, integrační a derivační, případně jejich kombinace, např. PID regulátor. Proporcionální regulace je charakteristická nemožností setrvání řízené veličiny přesně na požadované hodnotě, dochází ke kolísání kolem této hodnoty. Nejběžněji se pro řízení motorů uplatňuje PI regulace, tedy spojení proporcionálního a integračního algoritmu. Tento typ umožňuje pohotovou regulaci s možností reagovat na případné deviace. [7]

1.2.3 TYPY SBĚRNIC

V této kapitole jsou nejprve shrnuty vlastnosti typů sběrnic uplatňovaných obecně v počítačové technice. Následně je podrobněji popsána sběrnice CAN.

1.2.3.1 SPI

Sběrnice SPI je sériové periferní rozhraní. Používá se pro synchronní přenos na malou vzdálenost. Přenos je možný v režimu full duplex, to znamená schopnost současného příjmu a vysílání informací. Maximální rychlost přenosu je 10 MHz. [4]

Na rozdíl od sběrnice CAN, kde jsou jednotlivá zařízení na stejné úrovni [7], se u SPI rozlišují zařízení master a slave. Zařízení master je v tomto systému pouze jedno, zajišťuje řízení komunikace. SPI dále neumožňuje výměnu dat mezi zařízeními slave. [4]

Sběrnice má podobu čtyř vodičů, které jsou označeny SCLK (serial clock), MOSI (master output slave input), MISO (master input slave output) a SS (slave select). Vodič SCLK je využíván k vysílání hodinového signálu ze zařízení master na zařízení slave. MOSI slouží k přenosu dat ze zařízení master na slave, MISO je pak pro komunikaci v opačném směru. Vodič SS slouží k zvolení zařízení slave. Z toho vyplývá, že pokud je v síti jediné zařízení slave, nemusí být tento vodič použit. V opačném případě ale zavedení tohoto vodiče znamená, že jednotlivým zařízením slave nemusí být přiřazeny unikátní adresy. [4]

1.2.3.2 I²C

Tento typ se vyznačuje použitím pouze dvou vodičů. Je to SDA (serial data), který slouží k přenosu dat, a SCL (serial clock), který je nosičem hodinového signálu. Stejně jako u SPI jsou rozlišovány zařízení master a slave. V případě I²C je ale umožněna přítomnost více zařízení typu master. Maximální rychlost přenosu je 5 MHz. Použití pouze zmíněných dvou vodičů bez

obdoby SS u SPI znamená, že každému zařízení musí být přiřazena adresa. Pomocí té je pak zajištěna výměna dat s požadovaným zařízením. [4]

Sběrnice SPI a I²C jsou uplatňovány zejména v rámci jednotlivých zařízení ke komunikaci mikrokontroléru s periferiemi. [4] Tím se liší od sběrnice CAN, která je využívána spíše ve vozidlových sítích.

1.2.3.3 CAN BUS

Tento typ sběrnice začala vyvíjet v osmdesátých letech společnost Bosch. V současnosti je převládajícím typem v sítích vozidel všech druhů. Důvodem je především vysoká míra standardizace, která je dána normou SAE J1939. Díky tomu je usnadněna spolupráce mezi výrobci, což v důsledku způsobuje zvýšenou efektivitu návrhu a výroby vozidel. [7]

VYUŽITÍ

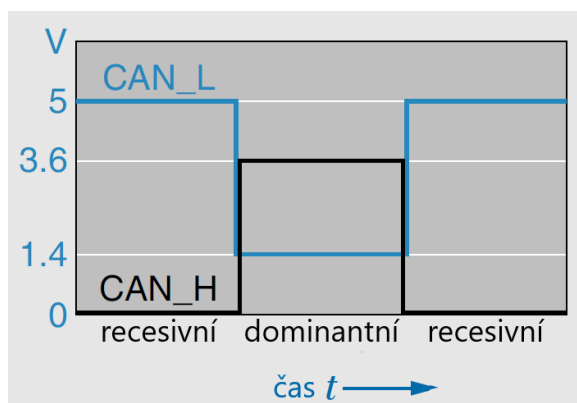
Sběrnice CAN se využívá v různých oblastech motorového vozidla, přičemž na každou jsou kladeny odlišné požadavky. V případě řízení motoru, převodovky apod. je nutná rychlejší výměna informací, oproti tomu v oblastech komfortní výbavy je třeba předávat data na delší vzdálenosti, tudíž je větší důraz kladen na spolehlivost přenosu. Důsledkem toho je uplatnění několika typů CAN sběrnice o různých rychlostech v rámci vozidla. Využití této sběrnice se mimo motorová vozidla rozšířilo obecně do oblastí automatizace a řízení. [3]

U zařízení komfortní výbavy se typicky uplatňuje typ CAN-B o přenosové rychlosti až 125 kbps. V případě systémů souvisejících s řízením motoru, převodovky a dalších je používán vysokorychlostní CAN-C s přenosovou rychlostí 125 až 1000 kbps. [3] K předání informací mezi sítěmi CAN s různými rychlostmi se používá gateway. [7]

PRINCIP

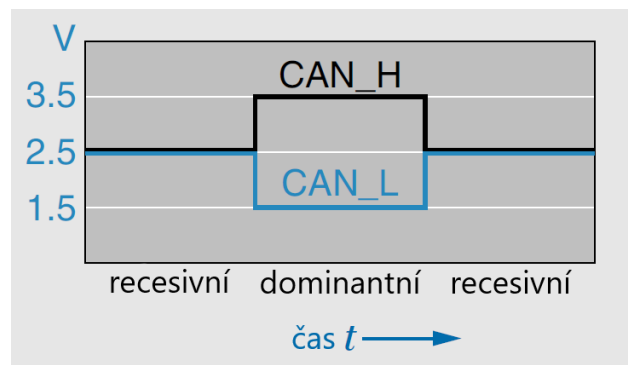
Vedení ve sběrnici CAN se skládá z vodičů *CAN_H* (high) a *CAN_L* (low), které se liší úrovní signálu. Těmito vodiči je veden stejný, ale vzájemně symetricky obrácený signál. Konkrétním hodnotám difference napětí na vodičích je pak přiřazen recesivní a dominantní stav. [7] Přiřazení těchto hodnot se liší v závislosti na typu CAN sběrnice, tedy jestli se jedná o nízko či vysokorychlostní CAN. [3]

V případě typu CAN-B je v recesivním stavu na vodiči *CAN_H* napětí 0 V a na *CAN_L* 5 V. Pro dominantní stav jsou určeny hodnoty napětí 3,6 V pro *CAN_H* a 1,4 V pro *CAN_L*. (obr. 2) [3]



Obr. 2 Napětové úrovně pro nízko rychlostní CAN [3]

Pro vysokorychlostní variantu a případ recesivního stavu je definováno napětí 2,5 V na obou linkách. V případě dominantního stavu napětí na vodiči *CAN_H* vzroste na hodnotu 3,5 V a na vodiči *CAN_L* klesne na 1,5 V. (obr. 3) [3]



Obr. 3 Napětové úrovně pro vysokorychlostní CAN [3]

Z uvedeného vyplývá, že dominantní stav nastává v obou případech při nárůstu napětí na lince *CAN_H*. Pro oba typy také platí, že dominantní stav představuje logickou nulu a recesivní stav logickou jedničku. [3]

SPOLEHLIVOST PŘENOSU

Fyzicky je vedení CANu realizováno jako kroucená dvojlinka. Za účelem snížení vlivu elektromagnetického rušení je definováno 40 zkroucení na vzdálenosti jednoho metru, což zároveň určuje impedanci vedení. Snížení nespolehlivosti signálu je výrazně posíleno přenosem prostřednictvím diferenciálního signálu. Je to dáno tím, že v systému sběrnice CAN se nezpracovávají konkrétní hodnoty obou signálů, ale jejich diference. Ta zůstává v případě rušení indukčním napětím nedotčena. Z pravděpodobnosti vzniku nezjištěné chyby vychází, že její výskyt je možný jednou za několik stovek let. Spolehlivost sběrnice CAN je tedy na velmi vysoké úrovni. Dalším opatřením proti rušení signálu je zapojení rezistoru o odporu 120 Ω mezi vodiči na každém otevřeném konci sběrnice. To zajišťuje útlum odrazů signálu, které by ovlivňovaly přenos. [7]

KOMUNIKACE MIKROKONTROLÉRU PŘES CAN

Aby bylo mikrokontroléru umožněno přijímat a vysílat zprávy po sběrnici CAN, musí být v obvodu zahrnut CAN budič, někdy označován anglickým názvem transceiver. Ten v případě vysílání zprávy převádí bitový tok z mikrokontroléru na diferenciální signál vodičů *CAN_H* a *CAN_L*. V případě příjmu informací naopak zpracovává diferenciální signál na bitový tok. [3]

ČASOVÁNÍ CAN

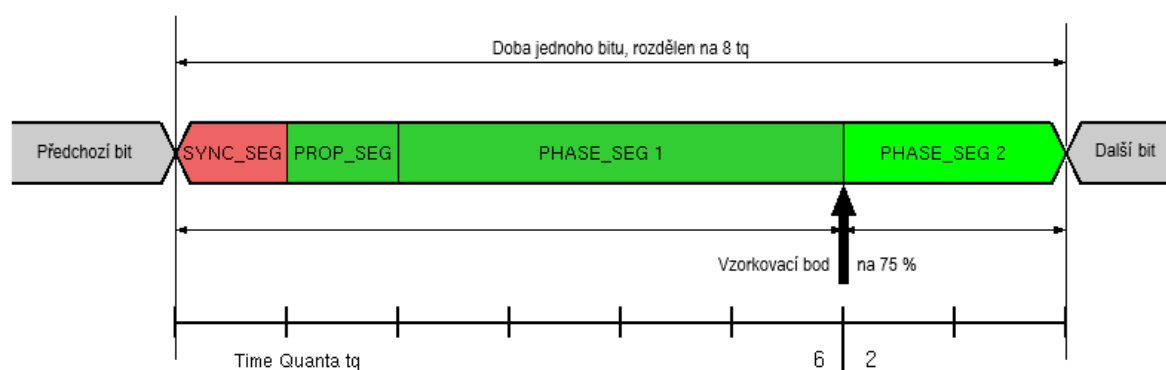
Sběrnice CAN je asynchronní. To znamená, že přenos zprávy není inicializován v závislosti na čase, místo toho je započat určitou událostí. [7] Aby došlo k bezchybnému přenosu, je třeba zajistit snímání bitu zprávy v správném okamžiku. Je tedy nutné zavedení synchronizace. Každý bit v přenosu CAN je rozdělen na časová kvanta. Tato časová kvanta jsou v rámci bitu seskupena do segmentů (obr. 4). [8]

Prvním z nich je *SYNC_SEG*. Jedná se o synchronizační segment, ve kterém je předpoklad výskytu hrany signálu. Při zjištění předběhnutí nebo zpoždění hrany je upraven vzorkovací bod.

Vzorkovací bod je místo, ve kterém je snímán signál. Obvykle je jeho nominální poloha stanovena na 75 % doby jednoho bitu. [8]

Dalším segmentem je *PROP_SEG*. Ten slouží k vyrovnání zpoždění přenosu, které může být způsobeno délkou vodičů nebo budičem. Segment má dvojnásobnou délku těchto zpoždění, a to za účelem vyrovnání zpoždění jak příchozích, tak i odchozích zpráv. [8]

PHASE_SEG1 a *PHASE_SEG2* jsou segmenty, které definují polohu vzorkovacího bodu. V případě segmentu *PHASE_SEG1* se přitom mnohdy udává délka v součtu se segmentem *PROP_SEG*. Zároveň se zde realizuje již zmiňovaná synchronizace. Posunutí vzorkovacího bodu udává parametr SJW (synchronization jump width). Ten má většinou délku jednoho časového kvanta. [8]



Obr. 4 Rozdělení bitu ve sběrnici CAN na segmenty [8]

1.3 NÁVRH A VÝROBA EMBEDDED ZAŘÍZENÍ

Jak již bylo uvedeno, mikrokontrolér na desce doplňují další součástky. Při návrhu jsou vztahy mezi těmito součástkami popsány nejprve tvorbou schématu. Dále je návrhem DPS definováno jejich rozmístění. Tato kapitola se zabývá popisem těchto procesů.

Následně jsou v kapitole popsány varianty podoby elektronických součástek. Poté jsou shrnuty metody výroby a osazování desek součástkami.

1.3.1 TVORBA SCHÉMATU

Schematický návrh se v dnešní době provádí takřka výhradně s využitím softwarových nástrojů. Kromě komerčních produktů (OrCAD, PADS) existuje i celá řada volně přístupných programů, například FreePCB, TinyCAD nebo KiCad. [4]

V této fázi je třeba vyhledat ke zvoleným součástkám dokumentaci v podobě katalogových listů. Z té jsou následně čerpány informace ohledně zapojení jednotlivých pinů, nebo například blokování napájení blokovacími kondenzátory. [4] Především u mikrokontroléru toto může být zdlouhavá část práce, jelikož většině pinů lze v jeho případě přiřadit více různých funkcí. Pro požadované funkce tedy může existovat několik variant konfigurace pinů a většinou je při návrhu DPS nutné nastavení zpětně upravovat dle dispozic desky a rozložení součástek. Proto je vhodné ke konfiguraci vstupů a výstupů na pinech využít softwarové nástroje dodávané

výrobcem, pokud takové nástroje nabízí. V případě výrobce STMicroelectronics je to program STM32CubeMX, který zároveň slouží i k následné tvorbě inicializačního kódu.

