



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

Diplomová práce

**VÍCEÚČELOVÁ ZOBRAZOVACÍ A
ZÁZNAMOVÁ JEDNOTKA PRO POUŽITÍ V
LETECTVÍ A PRŮMYSLU**

Bc. Jakub Štol

Studijní program:

Studijní obor:

Vedoucí práce:

Kybernetika a robotika

Letecké a kosmické systémy

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

PRAHA 2016



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student:	Bc. Jakub Štol
Studijní program:	Kybernetika a robotika
Obor:	Letecké a kosmické systémy
Název tématu česky:	Víceúčelová zobrazovací a záznamová jednotka pro použití v letectví a průmyslu
Název tématu anglicky:	Multipurpose Data Visualization and Recording Unit for Aircraft and Industrial Use

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte zařízení umožňující přehledné zobrazení a záznam dat ze sběrnic RS-232 a RS-485. Hardware jednotky navrhněte tak, aby byla možnost připojit i zařízení komunikující pomocí sběrnic: RS422, CAN (Aerospace, ARINC 825) a Ethernet (AFDX).

1. Navrhněte celkový koncept zařízení.
2. Navrhněte a realizujte hardware (schéma zapojení, plošné spoje).
3. Navrhněte a realizujte mechanickou konstrukci jednotky.
4. Implementujte softwarové vybavení (firmware pro textovou a grafickou vizualizaci naměřených dat a jejich ukládání na SD kartu).
5. Demonstrujte funkčnost jednotky ve spojení s tříosým magnetometrem.

Seznam odborné literatury:

- [1] Vobecký, J., Záhlava, V.: Elektronika. GRADA, 2005. 220 p. ISBN 80-247-1241-5
- [2] Pinker, J.: Mikroprocesory a mikropočítače. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-730-0110-1.
- [3] Condor Engineering, Inc. (Květen 2005). AFDX protocol tutorial. Santa Barbara, CA 93101, California, USA. Načteno z http://www.cems.uwe.ac.uk/~ngunton/afdx_detailed.pdf
- [4] Texas Instruments, Inc. (Červen 2002). RS-422 and RS-485 Standards Overview and System. Application Report. Dallas, Texas 75235, USA. Načteno z <http://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf>
- [5] Stock, M. (Duben 2009). Arinc 825 specification for CAN in airborne applications. CAN Newsletter, stránky 40-42. Načteno z <http://can-newsletter.org/uploads/media/raw/283888f81ddad5838c5b2a6be7dc9442.pdf>

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 9. prosince 2015

Platnost zadání do¹: 30. září 2017

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 9. 12. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Bc. Jakub Štol

Abstrakt

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat zařízení schopné zaznamenávat a přehledně zobrazovat data z průmyslových a leteckých sběrnic sběrnic. V první části práce je detailněji popsána problematika a postup řešení. V druhé kapitole je pokryta nabídka komerčních produktů včetně jejich porovnání. V části číslo tři je uvedena teoretická část práce. V následujícím oddíle je blíže popsán koncept navrženého zařízení, následovaný popsáním mechanické konstrukce celé jednotky. Kapitola 6 popisuje problematiku a řešení návrhu elektrické části práce. V sedmé kapitole je detailně rozebrána softwarová část jednotky. Předposlední kapitola je věnována testu některých parametrů jednotky. Závěrečná kapitola shrnuje poznatky, chyby návrhu a budoucnost projektu.

Abstract

The goal of this work was to design a multifunctional data logging unit capable of logging and displaying data from a various busses. In the first chapter this unit is described in detail along with associated problems. In the second chapter a brief survey of commercial products and a comparison of its parameters is being done. In part number three theoretical problems are covered. In the next part more detailed concept of the data logger is described followed by a mechanical construction of the unit. Chapter six describes electrical part of this work. Chapter number seven covers software part of this work. Final chapter consists of a multiple unit tests. In conclusion results are evaluated and possible future improvements are discussed.