Následuje samotný schematický návrh. To znamená nejprve umístění schematických značek součástek, případně vytvoření vlastních, pokud nejsou obsaženy v knihovně programu. Poté je realizováno propojení vývodů a nastavení parametrů součástek. Mezi ty patří především číslo součástky, její hodnota a typ pouzdra, který je obzvláště důležitý pro následný návrh plošného spoje. Pokud to program umožňuje, je vhodné provést kontrolu návrhových pravidel. Ta může být nápomocna k upozornění na snadno přehlédnutelné chyby, jako je propojení neodpovídajících typů pinů, nezapojení pinů a podobně. [1]

Konečným krokem při tvorbě schématu je uložení dat obsažených v návrhu do tzv. netlistu. Ten v sobě zahrnuje informace o zapojení součástek a jejich vlastnostech a je vstupním souborem pro návrh plošného spoje. [1]

1.3.2 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE (DPS)

Ve většině případů jsou programy pro tvorbu schématu a návrh DPS obsaženy v jednotném balíčku, takže je zaručena snadná práce s návrhem. V případě nutnosti zpětných úprav zapojení schématu je díky tomu zjednodušeno promítnutí těchto změn do návrhu plošného spoje.

Tato část práce zahrnuje primárně rozhodnutí o fyzickém umístění součástek a jejich spojů na desce. Do této úvahy vstupuje představa o technologickém provedení a proveditelnosti návrhu. Znamená to tedy určení počtu vrstev desky, určení způsobu výroby a osazování. V závislosti na zvolené třídě přesnosti desky je stanovena šířka spojů a izolační vzdálenost. [1]

Při návrhu plošného spoje se využívá vrstev, z nichž každá má danou funkci. Mezi ty základní patří vrstva spojů, nepájivé masky, servisního potisku a v neposlední řadě vrtaných otvorů. [1]

Podobně jako u schematického návrhu je třeba ověřit, zda v knihovně zvoleného programu nechybí pouzdra některých součástek. [1] V takovém případě by bylo nutné chybějící pouzdro doplnit. V některých případech je možné potřebné soubory získat z webových stránek výrobce, případně na různých komunitních serverech. Další možností je vytvoření vlastního modelu pouzdra.

Při návrhu plošného spoje je k zaručení funkčnosti potřeba dodržovat daná návrhová pravidla. Ta se vztahují na umístění součástek, které by měly být řazeny směrem od procesoru od těch s nejrychlejším přenosem informací po pomalejší. Dále je třeba hlídat délku spojů, aby nedocházelo k vytváření zbytečných proudových smyček. V případě většího počtu vrstev desky je důležité jejich seřazení. V neposlední řadě je nutné dbát na správné zemnění, nejlépe s využitím vodivé vrstvy GND (ground), a správné použití blokovacích kondenzátorů, které by měly být umístěny co nejbližší k související součástce. [1]

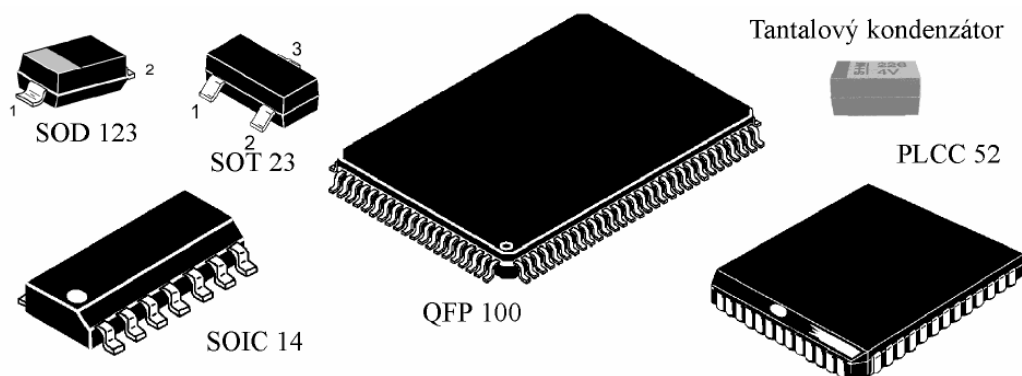
1.3.3 POUZDRA SOUČÁSTEK

Elektronické součástky se vyrábějí ve dvou základních variantách podle způsobu jejich osazení na desku plošného spoje. V první řadě jsou to THT (Through-hole technology) součástky, které jsou určeny ke klasické montáži. To znamená osazení vývodů součástky do otvorů na desce a následné pájení z druhé strany – strany plošných spojů. Oproti tomu SMD součástky jsou určeny pro povrchovou montáž. SMD součástky přinášejí mnoho výhod. Umožňují minimalizaci velikosti desky a počtu prokůvů na desce. S tím souvisí snížení vzdálenosti

vodičů, což dovoluje zvýšení pracovní frekvence. Dalšími důsledky uplatnění této technologie jsou nezanedbatelné úspory na výrobních nákladech, jednodušší automatizace výroby a nižší poruchovost. [1]

V případě rezistorů a kondenzátorů jsou k povrchové montáži využívána nejčastěji pouzdra s metalizovanými ploškami. Pouzdro je označeno dvěma dvoučíslími, která charakterizují jeho rozměry. Rozměry jsou uváděny v desítkách milů, kdy jeden mil je tisícina palce. Platí, že 1 mil = 0,025 mm. Rozsah dostupných rozměrů je 2040 až 0201. [1]

Další skupinou jsou pouzdra s páskovými vývody. Zde se rozlišuje několik typů, které jsou zobrazeny na obr. 5. Zástupcem pasivních součástek jsou pouzdra tantalových kondenzátorů. Pouzdra SOD (Small-outline diode) a SOT (Small-outline transistor) se využívají u diod a tranzistorů. Pouzdra s páskovými vývody se používají i u integrovaných obvodů, a to v několika podobách. Pouzdra SOIC (Small-outline integrated circuit) mají vývody jen na dvou stranách, zatímco QFP (Quad flat package) pouzdra jsou vybavena vývody po celém obvodu. PLCC (Plastic leaded chip carrier) pouzdra potom slouží k montáži do patič. [1]



Obr. 5 SMD pouzdra s páskovými vývody [1]

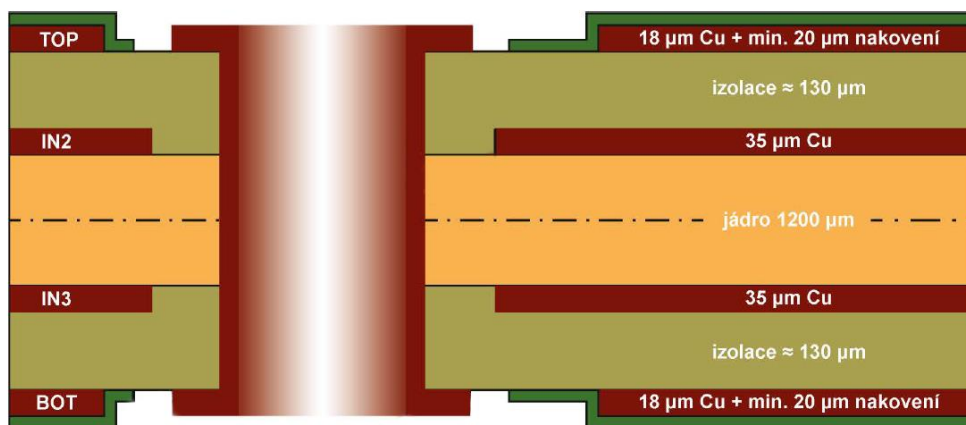
V neposlední řadě se rozlišuje skupina pouzder BGA (Ball grid array). Pouzdra tohoto typu umožňují efektivnější využití plochy pouzdra, tedy větší množství vývodů na stejné ploše. Toho bylo docíleno uspořádáním vývodů do mřížky na spodní stranu pouzdra. Piny mají v tomto případě podobu kulových vývodů. [1]

1.3.4 MOŽNOSTI VÝROBY DPS

Po zdárném provedení kontroly návrhových pravidel je hlavním výstupem z návrhu DPS tvorba dat potřebných pro výrobu. Soubory s těmito daty se nazývají Gerber soubory a zahrnují informace o jednotlivých vrstvách návrhu, tedy o umístění spojů a pájecích plošek součástek, vrtaných otvorů atd. [1]

Při výrobě DPS se uplatňují tři způsoby: subtraktivní, aditivní a semiaditivní. Při subtraktivní metodě je leptáním odstraňována přebytečná měď, naopak při aditivní výrobě jsou vodivé spoje aplikovány na povrch. Semiaditivní způsob výroby je pak kombinací dvou předešlých. Tento způsob se uplatňuje v současné době nejvíce, a to zejména při výrobě prototypů a malých sérií dvoustranných a vícevrstvých desek. [1]

Po zpracování technologických dat je prvním krokem semiaditivní výroby vytvoření filmových matic. Poté následuje příprava základního materiálu, tedy zastřížení nosné desky plátované z obou stran měděnou fólií na požadovaný rozměr. Dalším krokem je vyvrtání a prokovení otvorů. Následně je provedena laminace fotorezistu, osvit motivu a vyvolání negativního motivu spojů na desce. V oblastech odkrytých fotorezistem, tedy v místech spojů, je provedeno galvanické zesílení mědi a ošetření cínovým leptuvzdorným rezistem. Běžně se uvažuje zesílení mědi o 20 μm (obr. 6). Následuje odstranění fotorezistu a leptání desky, po leptání je odstraněn i cínový rezist. Poté je vyrobená deska zkoušena buď opticky přístrojem, který měří nepřesnosti vůči referenčním datům, nebo elektricky, kdy je měřen odpor mezi konkrétními místy. Po úspěšném testování je na desku aplikována nepájivá maska, která slouží jako ochrana spojů. Nepájivá maska není nanášena v místech pájecích plošek, na ty je v dalším kroku nanášena pájka. Tento proces se jmenuje HAL – Hot Air Leveling. Dále je, pokud to zákazník požaduje, nanášen servisní potisk a jsou pozlaceny pájecí plošky. Pozlacení slouží jako ochrana pájecích plošek, pokud je mezi výrobou a pájením dlouhá doba. Na závěr je deska opracována na konečný rozměr. [1]



Obr. 6 Vrstvy spoje při semiaditivní výrobě [9]

1.3.5 OSAZENÍ DPS

Osazení desky se v případě větších sérií provádí strojně. To v kombinaci s využitím SMD součástek umožňuje časovou i finanční efektivitu a nižší chybovost výroby. Uplatňují se dva způsoby – pájení vlnou a přetavení. Proces pájení vlnou se skládá z postupného nanášení tavidla na desku, přehřátí desky a jejího průchodu roztavenou pájkou. Název pochází z využití dvou vln pájky, nejdříve deska projde turbulentním proudem a následně laminárním. Tím je zaručeno vynikající prohrátí a smáčení, výsledkem je vysoce kvalitní spoj. Před pájením je nutné součástky na desce zajistit lepidlem. Desku je možné osazovat THT i SMD součástkami. Oproti tomu pájení přetavením slouží pouze k osazování SMD součástek. Spočívá v uložení součástek na plošky s již nanášenou pájkou. Po následném přetavení pájky se součástka usadí na pájecí plošky. Předpokladem je správný návrh pájecích plošek. U komplexnějších desek se používá kombinace obou zmíněných způsobů. [1]

V případě výroby menšího počtu desek se ale uplatňuje i ruční pájení. Předpoklad ručního osazování je třeba zohlednit už při návrhu DPS. To znamená použití větších pájecích plošek a zajištění dostatečných rozstupů mezi součástkami. [1]

2 NÁVRH MIKROKONTROLÉRU

Při návrhu desky mikrokontroléru bylo postupováno podle vzoru v podobě vývojové desky mbed LPC1768. Ta je určena pro univerzální použití při prototypování různých embedded systémů. Tento návrh je směřován pro aplikaci v motorových vozidlech.

2.1 POŽADOVANÉ FUNKCE A VLASTNOSTI

V počáteční fázi návrhu bylo rozhodnuto o požadavcích na navrhovanou desku. S ohledem na výrobní možnosti a náklady bylo zvoleno dvouvrstvé provedení, tedy s povrchovou vrstvou na každé straně desky bez vnitřních vrstev. Byl kladen důraz na praktičnost manipulace s deskou při experimentování, z čehož vyplývá požadavek na osaditelnost do nepájivého pole. Za tímto účelem bylo rozhodnuto o vybavení desky dvěma kolíkovými lištami o dvaceti pinech. S uživatelskou přívětivostí je dále spojena i volba způsobu napájení desky, které bylo realizováno pomocí USB konektoru.

Požadovaná univerzalita byla důležitým kritériem pro výběr mikrokontroléru. Aby mohla být vyrobená deska uplatnitelná v širokém spektru aplikací, bylo nutné zajistit jeho dostatečný výkon. Proto byl vybírán mikrokontrolér s procesorem o frekvenci alespoň 100 MHz a s programovou pamětí flash o kapacitě nejméně 512 kB. Dále byly požadovány minimálně tři analogové vstupy a jeden výstup, tedy v mikrokontroléru by měly být zahrnuty tři A/D převodníky a jeden D/A převodník. Stěžejním kritériem pro aplikaci v motorovém vozidle je schopnost komunikace jednotky s dalšími zařízeními v síti, a to především prostřednictvím sběrnice CAN. Volený mikrokontrolér by měl mít alespoň dvě CAN rozhraní. Díky tomu může být umožněno testování komunikace CAN ve smyčce, tedy schopnost jednotky současně vysílat a přijímat data. Z dalších možností konektivity byla požadována rozhraní SPI a I²C, obě alespoň v počtu dvou. Pro možnost sledování času s vysokou přesností by měl být dále mikrokontrolér vybaven 32bitovým časovačem.