Děkuji Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a cenné rady, které mi pomohly tuto práci realizovat. Dále děkuji rodině a přítelkyni za trpělivost a plnou podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	1
2	Dostupná řešení	3
3	Teoretická část	5
3.1	RS232	5
3.2	RS422 a RS485	6
3.3	Sběrnice CANaerospace a CAN	7
3.4	Arinc 429	11
3.5	Avionics Full-Duplex Ethernet	13
4	Koncept zařízení	15
5	Mechanická část jednotky	19
6	Elektrická část jednotky	21
6.1	Zdrojová část	21
6.2	Baterie a řízení nabíjení	24
6.3	Mikrokontrolér	25
6.4	Paměť pro obrazová data	28
6.5	Displej a dotyková vrstva	29
6.6	Sběrnice a komunikační rozhraní	31
6.7	Interní a externí flash paměť a ostatní podpůrné periferie	33
7	Programová část jednotky	36
7.1	Dostupné grafické knihovny	36
7.2	Základní struktura a použité knihovny	37
7.3	Inicializace a procesy	39
7.4	Dekódování výstupu z magnetometru	40
8	Test jednotky	43
8.1	Měření synchronizačních pulzů displeje	43
8.2	Měření tepelného vyzařování	44

8.3	Měření vyzařování mikrokontroléru	45
8.4	Měření spotřeby proudu záznamové jednotky	47
8.5	Test komunikace s magnetometrem	48
9	Závěr	49
	Použitá literatura	53
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56
	Slovník	57
	Obsah příloženého CD	58
	Přílohy	59
A	Výkres pouzdra jednotky	60
B	Schéma záznamové jednotky	61
C	Deska plošných spojů	70
D	Graf vertikálního synchronizačního pulzu displeje	74

Kapitola 1

Úvod

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout zařízení, které by bylo schopné zaznamenávat příchozí informace z množství sběrnic, zobrazovat na displej a ukládat na paměťové zařízení. Zařízení by mělo být dostatečně výkonné, aby bylo schopné s velkou frekvencí vykreslovat data na displej o velkém rozlišení. Mělo by také být ekonomické z pohledu spotřeby elektrické energie a to do té míry, aby mohlo být spuštěno dlouhou dobu pouze z integrované vnitřní baterie. Záznamová jednotka by měla být schopna libovolně distribuovat energii z vnitřní baterie ven a tak případně napájet na to uzpůsobené zařízení nebo senzory.

Při návrhu by měl být kladen důraz na spolehlivost celé jednotky. Ta by měla být zajištěna výběrem kvalitních komponent od certifikovaných výrobců. Se spolehlivostí zařízení také souvisí implementace programové části práce. Při tvorbě a testování jednotky by měly být pokryty a vyladěny všechny případné chyby.

Se spolehlivostí přístroje souvisí také důvod, proč nebylo použito volně dostupné, komerční zařízení, jako například tablet. Takováto jednotka by byla snadno programovatelná a měla by velký displej. Tablety mají k dispozici v převážné většině případů pouze USB konektor pro připojení k počítači, případně externí flash paměti. USB konektor nemusí být spolehlivý při dlouhodobém používání a při zvýšeném mechanickém namáhání. Při dočasném odpojení konektoru by mohlo dojít k nenahraditelné ztrátě dat. Zároveň by musela vzniknout deska plošných spojů s implementovanými konektory, řadiči, budiči a mikrokontrolérem převádějícím a upravujícím získaná data.

Záznamové zařízení, připojené na tablet, by mohlo fungovat jako distributor elektrické energie pro externí zařízení. Nízká kapacita interních baterií by měla za následek malou výdrž tabletu, hlavně při zvýšeném proudovém odběru dlouhodobých měření s rozsvíceným displejem. Z těchto důvodů bylo proto rozhodnuto vytvořit záznamové zařízení a bylo upuštěno od levných, tabletových variant.

Podmínkou pro splnění diplomové práce uvedené v zadání práce je implementace sběrnice RS232. Pro zvýšení univerzálnosti celého zařízení mohou být implementovány budiče a řadiče dalších komunikačních protokolů.

Tato diplomová práce seznámí čtenáře s tvorbou univerzálního záznamového zaří-

zení. Nejprve bude prozkoumána dostupnost komerčních zařízení na trhu. V případě, že nebude nalezena jednotka, která odpovídá parametrům návrhu, přistoupí se k samotné tvorbě. V kapitole, věnované teoretické stránce projektu, budou rozebrány letecké a průmyslové sběrnice se zaměřením na sběrnice implementované na desce plošných spojů. Nejprve bude nastíněn koncept celého zařízení a dále rozebrány parametry vybraných součástí. Následuje kapitola věnovaná nákupu a úpravě mechanického pouzdra záznamové jednotky. Kapitola číslo 6 provádí čtenáře návrhem jednotky po elektrické stránce. Budou detailně rozebrány jednotlivé součástky, jejich propojení a umístění na desce plošných spojů. Kapitola věnovaná programové části projektu seznamuje čtenáře s tvorbou software a s použitím některých pokročilých knihoven. Závěr této kapitoly je věnován propojení univerzálního záznamového zařízení s magnetometrem s digitálním výstupem. Kapitola číslo 8 je věnována testům parametrů zařízení a potvrzení jeho funkčnosti.

Kapitola 2

Dostupná řešení

Na trhu existuje řada dostupných, komerčních přístrojů, která jsou po zakoupení k dispozici. Takováto zařízení mají své výhody, převážně v dostupnosti podpory výrobce v případě vzniku chyb či problémů s funkcí.

Příkladem komerčně dostupného zařízení je například záznamová jednotka DT80 Intelligent Universal Input Data Logger od společnosti CAS dataloggers.

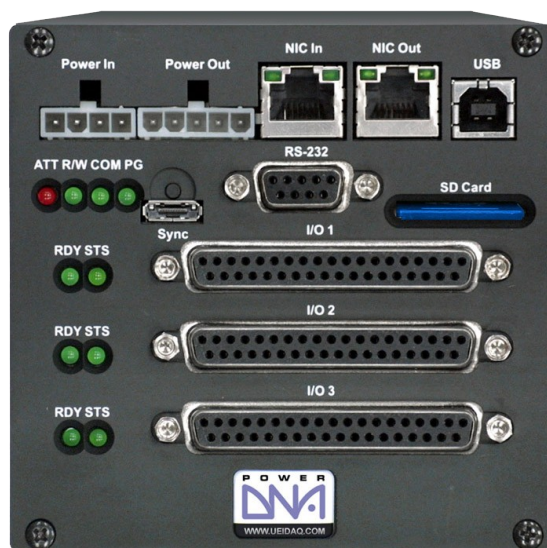


Obrázek 2.1: Záznamové zařízení DT80 od společnosti CAS dataloggers

Toto záznamové zařízení je vybaveno až patnácti analogovými vstupy s rozsahem vstupního napětí ± 30 V a je rozšiřitelné až na 300 analogových vstupů zakoupením dalších rozšiřujících modulů. Z jednotky je vyvedeno 8 digitálních vstupů a výstupů.

Zařízení je vybaveno sběrnici RS232 pro záznam dat z externích zařízení a také USB sběrnici pro přístup k uloženým souborům se zaznamenanými daty. Velkou výhodou tohoto komerčního zařízení je implementovaný FTP server pro vzdálený přístup k uloženým datům a webový server pro základní ovládání jednotky.

Oproti řešení, které navrhl autor této práce, zařízení neobsahuje integrovanou baterii s dlouhou výdrží a není tak schopné pracovat samostatně bez přístupu k síti. Zároveň ani není schopno distribuovat napájení po sběrnici a umožnit tak napájení připojených zaří-



Obrázek 2.2: Zařízení UEIlogger 300 od společnosti United Electronic Industries [29]

zení. Druhým záporem je absence sběrnice RS422 nebo RS485.

Jednotka také není osazena grafickým displejem a není možné přistupovat k aktuálním hodnotám sběrnic, digitálních a analogových vstupů.