Dále byla požadována možnost ovládat mikrokontrolérem akční členy s vyšším odběrem proudu (přes 1 A) napájené větším stejnosměrným napětím, tedy 12 V a 24 V pro aplikace v motorových vozidlech. Pro možnost napájení dalších prvků prostřednictvím desky byly požadovány vývody napětí 5 V a 3,3 V.

2.2 VOLBA MIKROKONTROLÉRU

Dle zadaných kritérií byl vybírán mikrokontrolér s 32bitovým ARM procesorem z řady STM32 od výrobce STMicroelectronics. Prvním návrhem byl model STM32F103RE. Ten ale nesplňoval všechny požadavky, maximální možná frekvence procesoru je 72 MHz a je vybaven pouze jedním rozhraním CAN. [10]

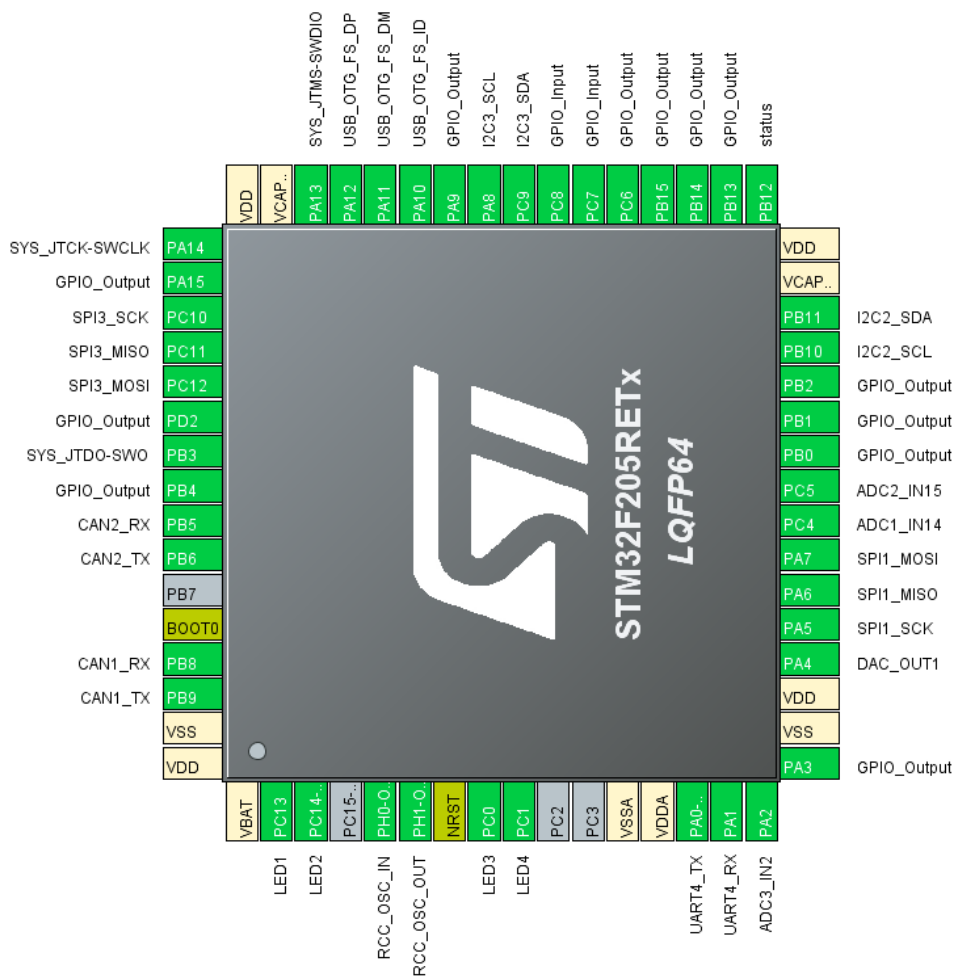
Následně byl proto vybrán mikrokontrolér STM32F207VE. S frekvencí procesoru až 120 MHz již výkonnostním požadavkům vyhovuje, další kritéria rovněž splňuje. Nejmenší pouzdro, ve kterém se tento mikrokontrolér nabízí, je LQFP100. Toto pouzdro má 100 pinů a rozměry 14 x 14 mm. [11] Počet pinů je vzhledem k požadovaným 40 vývodům desky zbytečně vysoký. Také úspora prostoru, způsobena výběrem mikrokontroléru s pouzdem o menších rozměrech, by rozhodně nebyla zanedbatelná.

Proto byl nakonec zvolen mikrokontrolér STM32F205RE. Takřka jedinou odlišností ve výbavě je nepřítomnost rozhraní Ethernet a pochopitelně menší počet vývodů, což ale není v rozporu s formulovanými požadavky. [11] Velkou výhodou pro účely této práce je osazení v pouzdře

LQFP64, které má 64 vývodů a rozměry 10 x 10 mm. To umožňuje více prostoru pro další součástky a vedení spojů a potenciálně také menší rozměry výsledné desky.

2.3 SCHEMATICKÝ NÁVRH

K tvorbě schématu i k následnému návrhu desky plošného spoje byl využit volně přístupný softwarový balík KiCad. Pro návrh schématu je v tomto balíku obsažena aplikace Eeschema. Prvním krokem při tvorbě schématu byla konfigurace vstupních a výstupních pinů mikrokontroléru na požadované funkce v programu STM32CubeMX (obr. 7). Piny označené šedou barvou byly ponechány nezapojené.



Obr. 7 Konfigurace vstupů a výstupů mikrokontroléru

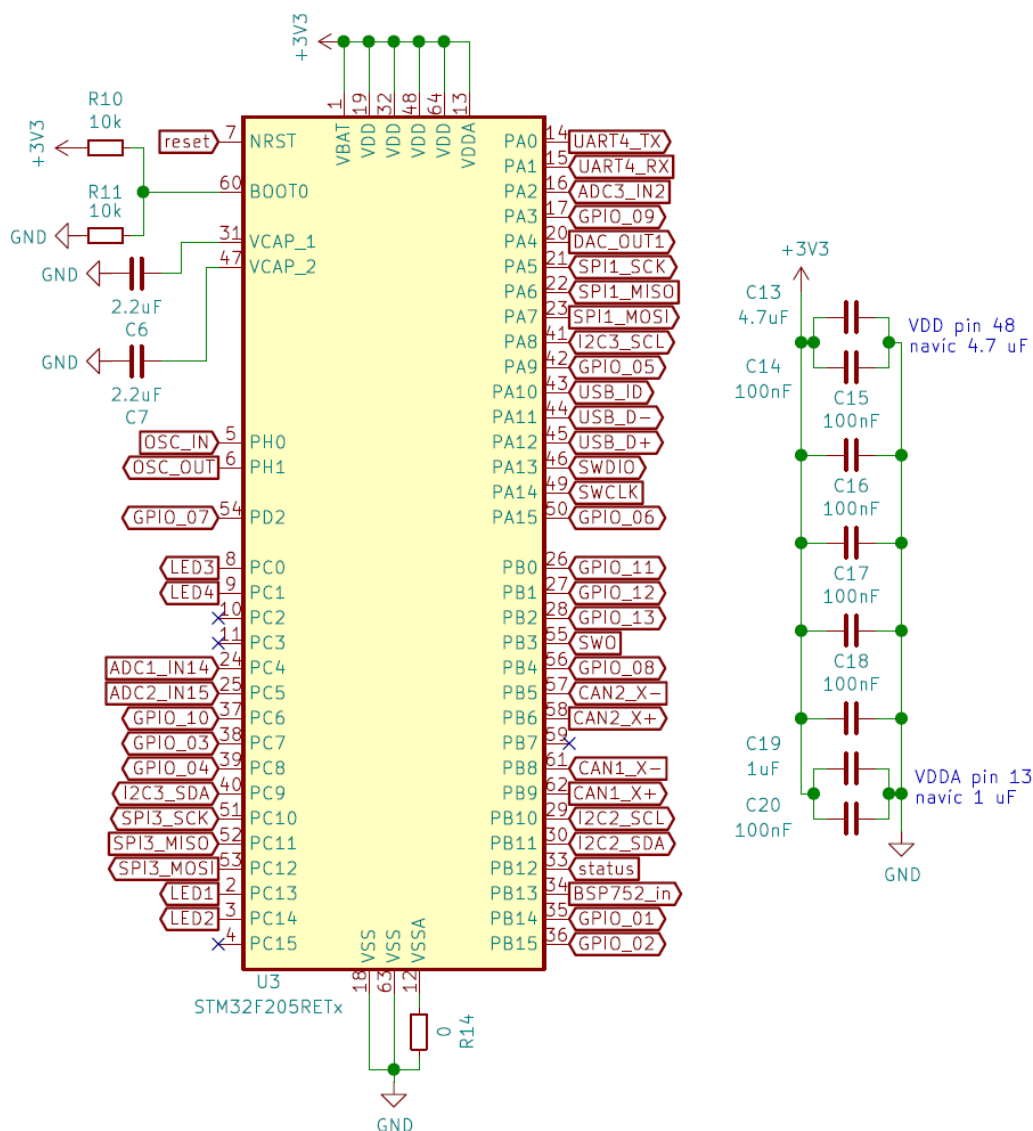
Konfigurace byla při návrhu DPS několikrát iterativně upravena tak, aby bylo dosaženo co nejkratších spojů. Nastavení zobrazené na obr. 7 je výsledné a zahrnuje USB v režimu OTG (On-The-Go), mikrokontrolér tedy může fungovat jako zařízení host nebo device. Dále jsou zahrnuta dvě rozhraní CAN, tři analogové vstupy a jeden analogový výstup, dvě rozhraní I²C a SPI a jeden UART (universal asynchronous receiver-transmitter). Dva piny slouží k zapojení externího krystalu, čtyři piny jsou vyhrazeny pro zapojení LED diod. K nahrávání uživatelského kódu slouží rozhraní SWD. Čtyři piny mikrokontroléru byly ponechány nezapojené kvůli úsporám místa na desce. Zbýlé vývody kromě napájecích a pinů *BOOT0* a *NRST* jsou nastaveny na digitální vstupy a výstupy. [11]

Dále byly zvoleny součástky a bylo provedeno jejich zapojení do obvodů, což je popsáno v následujících podkapitolách. Doplňující součástky jako kondenzátory a rezistory byly zvoleny v podobě SMD s pouzdry o velikosti 0603.

2.3.1 ZAPOJENÍ MIKROKONTROLÉRU

Po nakonfigurování vývodů mikrokontroléru byla následně do schématu z knihovny programu KiCad umístěna schematická značka mikrokontroléru. Vývody značky byly označeny dle obr. 7 za pomoci příkazu *Globální popiska* v záložce *Umístit*. To je znázorněno na obr. 8 včetně zapojení blokovacích kondenzátorů, které bylo provedeno po vzoru katalogového listu mikrokontroléru [11].

Rovněž dle katalogového listu byly zapojeny kondenzátory o kapacitě 2,2 μF na piny *VCAP_1* a *VCAP_2*. Dále byly zapojeny rezistory R10 a R11. Při osazování součástek má být umístěn pouze jeden z nich, čímž je proveden výběr bootovacího režimu mikrokontroléru. Na pin *VSSA* byl zapojen rezistor s nulovým odporem. [11]

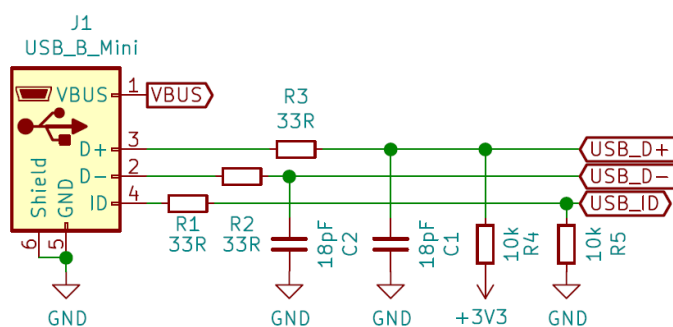


Obr. 8 Zapojení mikrokontroléru a blokovacích kondenzátorů

2.3.2 USB ROZHRANÍ

Jak již bylo zmíněno, k napájení desky bylo využito USB konektoru. Zároveň ale byly zapojeny i jeho datové vodiče k umožnění komunikace. Byl zvolen konektor 614105150721 od společnosti Würth. Jedná se o micro USB konektor typu B ve vertikální variantě, a to za účelem úspory místa na desce.

Zapojení datových linek USB rozhraní bylo provedeno podle schémat desky LPC1768 [12] a je patrné z obr. 9. Na všech vodičích, tedy $D+$, $D-$ a ID , byl sériově zapojen rezistor o odporu $33\ \Omega$. K vodičům $D+$ a $D-$ byly připojeny kondenzátory o kapacitě $18\ \text{pF}$ paralelně k vrstvě GND . Paralelně na vodič $D+$ byl připojen rezistor o odporu $10\ \text{k}\Omega$ v zapojení pull-up, tedy k napětí $3,3\ \text{V}$. Rezistor se stejnou hodnotou odporu byl připojen paralelně k vodiči ID , a to v zapojení pull-down, tedy k vrstvě GND .