Druhým příkladem komerčního produktu je výkonný data logger UEIlogger 300 od společnosti United Electronic Industries. Toto zařízení je přímo určené pro měření z leteckých sběrnic MIL-STD-1553 a ARINC-429 a ze sériové sběrnice RS232 [29]. Zařízení je rozšiřitelné připojením externích karet až o 150 analogových vstupů nebo 288 digitálních vstupně výstupních signálů.

Nevýhodou tohoto řešení oproti řešení navrhovaného autorem této práce je absence displeje o dostatečném rozlišení pro přímé čtení dat ze sběrnic. Data lze číst pouze z SD karty integrované v jednotce nebo pomocí ethernetu a připojeného počítače s instalovaným softwarem výrobce. Zařízení je také nastavitelné pouze přes toto rozhraní. Z jednotky je sice vyveden standardní konektor pro napájení externích zařízení nebo dalších záznamových zařízení, není však integrována baterie a záznamová jednotka tedy není přenosné a použitelné v místech, kde není k dispozici přístup k elektrické síti. Jednotka UEIlogger 300 není osazena sběrnicí CAN a Univerzální Sériová Sběrnice (USB) není v této verzi implementována [29].

Z těchto důvodů bylo přikročeno vlastní k realizaci zařízení.

Kapitola 3

Teoretická část

V této kapitole, věnované teoretickému rozboru, jsou nastíněny některé sběrnice, implementované v praktické části této diplomové práce. Důraz je dbán především na sběrnici RS232, která je použita k otestování funkčnosti celého zařízení. Detailněji je také rozebrána fyzická a linková vrstva sběrnice CAN a CANaerospace, která je v jednotce také osazena.

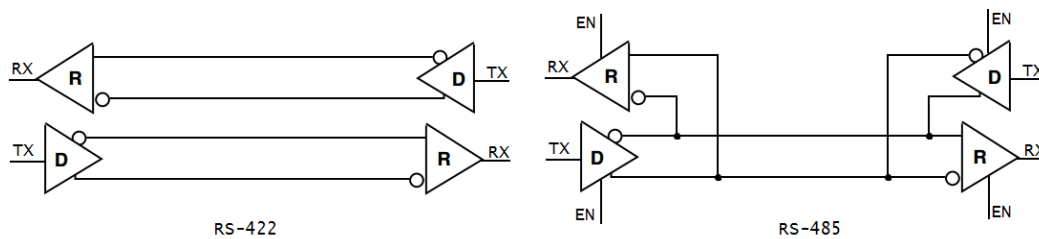
3.1 RS232

Tento standard vyvinutý v roce 1969 definuje synchronní a asynchronní sériovou komunikaci pro přenos dat. V dnešní době se tento standard již v osobních počítačích převážně nevyskytuje a byl nahrazen modernějším rozhraním USB. V průmyslu se však tento standard a jeho modifikace RS-422 a RS-485 stále používá.

Standard RS232 používá ke komunikaci s koncovým zařízením celkem devět vodičů, z nichž nejdůležitější a jediné povinné jsou vodiče GND, Tx a Rx. Bez těchto vodičů nemohou být korektně přenesena data obousměrně. Vodiče Tx slouží pro odchozí data ze zařízení a Rx k datům příchozím [14]. V koncovém zařízení musí být překřížené vodiče Tx a Rx. Z toho důvodu byl definován typ zařízení DTE (data terminal equipment), což je obvykle počítač a DCE (data circuit-terminating equipment). Zařízení typu DCE může být například modem, nebo v případě této práce fluxgate magnetometr s digitálním výstupem a v tomto koncovém zařízení jsou vstupy a výstupy datových a signálových vodičů otočeny. Jsou-li navzájem propojená dvě zařízení se

Napětíové úrovně odchozího signálu se musí podle standardu RS232 pohybovat v rozmezí 5 až 15 V pro logickou 0 a -5 až -15 V pro logickou 1. Příchozí data se musí naopak pohybovat v rozmezí ± 3 až ± 25 V pro obě logické úrovně [14]. Jsou-li implementovány ostatní řídicí vodiče, jejich logické úrovně jsou prohozeny. V praktické části této práce je použit budič sběrnice MAX3232 od společnosti Texas Instruments, které splňuje rozsahy napětí jednotlivých úrovní [25].

Vysílání samotných dat předchází vyslání jednoho start bitu, kterým se logická hodnota na lince přepne do opačného stavu. Po osmi odeslaných bitech (existují i varianty 7



Obrázek 3.1: Zjednodušené schéma zapojení sběrnic RS-422 a RS-485

a 9 bitové) následuje paritní bit. Použití paritního bitu je nejjednodušší způsob zabezpečení dat v komunikaci. Ve vysílacím zařízení se sečte počet bitů ve vysoké logické úrovni a doplní se paritním bitem tak, aby byla zachována předem dohodnutá podmínka sudého nebo lichého počtu bitů. Komunikace je uzavřena jednoduchým nebo zdvojeným stop bitem.

Použití asynchronního způsobu přenosu dat je podmíněno jednoznačným definováním konkrétní přenosové rychlosti na vysílací a přijímací straně. Standardní baudové rychlosti jsou odvozeny dělením 115200bd. Použita je tedy řada rychlostí 115200, 57600, 38400, atd. V dnešní době je často potřeba přenášet data rychleji než 115200bd a proto se používají i její násobky (230400, 460800, atd).

3.2 RS422 a RS485

Standard EIA RS-422 je standard sériové komunikace používající pár diferenciálních vodičů pro přenos informace jedním směrem. RS-422 používá jako fyzické medium kroucenou dvoulinku. Použitá síťová topologie této sběrnice je typu bod-bod, případně je možné implementovat i multidrop (více přijímačů na jedné lince). V případě, že je požadován obousměrný přenos dat, jsou použity dva páry kroucených dvojlinek.

Napětíové úrovně odchozí komunikace této sběrnice se pohybují v rozmezí 2 až 6 V pro logickou 0 a -2 až -6 V pro logickou 1. Na straně receiveru se musí pohybovat v rozmezí napětí ± 0.2 až ± 6 volt pro stejné napětíové úrovně. Absolutní maximální dovolené napětí na této sběrnici je ± 12 V. V této diplomové práci je použit budič sběrnice SP491EN-L od společnosti Sipex. Tento integrovaný obvod může být použit i jako budič sběrnice RS-485. Rozdíl mezi sběrnicí RS-485 a RS-422 je v použitém počtu vodičů a v zapojení budičů. RS-422 používá dva páry kroucených vodičů a podporuje obousměrný, plně duplexní přenos dat. RS-485 používá pouze jeden pár diferenciálních vodičů a podporuje pouze poloviční duplex. Při tomto způsobu komunikace dochází k přepínání vysílacích a přijímacích budičů [6]. EIA-485 a EIA-422 definuje použití 120Ω (standardně stíněné kroucené dvojlinky) a 120Ω (60Ω na každé lince) zakončovacího odporu na obou koncích sběrnice, na straně přijímačů.

3.3 Sběrnice CANaerospace a CAN

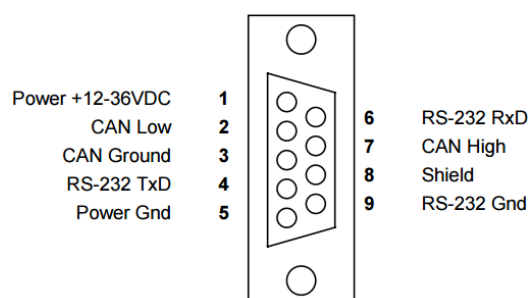
Sběrnice CAN (Controller Area Network) je komunikační protokol, vyvinutý firmou Robert Bosch GmbH, pro použití v automobilovém průmyslu. Jednoduchost sběrnice z hlediska dokumentace, snadná implementace na čip kontrolérů a nízké náklady měly za následek častější používání a zvyšování její oblíbenosti u výrobců automobilových zařízení. V dnešní době je protokol CAN definován normou ISO 11898. Tato norma popisuje (ve standardním ISO/OSI modelu) pouze fyzickou vrstvu tohoto protokolu (specifikace CAN 2.0A) a vrstvu linkovou. Tato norma byla později rozšířena o specifikaci CAN 2.0B a zavedla použití standardního a rozšířeného formátu zprávy.