Obr. 9 Zapojení USB konektoru

2.3.3 REGULACE NAPĚTÍ

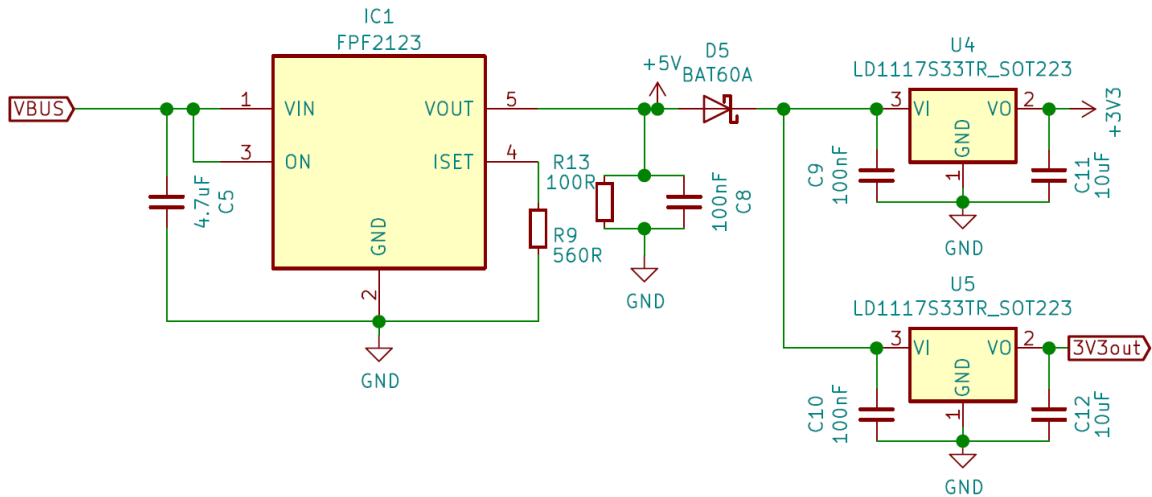
Při návrhu obvodu napájení bylo postupováno podle schémat vývojové desky LPC1768. [12] Zapojení obvodu je zobrazeno na obr. 10.

Za USB konektorem byl zapojen spínač výkonové zátěže FPF2123. Ten zde vykonává ochrannou funkci proti přetížení. V případě překročení limitní hodnoty proudu, která je určena hodnotou odporu rezistoru zapojeného na pin $ISET$, spínač přeruší napájení. Dle tabulky v katalogovém listu [13] byla zvolena hodnota odporu $560\ \Omega$, což odpovídá limitnímu proudu přibližně $830\ \text{mA}$. Tato hodnota byla nastavena s ohledem na maximální výstupní proud následujících napěťových regulátorů. [14] K pinu ON je připojeno přímo vstupní napětí. To znamená, že se spínač po připojení napájení samovolně zapne. Dále byla tato součást doplněna blokovacími kondenzátory dle katalogového listu [13]. Na vstupu je blokovací kondenzátor o kapacitě $4,7\ \mu\text{F}$, na výstupu je kondenzátor o kapacitě $100\ \text{nF}$ v paralelním zapojení s rezistorem o odporu $100\ \Omega$.

Hned poté je vyvedeno napětí $5\ \text{V}$, kterým jsou napájeny některé součásti na desce. Toto napětí je také zapojeno na jeden z vývodů desky. To poskytuje možnost napájet další prvky napětím $5\ \text{V}$ přímo z desky, například při zapojování v nepájivém poli. Po vzoru schémat desky LPC1768 [12] byla následně zapojena Schottkyho dioda BAT60A k usměrnění napětí.

Jelikož provozní napětí mikrokontroléru je v rozmezí $1,8\ \text{V}$ až $3,6\ \text{V}$ [11], bylo nutné vstupní napětí regulovat do požadovaného rozsahu. K tomu byl zvolen napěťový regulátor LD1117S33TR, který umožňuje regulaci vstupního napětí až $15\ \text{V}$ na napětí $3,3\ \text{V}$. [14] Volba kapacit blokovacích kondenzátorů byla provedena dle katalogového listu [14]. Na vstupu je kondenzátor o kapacitě $100\ \text{nF}$, na výstupu je pak zapojen $10\ \mu\text{F}$ kondenzátor. Deska byla

osazena dvěma těmito regulátory. Z jednoho slouží regulované napětí k napájení součástek na desce, výstupní napětí druhého je vyvedeno na jeden z vývodů desky. Tím je umožněno napájení externích zařízení také napětím 3,3 V.



Obr. 10 Obvod napájení desky

2.3.4 KRYSTALOVÝ OSCILÁTOR

Ačkoliv mikrokontrolér obsahuje vlastní vestavěný obvod krystalového oscilátoru, byl v návrhu desky obsažen i obvod pro zapojení externího krystalu. Hlavním důvodem je vyšší stabilita a přesnost oscilace.

Při volbě krystalu a následném výpočtu obvodu oscilátoru bylo postupováno dle příručky od výrobce STMicroelectronics [15]. Dle tabulky v tomto dokumentu byl volen krystal s frekvencí v rozmezí 4 MHz až 25 MHz. Byl vybrán krystal LFX TAL003156 s frekvencí 8 MHz. Z této tabulky byla dále odečtena hodnota maximálního kritického zesílení $G_{m_crit_max}$, která pro zvolený mikrokontrolér činí 1 mA/V. Z katalogového listu zvoleného krystalu [16] byly určeny hodnoty zátěžové kapacity $C_L = 30$ pF, zkratové kapacity $C_0 = 7$ pF a ekvivalentního sériového odporu $ESR = 40 \Omega$. Dle katalogového listu mikrokontroléru [11] byla dále odhadnuta parazitní kapacita obvodu oscilátoru na hodnotu $C_S = 10$ pF. Za pomoci těchto hodnot byly vypočteny hodnoty kapacit kondenzátorů C_{L1} a C_{L2} obvodu oscilátoru dle vztahu (1) z příručky [15].

$$C_L = \frac{C_{L1}C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_S \quad (1)$$

Při návrhu se používají kondenzátory o totožné kapacitě, po úpravě tedy vznikne vztah (2).

$$C_L = \frac{C_{L1}^2}{2C_{L1}} + C_S \quad (2)$$

Dále byl vyjádřením C_{L1} získán vztah pro výpočet kapacit externích kondenzátorů (3). Dosazením byly vypočteny hodnoty kapacit externích kondenzátorů C_{L1} a C_{L2} . Byly zvoleny kondenzátory z běžné řady s nejbližší kapacitou k vypočtené hodnotě, tedy 39 pF.

$$C_{L1} = C_{L2} = 2(C_L - C_S) = 2(30 - 10) = 40 \text{ pF} \quad (3)$$

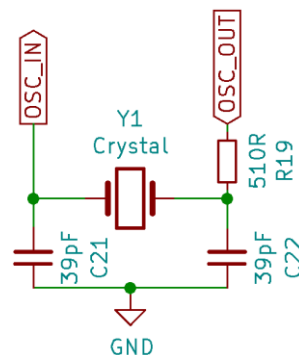
Hodnota odporu externího rezistoru byla určena dle vztahu (4) z příručky [15]. Vypočtená hodnota byla zaokrouhlena na nejbližší hodnotu z běžně dostupné řady odporů, tedy 510 Ω .

$$R_{Ext} = \frac{1}{2\pi F C_{L2}} = \frac{1}{2\pi * 8 * 10^6 * 40 * 10^{-12}} = 497,4 \Omega \quad (4)$$

Následně bylo ověřeno, že krystal bude oscilovat stabilně. K tomu bylo nejprve vypočteno kritické zesílení $g_{m_{crit}}$ dle vztahu (5) z příručky [15]. Porovnáním s maximální hodnotou $G_{m_{crit_{max}}}$, kdy musí platit, že $g_{m_{crit}} < G_{m_{crit_{max}}}$, bylo provedeno ověření. Jelikož hodnota $G_{m_{crit_{max}}}$ je rovna 1 mA/V, podmínka je splněna.

$$g_{m_{crit}} = 4 * ESR * (2\pi F)^2 * (C_0 + C_L)^2 = 0,55 \text{ mA/V} \quad (5)$$

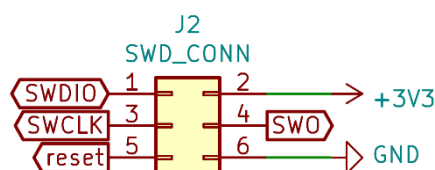
Obvod krystalového oscilátoru je zobrazen na obr. 11.



Obr. 11 Obvod krystalového oscilátoru

2.3.5 SWD KONEKTOR

Programování mikrokontroléru je realizováno prostřednictvím rozhraní SWD (Serial Wire Debug) s využitím programátoru ST-Link. Zapojení programovacího konektoru je znázorněno na obr. 12. Konektor tvoří kolíková lišta o počtu 2x3 pinů s roztečí 1,27 mm.



Obr. 12 Zapojení SWD konektoru

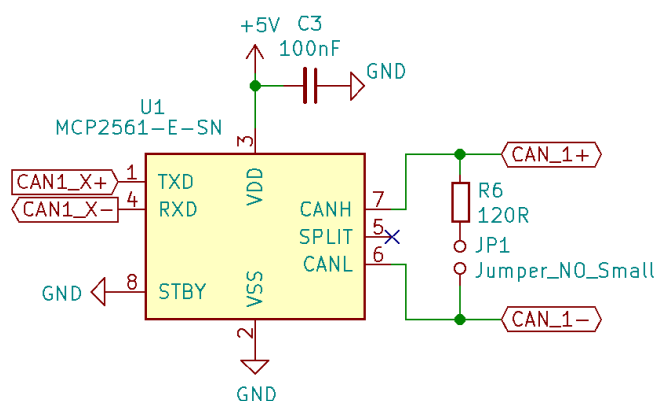
2.3.6 CAN TRANSCEIVERS

Jak bylo zmíněno v kapitole věnované sběrnici CAN, pro umožnění komunikace mikrokontroléru přes tuto sběrnici je třeba doplnit obvod tzv. CAN transceiverem. V případě zvoleného mikrokontroléru musí být deska osazena dvěma těmito součástkami, jednou pro každé CAN rozhraní mikrokontroléru. K tomu účelu byly zvoleny transceivery MCP2561 ve variantě s SOIC pouzdrem.

Dle katalogového listu [17] vyžaduje tato součástka napájení napětím 4,5 V až 5,5 V. K vývodu pro napájení tedy bylo zapojeno napětí 5 V. Před tím byl zapojen blokovací kondenzátor o kapacitě 100 nF paralelně k vrstvě společného vodiče *GND*. K vrstvě *GND* jsou připojeny i piny *VSS* a *STBY*.

Vývody *TXD* a *RXD* byly připojeny k odpovídajícím pinům mikrokontroléru. Pomocí vývodů *CANH* a *CANL* je deska připojena do CAN sítě. Paralelně mezi těmito vývody je zapojen rezistor o odporu $120\ \Omega$ za účelem tlumení odrazů. Tento rezistor je možné z obvodu odpojit pomocí zkratovací propojky. Tato možnost je zahrnuta zejména pro případ, kdy je tento rezistor již obsažen v síti, do které se deska připojuje. K tomuto účelu byla zvolena zkratovací propojka pro spojení pinových headerů o rozteči $1,27\ \text{mm}$.

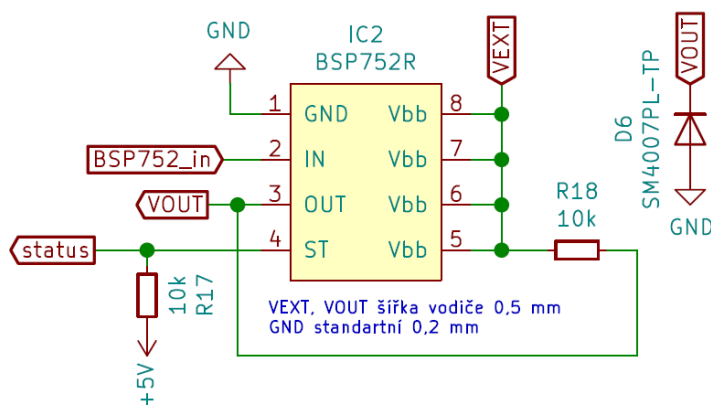
Vodiče připojené ke dvojicím vývodů *CANH*, *CANL* a *TXD*, *RXD* jsou ve schématu označeny na konci znaménkem „+“ a „-“. Důvodem je, že tyto vodiče musí být vedeny jako diferenciální páry, které program KiCad rozlišuje právě tímto způsobem. Pin *SPLIT* je ponechán nezapojený. Tento pin má funkci výstupu referenčního napětí pro stabilizaci a jeho použití je volitelné. [18] Popsané zapojení je pro obě rozhraní totožné a je znázorněno na obr. 13.



Obr. 13 Zapojení CAN transceiveru

2.3.7 VÝKONOVÝ SPÍNAČ

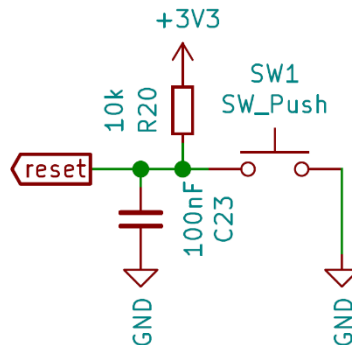
V souladu s požadavkem možnosti ovládnání zátěže při napětí 12 nebo 24 V byla deska vybavena i výkonovým spínačem pro ovládnání větší zátěže. K tomu účelu byl zvolen spínač BSP752R. Katalogový list této součástky [19] uvádí maximální napětí zátěže až 52 V při nominálním proudu 1,3 A. Paralelně mezi piny *Vbb* a *OUT* byl dle katalogového listu [19] zapojen rezistor o odporu $10\ \text{k}\Omega$, rezistor o stejné hodnotě odporu byl zapojen na vývod *ST* v zapojení pull-up. K vývodu *OUT* byla dále zapojena dioda SM4007PL-TP, která zde plní funkci nulovací diody. To znamená, že slouží k eliminaci napěťových špiček při vypínání indukční zátěže. Schematické znázornění popsaného zapojení ilustruje obr. 14.