Fyzická vrstva této sběrnice je tvořena dvou vodičovým vedením, které se standardně značí CAN_H a CAN_L. Vodiče jsou ukončeny zakončovacími 120Ω odpory a to na obou stranách. Specifikace CAN2.0A definuje dva základní stavy, ve kterých se může sběrnice nacházet. Tyto stavy (napěťové úrovně) se nazývají dominantní a recesivní, přičemž dominantní je log.0 a recesivní je log.1. Pokud je alespoň jeden z uzlů, připojených na sběrnici, v dominantním stavu, celá sběrnice se pak nachází v dominantním stavu. Recesivní stav je výchozím stavem celé sběrnice, neprobíhá-li žádná komunikace.

Napětí na vodiči CAN_H se může podle specifikace CAN2.0A pohybovat v rozmezí 3.5 až 5 V a CAN_L nabývá rozmezí 0 až 1.5 V. Recesivní stav je reprezentován nulovým rozdílovým napětím na obou vodičích. Nachází-li se sběrnice v dominantním stavu, je rozdílové napětí obou vodičů 5 V. Z předchozího je též patrné, že signálové vodiče nesou vzájemně invertovanou logickou hodnotu.

Ke sběrnici může být teoreticky připojen libovolný počet uzlů. Literatura uvádí maximální doporučený počet vysílacích uzlů 64 na segment. Teoretická přenosová rychlost je až 1 Mbit/s, která je dosažitelná pouze na krátké vzdálenosti do 40m. Při délce vedení 130 m klesá rychlost na 500 kbit/. Při délce 560 m je rychlost snížena na 125 kbit/s a při délce vedení 1.2 km klesá rychlost až na 70 kbit/s.

Napěťové úrovně, stejně jako topologie sběrnice, je definována standardem CAN a její parametry platí i pro leteckou variantu této sběrnice CANaerospace. CANaerospace může být použit s CAN2.0A a 2.0B (11 bitové a 29 bitové identifikátory) a při libovolných rychlostech komunikace [22].



Obrázek 3.2: Konektor DSUB použitý v letecké variantě sběrnice CAN[22]

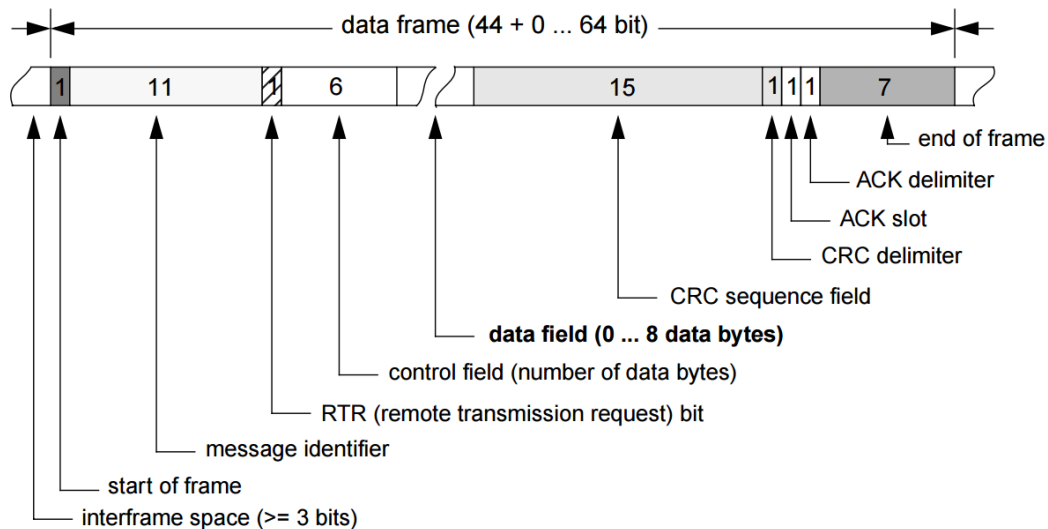
Typ priority	Rozsah hodnot	Popis
Emergency Event Data (EED)	0 - 127	Vysílané asynchronně kdykoliv je požadována okamžitá akce
High Priority Node Service (NSH)	128 - 199	Vysílané asynchronně nebo opakovaně s definovaným intervalem opakování
High Priority User-Defined Data (UDH)	200 - 299	Zpráva anebo formát dat plně definovatelný uživatelem
Normal Operation Data (NOD)	300 - 1799	Data o stavu vysílaná asynchronně nebo opakovaně s definovaným intervalem
Low Priority User-Defined Data (UDL)	1800 - 1899	Interval vysílání a obsah datového rámce plně definovatelný uživatelem
Debug Service Data (DSD)	1900 - 1999	Asynchronní vysílání nebo opakované pro ladění a testování komunikace
Low Priority Node Service Data (NSL)	2000 - 2031	Vysíláno asynchronně nebo opakovaně pro test a údržbu

Tabulka 3.1: Popis identifikátorů priorit používaných v letecké variantě sběrnice CAN

Standard CANaerospace definuje tři různé konektory, standardně používané v letectví. První definovaný konektor je standardní D-SUB 9 detailně specifikovaný v MIL-24308/8. Tento konektor v běžně dostupné variantě je použit v praktické části této diplomové práce. V obrázku 3.2 jsou uvedeny povinné a volitelné výstupní signály. Povinnými signály jsou CAN_H, CAN_L a CAN ground, přičemž není doporučeno použití zemnicího signálu jako stínění kvůli možným EMC problémům. Mezi volitelné piny patří výkonový pin 1 sloužící k distribuci napájení. Na pinu 4 a 6 může být volitelně vyvedena sériová komunikační linka RS232. Standard CANaerospace definuje použití konektorů MIL-24308/8 a MIL-C-38999 včetně příslušných rozmístění signálů. V této diplomové práci je použit D-SUB konektor, proto jsou v této kapitole tyto dva konektory pouze zmíněny.

Sběrnice CAN je komunikační rozhraní typu multimaster. Není tedy definován jeden uzel, který by rozhodoval a řídil komunikaci na sběrnici, ale každý uzel může začít vysílat jakmile je připraven a sběrnice je v klidovém recesivním stavu. Ostatní uzly mohou zahájit vysílání po ukončení předchozího vysílání. Výjimku tvoří pouze chybové rámce, které mohou být odeslány okamžitě po identifikaci chyby. Dojde-li k současnému vysílání více uzlů současně, takto vzniklá kolize je řešena pomocí rámce priority, která je standardní součástí protokolu CAN a CANaerospace.

Každý vysílač po odeslání zároveň porovnává hodnotu právě vyslaného bitu s aktuální hodnotou sběrnice. Zjistí-li řadič rozdílnou hodnotu vyslaného bitu a aktuálního stavu



Obrázek 3.3: Základní rámec sběrnice CAN [22, str. 52]

sběrnice, přerušit okamžitě vysílání. Tím je zajištěno přednostní vysílání zprávy s vyšší prioritou a také zajištění, že nedojde k jejímu poškození. Tento identifikátor je uveden na začátku zprávy. Na rozdíl od fyzické vrstvy, kde CANaerospace nedefinuje žádné výrazné změny oproti průmyslovému standardu, definuje letecká varianta odlišně obsah některých částí rámců. Příkladem jsou výše zmíněné bity priorit. Priority používané ve standardu CANaerospace jsou uvedeny v tabulce 3.1.