Obr. 14 Zapojení výkonového spínače

2.3.8 TLAČÍTKO RESET

Resetovací tlačítko bylo voleno z důvodu úspory místa o co nejmenších rozměrech. Bylo vybráno tlačítko B3U-1000P o rozměrech 2,5 x 3 mm. Jak je vidět na obr. 15, tlačítko bylo dle katalogového listu mikrokontroléru [11] doplněno blokovacím kondenzátorem o kapacitě 100 nF. Navíc zde byl zapojen rezistor o odporu 10 k Ω v zapojení pull-up k napětí 3,3 V.



Obr. 15 Zapojení resetovacího tlačítka

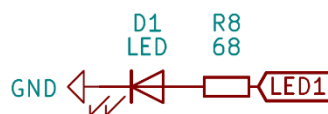
2.3.9 LED DIODY

Deska byla vybavena čtyřmi LED diodami pro signalizaci různých stavů. Byly zvoleny oranžové diody v SMD pouzdře o rozměrech 0603. Dle katalogového listu [20] vyžaduje dioda napájení napětím 2 V při odběru proudu 20 mA. Protože diody jsou napájeny výstupy mikrokontroléru, který je napájen napětím 3,3 V, je třeba napětí snížit zapojením rezistoru.

Pro výpočet hodnoty odporu rezistoru byl využit vztah (6) odvozený z Ohmova zákona, kde V_S je přiváděné napětí z mikrokontroléru, V_L úbytek napětí na LED diodě a I_L představuje odběr proudu diody.

$$R = \frac{V_S - V_L}{I_L} = \frac{3,3 - 2}{20 * 10^{-3}} = 65 \Omega \quad (6)$$

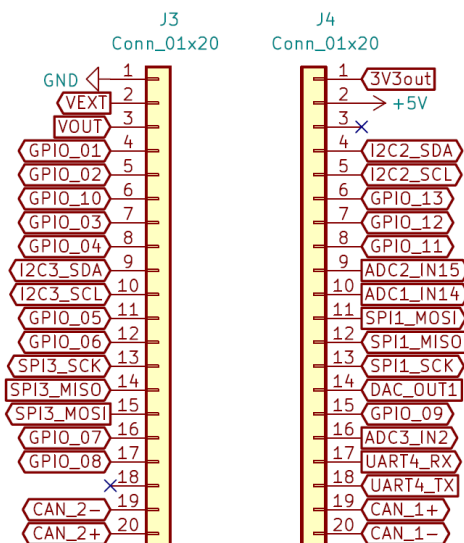
Na základě vypočtené hodnoty byl zvolen rezistor o odporu 68 Ω . Zapojení diody s tímto rezistorem je znázorněno na obr. 16.



Obr. 16 Zapojení LED diody

2.3.10 VÝVODY DESKY PLOŠNÉHO SPOJE

Deska plošného spoje byla vybavena vývody pro osazení dvou kolíkových lišt s roztečí 2,54 mm. Na obou delších hranách deska disponuje 20 vývody, jejichž zapojení ilustruje obr. 17. Ty slouží k propojení vstupů a výstupů mikrokontroléru s dalšími prvky a obvody. Také zahrnují výstupy napětí 3,3 V a 5 V. Dva vývody jsou věnovány vstupu a výstupu vysokého napětí pro spínač výkonové zátěže. Osazení kolíkových lišt je volitelné, při trvalé aplikaci v požadovaném obvodu je lze nahradit připájením vodičů.



Obr. 17 Zapojení vývodů DPS

2.4 NÁVRH DPS

Po dokončení schematického návrhu následovala tvorba návrhu desky plošného spoje. Softwarový balík KiCad umožňuje přímé nahrání součástek z návrhu schématu, takže nebylo třeba vyvážet a následně importovat soubor netlistu. K návrhu DPS v rámci softwaru KiCad slouží aplikace Pcbnew.

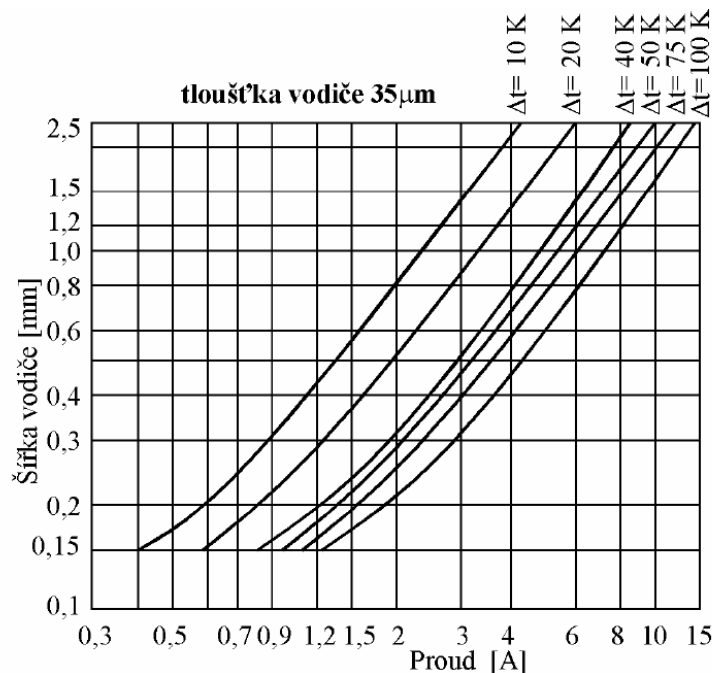
Pro rozměr desky byl určující převážně požadavek osaditelnosti do nepájivého pole pomocí kolíkových lišt. Ty totiž musely svou roztečí odpovídat rastru nepájivého pole 2,54 mm. Proto byla zvolena šířka mezi osami kolíků lišt 22,86 mm. V běžně dostupných nepájivých polích se jedná o největší možný rozměr, kdy na každém kraji je ponechána jedna řada pro připojení dalších obvodů. Je to také dostatečná šířka na umístění veškerých součástek mezi kolíkové lišty.

Dále bylo třeba určit požadované šířky vodičů a prokovených otvorů, a to s ohledem na proudovou zatížitelnost vodiče a technologické možnosti výrobce. Proto bylo předem rozhodnuto o výrobě desky prostřednictvím POOL servisu společnosti Gatema. Dle ceníku výrobce [21] byla zvolena základní varianta dvouvrstvé DPS se základní tloušťkou mědi 18 μm . Podle technologických možností výrobce [22] bylo uvažováno další zvětšení tloušťky o 20 μm vlivem galvanického zesílení mědi. Kromě obvodu výkonového spínače činí maximální uvažovaný proud na desce 830 mA. S ohledem na výslednou tloušťku vodiče a maximální proud byla dle závislosti na obr. 18 zvolena šířka vodiče 0,2 mm. Při dosažení maximálního proudu z dané závislosti vyplývá předpoklad ohřátí vodiče o 20 K.

Průměr prokoveného otvoru byl nastaven na 0,3 mm. Zde je třeba upřesnit, že se uvádí průměr zhotoveného otvoru, tedy i s pokovením. [9] Vnější průměr plošky průchodky byl nastaven na 0,5 mm. Dále byla nastavena šířka mezery také na 0,2 mm.

V případě výkonového spínače, u kterého může proud spínané zátěže nabýt hodnoty až 1,7 A [19], byla opět dle obr. 18 za předpokladu stejné tloušťky zvolena šířka vodiče 0,5 mm. To zahrnuje veškeré vodiče mezi vstupním kolíkem napětí *VEXT* a výstupním kolíkem *VOUT*. Samotná součástka byla umístěna co nejbližší k těmto kolíkům, aby bylo v největší možné míře omezeno rušení ostatních obvodů.

Požadavek vyšší proudové zatížitelnosti pro obvod výkonového spínače byl zohledněn také u prokovených otvorů. Jejich rozměr byl stanoven na 0,4 mm s vnějším průměrem plošky 0,8 mm.

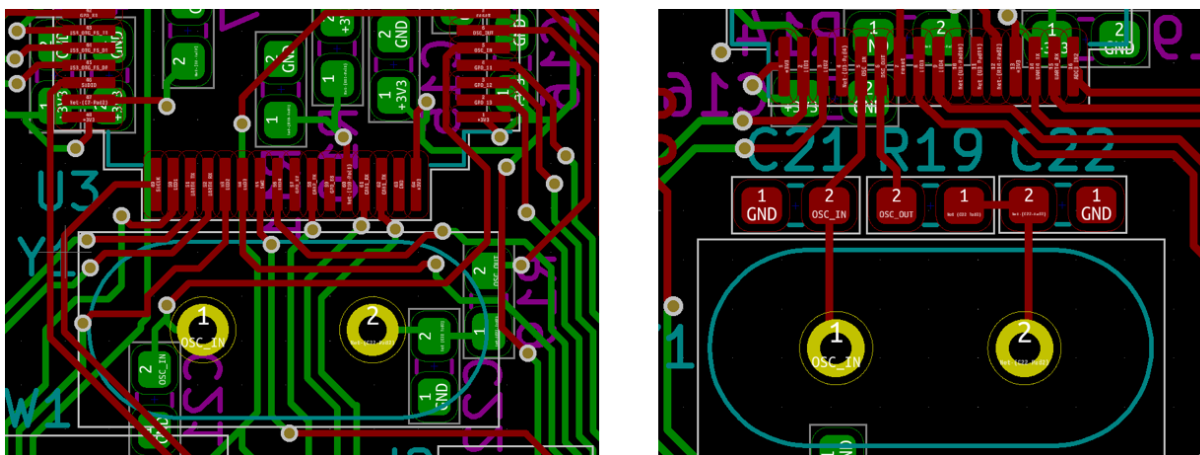


Obr. 18 Závislost šířky vodiče na protékajícím proudu [1]

Rozmístění součástek bylo s ohledem na omezený prostor na desce provedeno tak, aby co nejlépe odpovídalo návrhovým pravidlům. Pro umístění součástek byly využity obě strany desky. Na spodní stranu byly umístěny převážně pasivní součástky, ale také výkonový spínač. V případě všech součástek na spodní straně muselo být ověřeno, zda by při usazení do nepájivého pole tyto součástky nebránily úplnému dosednutí. Omezením byla výška 2,54 mm plastové části kolíkové lišty na spodní straně. [23]

Zvláštní pozornost musela být v této fázi věnována návrhu obvodu oscilátoru. V jeho případě je pro zaručení funkčnosti obzvláště důležité postupovat dle doporučených návrhových pravidel. Například je třeba věnovat pozornost minimalizaci parazitní kapacity a indukčnosti, dále umístění krystalu co nejbližší k mikrokontroléru, aby byly dráhy spojů co nejkratší. Také by neměly být napříč obvodem oscilátoru ani v jeho blízkosti vedeny vodiče vysokorychlostních signálů, aby nedocházelo k rušení. [15]

Optimalizace návrhu DPS za účelem dodržení pravidel návrhu probíhala plošně na celé desce. Jako příklad tohoto procesu je uveden vývoj návrhu obvodu krystalového oscilátoru na obr. 19. Na obrázku vlevo je zobrazena varianta, kde nejsou dodržena pravidla pro návrh. Takový obvod by s největší pravděpodobností nefungoval, nedošlo by k oscilaci krystalu a dlouhé spoje obvodu by plnily spíše funkci antény. [15] Na obrázku vpravo je pak opravený návrh, kterého bylo docíleno otočením mikrokontroléru o 90°. Tím bylo dosaženo kratší délky spojů. Dále tato úprava umožnila vedení ostatních spojů mimo obvod krystalového oscilátoru a tím i eliminaci rušení.



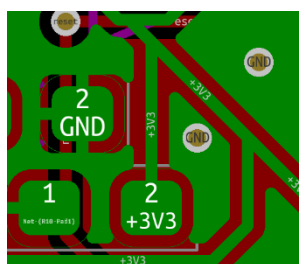
Obr. 19 Vývoj návrhu obvodu oscilátoru

Vodiče vysokorychlostních rozhraní bylo třeba vést jako diferenciální páry. Konkrétně jsou to rozhraní USB a sběrnice CAN. Pro návrh to znamená, že spoje tvořící diferenciální pár musely být už při tvorbě schématu pojmenovány stejně a zakončeny znaky ‚+‘ a ‚-‘. Takové označení umožňuje programu Pcbnew rozoznat vodiče diferenciálního páru a je důvodem na první pohled nelogického označení zejména v případě sběrnice CAN. Signálové vodiče typu HIGH jsou zde označeny znaménkem ‚+‘ a typ LOW znaménkem ‚-‘. Obdobně jsou označeny vodiče spojující mikrokontrolér s transceivery – TXD znaménkem ‚+‘ a RXD znaménkem ‚-‘. Následně byl využit vestavěný nástroj *Ladit délku diferenciálního páru* programu Pcbnew k úpravě tvaru spojů a vyrovnání jejich délek (obr. 20).



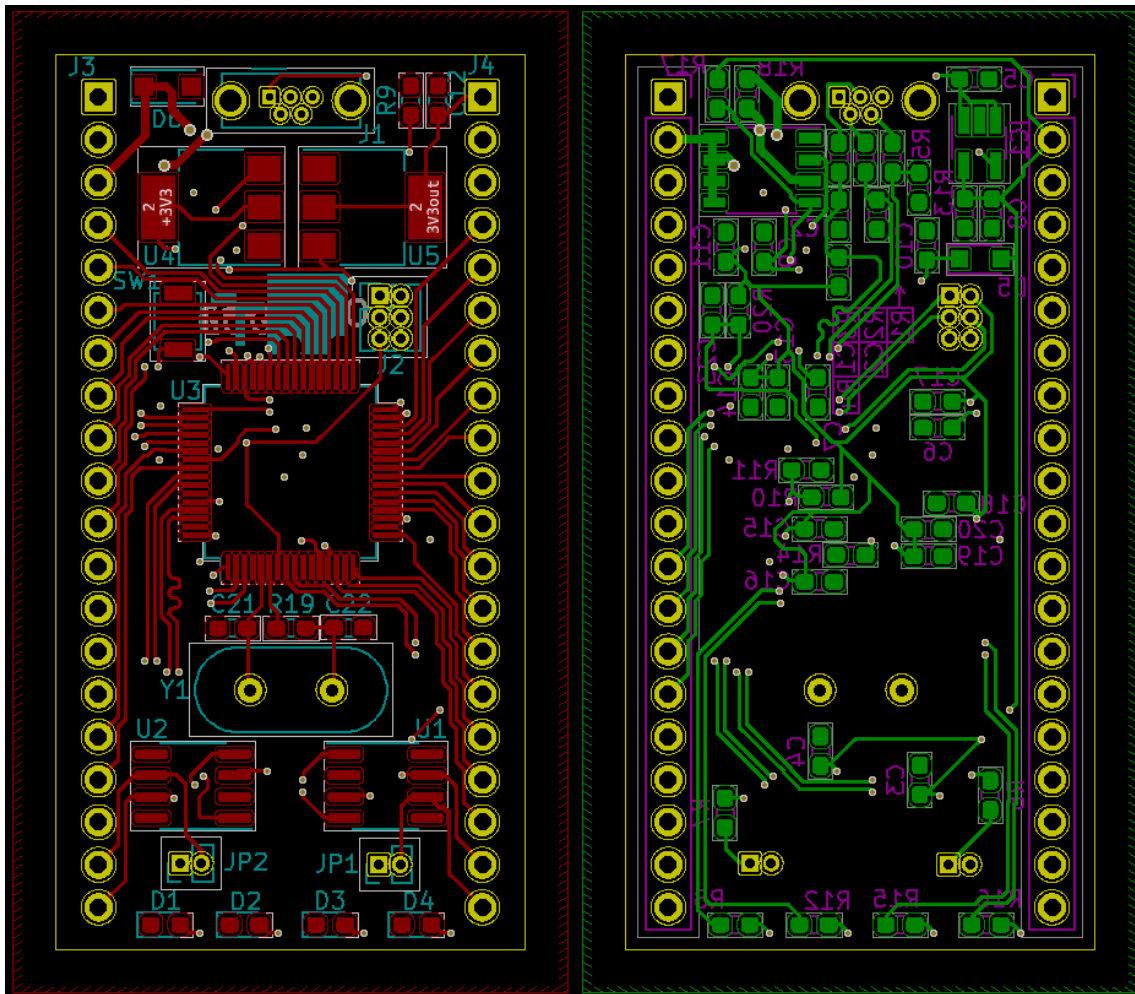
Obr. 20 Příklad úpravy spojů tvořících diferenciální pár

Také byly vhodně doplněny prokovené otvory spojující vrstvy GND obou stran. V některých případech totiž vedení spojů neumožnilo vytvoření souvislé zemnicí vrstvy na obou stranách a vznikly tak „ostrůvky“ vrstvy GND. Umístění prokovů umožnilo propojení těchto oblastí se zbytkem vrstvy GND. Tím bylo realizováno vícebodové zemnění desky a s tím spojená minimalizace proudových smyček. Důsledkem je snížená parazitní indukčnost desky. [1] Jeden případ takového propojení je uveden na obr. 21.



Obr. 21 Propojení oblastí vrstvy GND

Výsledkem návrhu je deska o rozměrech 53,34 x 27,94 mm. Rozmístění součástek na obou stranách je patrné z obr. 22.

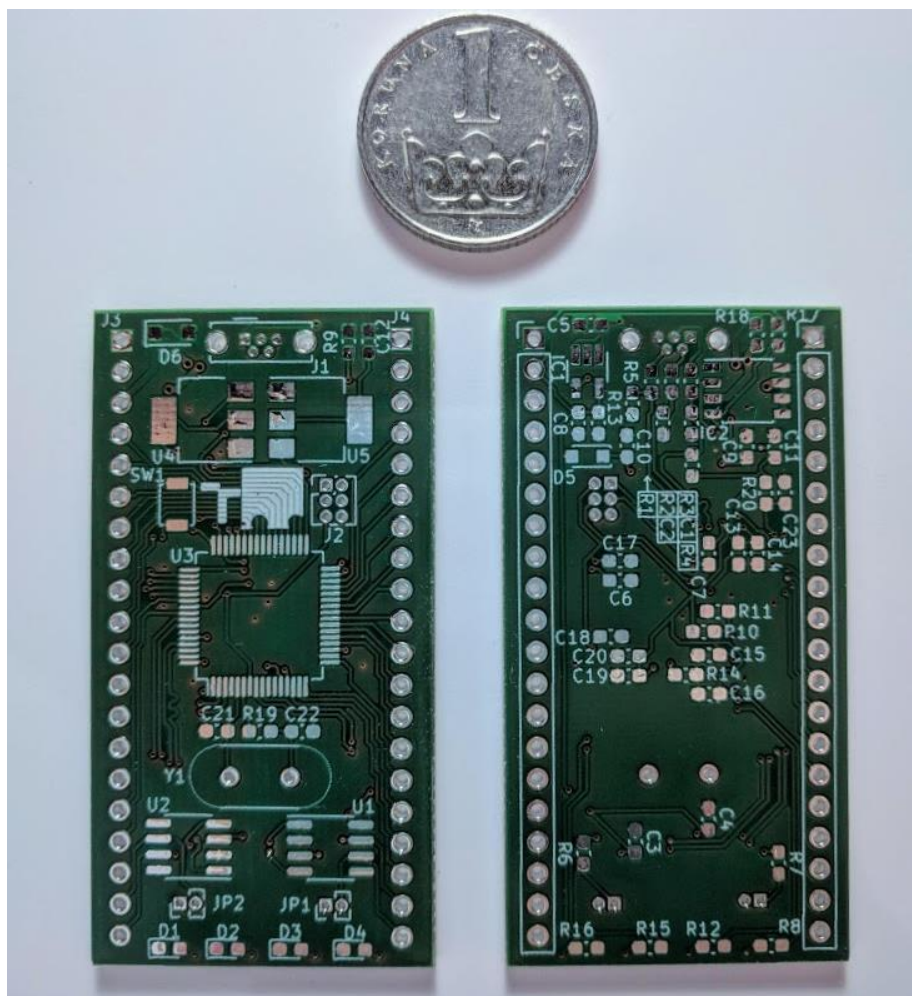


Obr. 22 Výsledný návrh DPS

2.5 VÝROBA DPS A OSAZENÍ SOUČÁSTKAMI

Po dokončení návrhu následoval export dat pro výrobu. Jak již bylo zmíněno v popisu návrhu DPS, výroba byla realizována u společnosti Gatema. Z nabídky POOL servisu [22] byla zvolena z důvodů minimalizace výrobních nákladů nejlevnější varianta. Ta zahrnuje výrobu dvouvrstvé DPS se základní tloušťkou vrstvy mědi 18 μm a bezolovnatým provedením pájky. Kromě dodržení technologických kritérií výrobce muselo být ošetřeno i pojmenování dat jednotlivých vrstev. Exportované soubory ve formátu gerber musely být pojmenovány dle požadavků výrobce [9].

Následně byly tyto soubory nahrány do online konfigurátoru na webových stránkách výrobce a byla provedena objednávka. Jelikož výrobce udává minimální účtovanou plochu 1 dm^2 [21] a výsledný návrh desky má plochu 0,15 dm^2 , byla zadána výroba šesti kusů desky. Vyrobena deska je zobrazena na obr. 23.



Obr. 23 Vyrobená deska

Současně byly objednány součástky k osazení desky. K tomu byl využit internetový obchod Farnell, odkud byly objednány méně dostupné části. To zahrnuje mikrokontrolér, integrované obvody, diody, krystal, tlačítko, USB konektor a zkratovací propojky. Kromě prodejce Farnell byla zvažována objednávka z obchodů TME a Mouser. Farnell byl zvolen z důvodu nejnižší ceny poštovného a dostupnosti všech součástek.

Přesto ale bylo třeba řešit náhradu součástky z důvodu aktuální nedostupnosti. Konkrétně to byl případ spínače výkonové zátěže FPF2123. K náhradě byl zvolen příbuzný produkt FPF2124. Jedinou odlišností od původní volby je absence funkce automatického restartu při poklesu napětí nebo překročení teploty. [13] V praxi to znamená v případě takové chyby nutnost manuálního restartování odpojením a opětovným zapojením napájení USB.

Běžnější součástky, jakými jsou pasivní součástky, kolíkové lišty a LED diody, byly objednány místně, a to od prodejce GM Electronic.

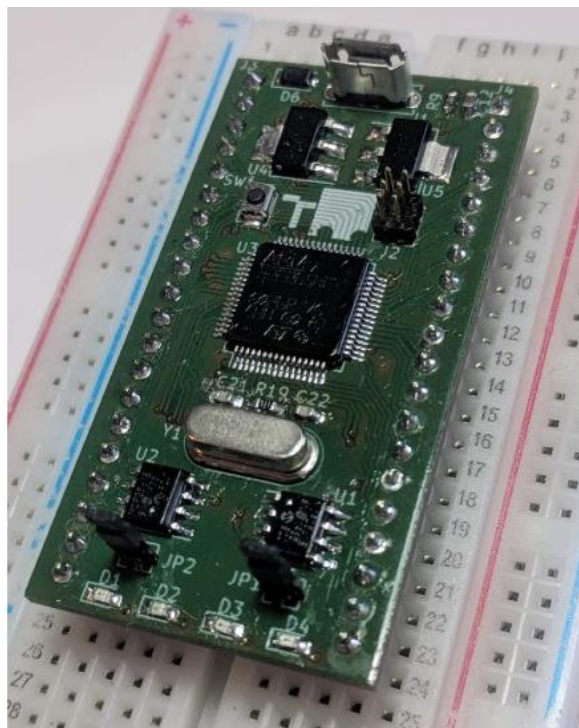
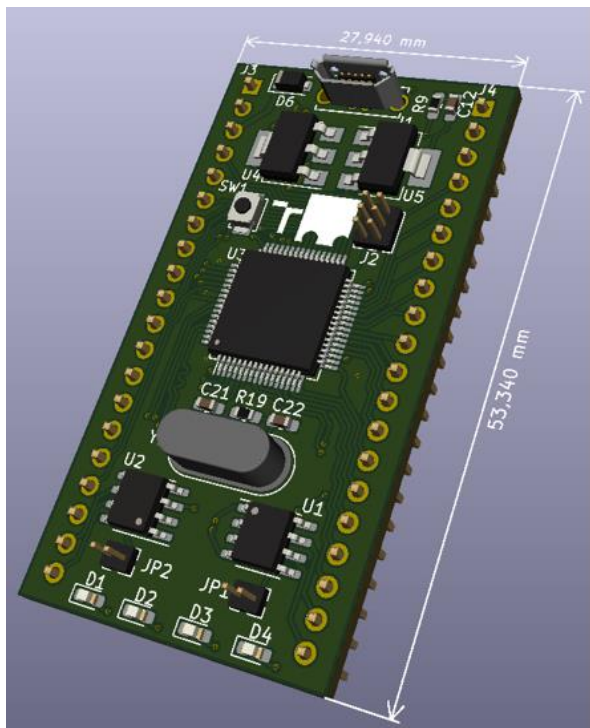
Po obdržení desky a všech potřebných součástek následovalo osazení desky. To bylo provedeno ručním pájením. Na desce byly osazeny všechny pozice s výjimkou rezistoru R10 na pinu mikrokontroléru *BOOT0*. Osazením rezistoru R11 byl pin *BOOT0* připojen k zemnicí vrstvě *GND*, a tím bylo docíleno zvolení bootování z uživatelské paměti flash. [11] Proces osazování desky je vyobrazen na obr. 24.



Obr. 24 Osazování desky součástkami

Po osazení všech součástek byla deska očištěna isopropylalkoholem od přebytečného tavidla a dalších nečistot. Následně byla na obě strany desky aplikována vrstva akrylového ochranného laku. Toto ošetření vytváří konformní povlak, který zajišťuje ochranu desky a prodlužuje tak její životnost zejména při vystavení vnějším vlivům. [24]

Porovnání dokončené desky s 3D modelem vygenerovaným programem Pcbnew je zobrazeno na obr. 25.



Obr. 25 Srovnání 3D modelu s vyrobenou deskou

3 PROGRAMOVÁNÍ MIKROKONTROLÉRU

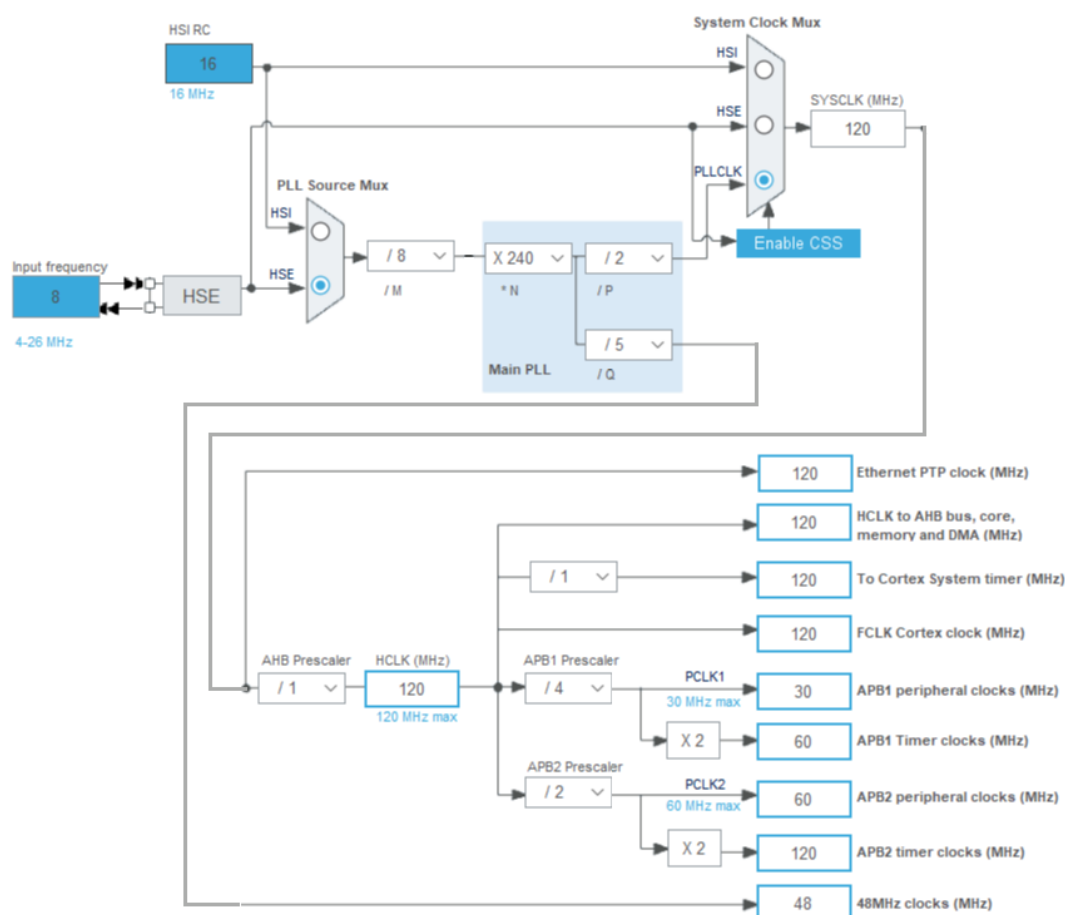
Po kompletaci desky po stránce hardwaru přichází na řadu softwarová část práce. Ta zahrnuje konfiguraci parametrů mikrokontroléru a následnou tvorbu inicializačního kódu.

Poté již následuje programování požadovaných funkcí. Pro demonstrativní účely přitom bylo programováno blikání LED diod.

3.1 KONFIGURACE MIKROKONTROLÉRU

Konfigurace byla prováděna v programu STM32CubeMX. Tento proces zahrnuje nastavení pracovní frekvence na základě zvoleného krystalu, poté následuje nastavení požadovaných rozhraní.

V první řadě byla v záložce *Clock Configuration* programu STM32CubeMX zvolena možnost HSE, která značí vysokorychlostní externí oscilátor. Poté byla nastavena frekvence krystalu na 8 MHz a nastavením děličů kmitočtu byla upravena tak, aby bylo pro všechny časovače a periferie dosaženo nejvyšší možné frekvence (obr. 26).



Obr. 26 Konfigurace frekvencí mikrokontroléru

Následně bylo provedeno nastavení časování sběrnice CAN. K tomu byla s využitím online kalkulatoru [25] sestavena tabulka možných rozdělení bitu na časová kvanta pro datový tok 250 kbps (tab. 1). Vstupními hodnotami pro výpočet byla frekvence 30 MHz periférií domény APB1 (obr. 26), do které patří obě rozhraní CAN [11], volba vzorkovacího bodu v 75 % délky bitu a hodnota SJW o délce jednoho časového kvanta.

Tab. 1 Vypočtené varianty časování sběrnice CAN [25]

Bit Rate	accuracy	Pre-scaler	Number of time quanta	Seg 1 (Prop_Seg+Phase_Seg1)	Seg 2	Sample Point at	Register CAN_BTR
250	0.0000	6	20	14	5	75.0	0x004d0005
250	0.0000	8	15	10	4	73.3	0x00390007
250	0.0000	10	12	8	3	75.0	0x00270009
250	0.0000	12	10	7	2	80.0	0x0016000b
250	0.0000	15	8	5	2	75.0	0x0014000e

Z tab. 1 následně byla zvolena taková varianta, aby bylo umožněno neoptimálnější nastavení v programu STM32CubeMX. Jedná se o červeně vyznačenou variantu v tab. 1. Výsledkem je rozdělení bitu na 20 časových kvant. Délka segmentu 1 (zahrnuje *PROP_SEG* a *PHASE_SEG1*) činí 14 časových kvant a délka segmentu 2 je 5 časových kvant. Zbýlé časové kvantum je přiřazeno zmíněné hodnotě SJW.

Tyto hodnoty byly společně s nastavením prescaleru (násobiče) na hodnotu 6 vloženy do konfigurace obou rozhraní CAN v programu STM32CubeMX (obr. 27).

▼ Bit Timings Parameters	
Prescaler (for Time Quantum)	6
Time Quantum	200.0 ns
Time Quanta in Bit Segment 1	14 Times
Time Quanta in Bit Segment 2	5 Times
ReSynchronization Jump Width	1 Time

Obr. 27 Konfigurace časování CAN v STM32CubeMX

Volba parametrů jednotlivých rozhraní závisí na požadavcích pro konkrétní aplikaci. Vzhledem k programování blikajících LED diod tedy nebylo třeba věnovat pozornost nastavení každého rozhraní individuálně. V případě jejich využití by ale byla potřeba obdobná konfigurace jako pro zmíněné rozhraní CAN.

U analogových vstupů je nutné nastavit prescaler a rozlišení na požadovanou hodnotu. Pro rozhraní SPI je vyžadována konfigurace formátu. Kromě nastavení prescaleru je u času třeba specifikovat jeho polaritu a bod vzorkování, tedy jestli je snímán na náběžné nebo sestupné hraně. Toto nastavení závisí na zařízení, ke kterému se mikrokontrolér přes SPI připojuje. [4]

V nastavení projektu bylo zvoleno vývojové prostředí TrueSTUDIO a následně byl programem STM32CubeMX vygenerován inicializační kód mikrokontroléru.

3.2 TVORBA KÓDU

Programování mikrokontroléru bylo provedeno ve vývojovém prostředí Atollic TrueSTUDIO. Toho bylo docíleno s využitím programovacího jazyka C. Za účelem testování, které je popsáno v následující kapitole, byl vytvořen kód, který spustí blikání LED diod v reakci na stav čteného digitálního vstupu. Nejprve byla ve funkci *main* inicializována proměnná *test_read* typu *GPIO_PinState* (obr. 28).

```
int main(void)
{
    GPIO_PinState test_read;
```

Obr. 28 Inicializace proměnné *test_read*

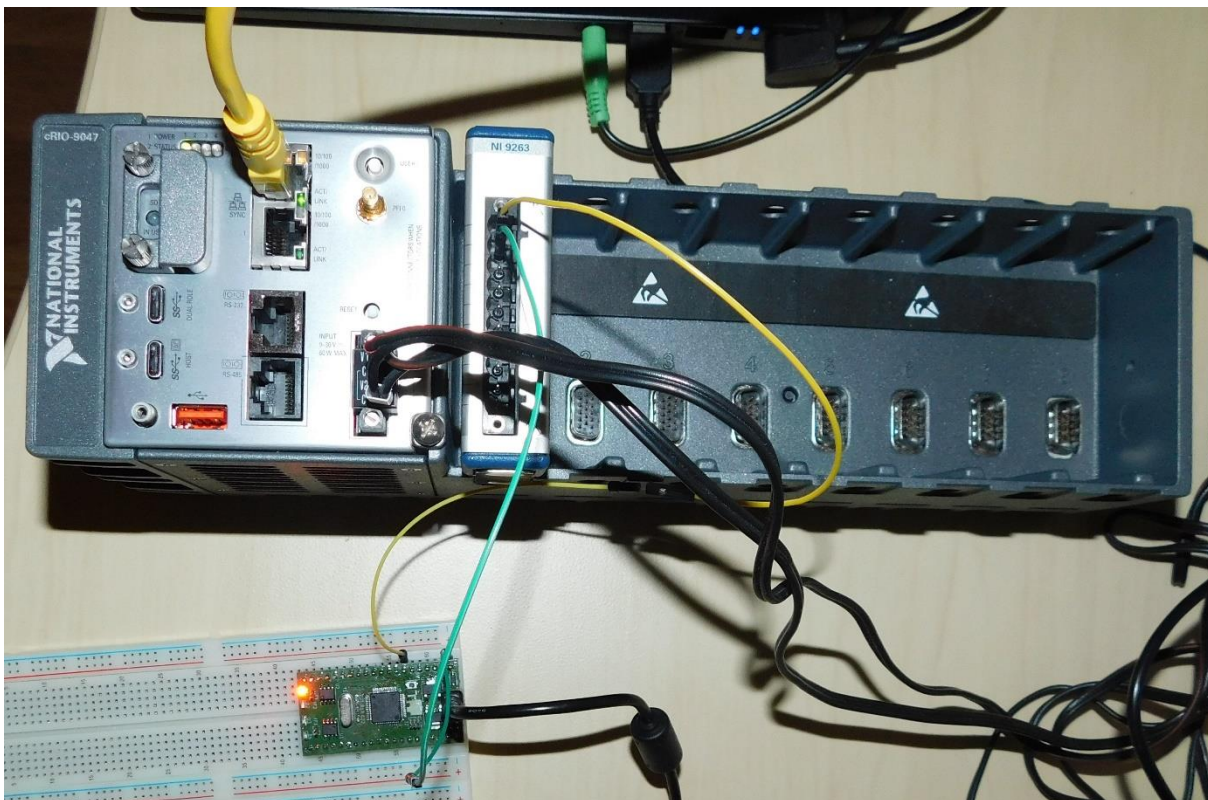
Poté následuje kód automaticky vygenerovaný programem STM32CubeMX související s konfigurací mikrokontroléru a inicializací jeho periférií. Následně je ve funkci *main* obsažena nekonečná smyčka, která obsahuje kód požadované funkce mikrokontroléru (obr. 29). Ten zahrnuje čtení digitálního vstupu na pinu *PC7*, přičemž při čtení logické jedničky první dioda svítí a tři zbývající postupně blikají s různými prodlevami. Čtení digitálního vstupu je provedeno s využitím funkce *HAL_GPIO_ReadPin*. Hodnota vrácená touto funkcí je uložena do dříve vytvořené proměnné *test_read*. Následně je pomocí funkce *HAL_GPIO_WritePin* řešeno rozsvícení první diody. Na pin odpovídající této diodě je zapsána čtená hodnota z proměnné *test_read*. Pokud je tedy na vstupu zjištěna logická jednička, je logická jednička i výstupem z pinu první diody a tím je k ní přivedeno napětí 3,3 V. Blikání zbývajících diod je taktéž závislé na čtené hodnotě a je řešeno v rámci podmínky *if*. Pokud je čtena logická jednička, spustí se sekvence blikání diod. Nejprve je sepnuta druhá dioda, po prodlevě 200 ms je sepnuta třetí dioda, následuje prodleva 500 ms a sepnutí čtvrté diody. Podmínka *if* a tím i celá smyčka je ukončena prodlevou 1000 ms. Blikání diod zajišťuje funkce *HAL_GPIO_TogglePin*, dochází tedy k přepínání stavů mezi logickou nulou a jedničkou. Nejprve jsou všechny diody postupně rozsvíceny a následně vypnuty. Prodleva je realizována funkcí *HAL_Delay*.

```
while (1)
{
    test_read = HAL_GPIO_ReadPin(GPIOC, GPIO_PIN_7);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOC, LED1_Pin, test_read);
    if (test_read==1)
    {
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, LED2_Pin);
        HAL_Delay(200);
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, LED3_Pin);
        HAL_Delay(500);
        HAL_GPIO_TogglePin(GPIOC, LED4_Pin);
        HAL_Delay(1000);
    }
}
```

Obr. 29 Kód nekonečné smyčky mikrokontroléru

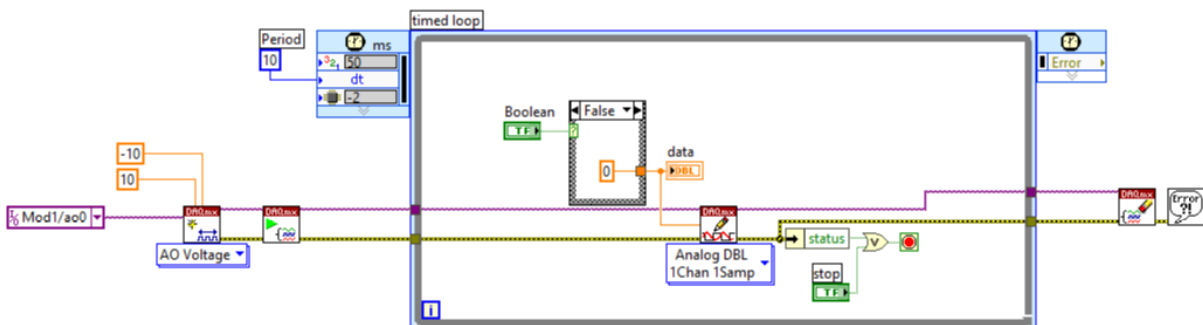
4 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI

Blikání diod je v kódu podmíněno stavem digitálního vstupu právě z důvodu testování. To bylo provedeno s využitím zařízení National Instruments cRIO-9047. Výhodou tohoto zařízení je podpora DAQ režimu, což znamená schopnost řízení a měření v reálném čase, a především snadnější programování. To oproti FPGA módu urychluje a zjednodušuje konfiguraci. [26] Toto zařízení bylo doplněno modulem NI-9263, který zajišťuje vysoce přesný výstup napětí. Výstup A00 tohoto modulu byl propojen s digitálním vstupem mikrokontroléru na pinu PC7. Dále bylo propojeno zemnění mikrokontroléru a modulu NI-9263, byl tedy spojen vývod mikrokontroléru GND s vývodem COM zmíněného modulu (obr. 30).



Obr. 30 Zapojení mikrokontroléru s testovacím hardwarem

Konfigurace testu byla provedena v programu LabVIEW. Naprogramovaná smyčka testu je zřejmá z obr. 31.



Obr. 31 Smyčka testu mikrokontroléru

Nejprve je provedeno nastavení výstupního napětí modulu NI-9263. Následuje samotná nekonečná smyčka o periodě 10 ms, ve které je prováděno sepnutí a vypnutí výstupu pomocí přepínače nazvaného *Boolean*. Přestože se jedná o modul generující analogový výstup, tak pomocí okna case ovládaného tímto přepínačem jsou nastavovány jen dva stavy – logická 0 (0 V) a logická 1 (3,3 V). Tím lze konstatovat, že v podstatě byl generován digitální signál, který byl přijímán na pinu mikrokontroléru s digitálním vstupem. Dále je ve smyčce blok určený pro komunikaci s modulem, nastavuje zvolené výstupní napětí. Smyčka je ukončena buď manuálně, nebo při zjištění chyby. V pravé části kódu jsou bloky pro deinicializaci modulu a kontrolu chyb. Tento kód byl zkompilován, nahrán na cRIO a spuštěn. Jeho ovládání probíhalo z Front Panelu zmíněným přepínačem, a to vše v reálném čase.

Při ověřování jedné základní funkce mikrokontroléru tedy byla sledována reakce na odesílaný signál z modulu v cRIO. Bylo ověřeno, že mikrokontrolér provedl při vysílání stavu logické jedničky naprogramovanou funkci popsanou v kapitole věnované tvorbě kódu. Tím bylo potvrzeno úspěšné inicializování mikrokontroléru, správná funkčnost SWD rozhraní, napájecího obvodu a zapojení LED diod. Před další prací s mikrokontrolérem by bylo nutné ověřit funkčnost i zbývajících částí navržené desky.

ZÁVĚR

Cílem práce byl návrh a výroba mikrokontroléru umožňujícího univerzální využití ve vozidlech.

Po shrnutí potřebných teoretických znalostí byly stanoveny požadavky na navrhovanou desku s ohledem na aplikaci v automobilu. Na základě toho byl zvolen mikrokontrolér a další součásti desky. Poté byl proveden samotný návrh, přičemž bylo dbáno na dodržení návrhových pravidel. K návrhu byl využit softwarový balík KiCad. Po dokončení návrhu následovala výroba desky a její osazení součástkami ručním pájením. Dále byl programem STM32CubeMX vygenerován inicializační kód mikrokontroléru. Ten byl importován do vývojového prostředí Atollic TrueSTUDIO, kde byl vytvořen uživatelský kód. Tento kód byl do flash paměti mikrokontroléru nahrán přes rozhraní SWD prostřednictvím programátoru ST-Link. Závěrem bylo úspěšně provedeno ověření funkčnosti desky.

Výsledkem práce je funkční prototyp desky založené na mikrokontroléru STM32 s 32bitovým ARM procesorem. Ten poskytuje dostatečný výkon pro takřka libovolnou výpočetní operaci související s řízením požadovaného systému. S ohledem na užití v automobilu je deska vybavena patřičnými vstupy a výstupy.

Ověření funkčnosti bylo provedeno blikáním LED diod na základě čtení vstupu. Mikrokontrolér na stav digitálního vstupu reagoval dle očekávání, čímž byla potvrzena funkčnost samotného mikrokontroléru, SWD rozhraní a LED diod. Dalším krokem by mohlo být řízení skutečného akčního členu s využitím spínače výkonové zátěže obsaženého na desce. Také byla nakonfigurována CAN rozhraní mikrokontroléru, dále by tedy mohlo být provedeno otestování komunikace přes sběrnici CAN. Před další prací s deskou by celkově měly být ověřeny všechny její části.

Navržená deska má i několik nedostatků, které ale neomezují její funkčnost. Jejich vyřešení by spíše usnadnilo manipulaci. Příkladem může být chybějící označení vstupů a výstupů na kolíkových lištách. Zahrnutí tohoto označení v servisním potisku by zjednodušilo zapojování. Desku je dále možné napájet pouze prostřednictvím USB konektoru. Využitím neobsazeného pinu 3 kolíkové lišty J4 (obr. 17) mohla být zavedena alternativní možnost napájení přímým připojením stejnosměrného napětí 5 V bez nutnosti USB kabelu.

Celkově by návrh mohl být v další iteraci rozšířen o možnost napájení napětím 12 V, univerzalitě by prospělo i zvýšení počtu vstupních a výstupních pinů, který je v současnosti zřejmě hlavním omezením. To už by ale vyžadovalo nový návrh založený na mikrokontroléru s větším počtem vývodů.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2193-9.
- [2] VÁŇA, Vladimír. *ARM pro začátečníky*. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-246-6.
- [3] REIF, Konrad, ed. *Automotive Mechatronics: Automotive Networking, Driving Stability Systems, Electronics*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. ISBN 978-3-658-03974-5.
- [4] SELECKÝ, Matuš. *Arduino: uživatelská příručka*. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.
- [5] ATMEL. [online katalogový list]. *ATtiny102 / ATtiny104*. ©2016 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42505-8-bit-AVR-Microcontrollers-ATtiny102-ATtiny104_Datasheet.pdf
- [6] ST MICROELECTRONICS. [online]. *Discovery kit with STM32F407VG MCU*. ©2017 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00039084-discovery-kit-with-stm32f407vg-mcu-stmicroelectronics.pdf
- [7] ŠTĚRBA, Pavel. *Elektronika a elektrotechnika motorových vozidel: seřizování, diagnostika závad a chybové kódy OBD*. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0271-8.
- [8] CANLAB. Časování CAN sběrnice. *CANLAB s.r.o.* [online]. Brno: CANLAB [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: http://www.canlab.cz/cs/can_bus_timing
- [9] GATEMA. [online]. *Kritéria dat pro POOL servis*. 2020 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.gatema.cz/file-link/kriteria-dat-pro-pool-servis.pdf>
- [10] ST MICROELECTRONICS. [online katalogový list]. *STM32F103xC, STM32F103xD, STM32F103xE*. ©2018 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103re.pdf>
- [11] ST MICROELECTRONICS. [online katalogový list]. *STM32F205xx, STM32F207xx*. ©2019 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f205re.pdf>
- [12] MBED. [online katalogový list]. *mbed NXP LPC1768 Schematic*. ©2020 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/media/uploads/chris/mbed-005.1.pdf>
- [13] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. [online katalogový list]. *FPF2123-FPF2125 IntelliMAX™ Advanced Load Management Products*. ©2008 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/FPF2125-D.pdf>
- [14] ST MICROELECTRONICS. [online katalogový list]. *LD1117*. ©2020 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ld1117.pdf>

- [15] ST MICROELECTRONICS. [online]. *Oscillator design guide for STM8AF/AL/S, STM32 MCUs and MPUs*. ©2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00221665-oscillator-design-guide-for-stm8af-al-s-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf
- [16] IQD FREQUENCY PRODUCTS. [online katalogový list]. *Quartz Crystal Specification LFX TAL003156*. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.iqdfrequencyproducts.com/products/pn/LFX TAL003156Bulk.pdf>
- [17] MICROCHIP. [online katalogový list]. *MCP2561/2 High-Speed CAN Transceiver*. ©2013-2014 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005167C.pdf>
- [18] MICROCHIP. [online]. *MCP2551 to MCP2561 Migration*. ©2013 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/90003101A.pdf>
- [19] INFINEON. [online katalogový list]. *BSP752R Smart High-Side Power Switch*. ©2016 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSP752R-DS-v01_02-EN.pdf?fileId=db3a304316f112290116f233cbd271e9
- [20] LUCKY LIGHT. [online katalogový list]. *0603 Package Super Amber Chip LED*. ©2006 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.960-502.1.pdf>
- [21] GATEMA. [online]. *Ceník POOL servis*. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.gatema.cz/file-link/cenik-pool-servis.pdf>
- [22] GATEMA. [online]. *Technické podmínky*. 2017 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.gatema.cz/file-link/technicke-podminky-vyroby-dps.pdf>
- [23] CONNECTOR. [online katalogový list]. *PIN HEADER 2.54mm(0.100") Straight Pin Type*. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.832-017.1.pdf>
- [24] KINNER, Phil. *Performance + Reliability of Automotive Electronics via Conformal Coatings*. [online]. Leicestershire: Electrolube, ©2020, 6th April 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://electrolube.com/knowledge_base/maximising-performance-and-reliability-of-automotive-electronics-with-conformal-coatings/
- [25] OERTEL, Heinz-Jürgen. *CAN Bit Time Calculation*. *CAN Bit Time Calculation* [online]. ©2013-2018 Heinz-Jürgen Oertel [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.bittiming.can-wiki.info/>
- [26] NATIONAL INSTRUMENTS. *What is CompactRIO with NI-DAQmx?* [online]. Austin: National Instruments, ©2020 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/18/what-is-compactrio-with-ni-daqmx-.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>A/D</i>		Analogově digitální
<i>ARM</i>		Advanced RISC Machine
<i>BGA</i>		Ball grid array
C_0	[pF]	Zkratová kapacita
<i>CAN</i>		Controller Area Network
C_L	[pF]	Zátěžová kapacita
C_{L1}, C_{L2}	[pF]	Kapacity kondenzátorů obvodu krystalového oscilátoru
C_S	[pF]	Parazitní kapacita
<i>D/A</i>		Digitálně analogový
<i>DAQ</i>		Data Acquisition
<i>DPS</i>		Deska plošného spoje
<i>EEPROM</i>		Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
<i>EPROM</i>		Erasable Programmable Read-Only Memory
<i>ESR</i>	[Ω]	Ekvivalentní sériový odpor
F	[MHz]	Frekvence krystalu
<i>FPGA</i>		Field Programmable Gate Array
$G_{m_crit_max}$	[mA/V]	Maximální hodnota kritického zesílení
g_{m_crit}	[mA/V]	Kritické zesílení
<i>GND</i>		Ground
<i>GPIO</i>		General-purpose input/output
<i>HAL</i>		Hot Air Leveling
<i>HAL</i>		Hardware abstraction layer
I^2C		Inter-Integrated Circuit
I_L	[mA]	Proud procházející LED diodou
<i>JTAG</i>		Joint Test Action Group
<i>LED</i>		Light Emitting Diode
<i>LQFP</i>		Low-profile Quad Flat Package
<i>MCU</i>		Microcontroller unit
<i>MISO</i>		Master Input Slave Output
<i>MOSI</i>		Master Output Slave Input
<i>OTG</i>		On-The-Go
<i>PCB</i>		Printed Circuit Board

<i>PLCC</i>		Plastic-leaded chip carrier
<i>PROM</i>		Programmable Read-Only Memory
<i>QFP</i>		Quad Flat Package
<i>R</i>	[Ω]	Odpor rezistoru LED diody
<i>R_{ext}</i>	[Ω]	Odpor externího rezistoru
<i>ROM</i>		Read-Only Memory
<i>RTOS</i>		Real Time Operating System
<i>RXD</i>		Receive Data
<i>SAE</i>		Society of Automotive Engineers
<i>SCL</i>		Serial Clock Line
<i>SCLK</i>		Serial Clock
<i>SDA</i>		Serial Data Line
<i>SJW</i>		Synchronization Jump Width
<i>SMD</i>		Surface Mount Device
<i>SOD</i>		Small outline diode
<i>SOIC</i>		Small outline integrated circuit
<i>SOT</i>		Small outline transistor
<i>SPI</i>		Serial Peripheral Interface
<i>SS</i>		Slave Select
<i>SWD</i>		Serial Wire Debug
<i>THT</i>		Through-hole technology
<i>TXD</i>		Transmit Data
<i>UART</i>		Universal asynchronous receiver-transmitter
<i>USB</i>		Universal Serial Bus
<i>V_L</i>	[V]	Úbytek napětí na LED diodě
<i>V_s</i>	[V]	Přívod napětí z mikrokontroléru