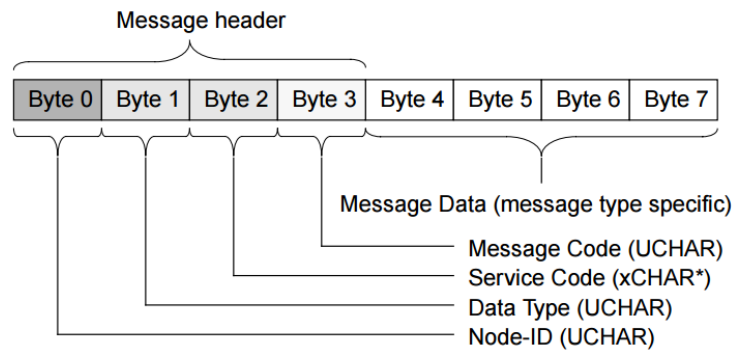
Základní formát datového rámce podle specifikace CAN 2.0A pro 11 bitový formát identifikátoru zprávy je k dispozici na obrázku 3.3. Sestává se z počátečního bitu, uvozujiícího počátek datového rámce. Následuje identifikátor zprávy, který řídí přístup na sběrnici pomocí priorit. Bit RTR slouží pro rozpoznání, zda se jedná o rámec obsahující data nebo o žádost přístupu ke sběrnici. Řídící pole (control field) obsahuje rezervované dva bity a čtyři bity udávající délku datové zprávy. Maximální délka zprávy je 8 bytů. Sběrnice CAN podporuje zabezpečení přenosu dat pomocí CRC klíče s polynomem $x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$ následovaným oddělovačem CRC (CRC delimiter). Závěr zprávy je vyhrazen potvrzovacímu bitu ACK, který vyšle jakýkoli uzel který zprávu přijal a oddělovači potvrzení. Poslední část vyslané zprávy je vyhrazena pro konec rámce dlouhý 7 bitů.

CANaerospace definuje obsah datového pole. Použito je kódování big endian. Datová část protokolu CANaerospace je rozdělena na polovinu a první 4 byty jsou označeny jako hlavička zprávy (message header). Druhá polovina obsahuje data.

Byte 0 je použit jako identifikátor vysílací stanice (jedná-li se o EED nebo NOD). Jedná-li se o NSH nebo NSL, označuje byte 0 cílovou stanici. Je-li hodnota bytu 0 rovna nule, je označen jako broadcast.

Byte 1 označuje typ datové zprávy. Všechny definované typy jsou uvedeny v tabulce, v dokumentaci [22, kap. 2].

Byte 2 obsahuje servisní kód. Jedná se o číslo v rozsahu 0 až 255 inkrementované



Obrázek 3.4: Rozdělení datové části rámce použité v protokolu CANaerospace [22, str. 8]

o jedna každou odeslanou zprávu. Tento byte slouží k identifikaci doby vyslání zprávy a k zjištění, zda nedošlo k zmeškání zprávy. NSL a NSH zprávy používají tento byte k rozšířené specifikaci služby.

Poslední byte hlavičky obsahuje servisní kód, jedná-li se o NSL nebo NSH zprávu, případně může být použit libovolně, jedná-li se o NOD.

Byte 4 až 8 obsahuje samotná data. CANaerospace dále definuje obsah datové části rámce jedná-li se o EED zprávu. Byte 4 a 5 obsahuje číslo chyby, byte 6 ID operace a byte 7 místo chyby.

CAN kromě datových packetů definuje formát žádosti o data. Formát této zprávy je obdobný jako datový, pouze bit RTR je nastaven do recesivní úrovně a chybí datová část rámce. Pokud ve stejném okamžiku jeden uzel žádá o data a druhý data vysílá, je recesivní úrovní RTR bitu zajištěna priorita uzlu vysílajícího data.

CANaerospace poskytuje komunikaci příkaz/odpověď jako nastavbu za běžný typ komunikace. Příkazy mohou být odeslány konkrétnímu uzlu na sběrnici stejně jako všem uzlům zároveň (broadcast). Protokol může být provozován v režimu vysoké a nízké priority. Vysoká priorita poskytuje 36 komunikačních kanálů, nízká 16. Identifikátory jednotlivých kanálů jsou v tabulce v dokumentaci [22] na straně 10. Komunikace je zahájena odesláním zprávy požadavku pod příslušným identifikátorem. Všechny uzly na sběrnici jsou povinny poslouchat komunikaci a detekovat přítomnost vlastního identifikátoru. Pokud uzel identifikuje své ID, je povinen odeslat odpověď na požadavek do 100 ms. Odpověď musí zároveň obsahovat ID cílového uzlu. Standard CANaerospace definuje, že každý uzel musí podporovat alespoň identifikační službu IDS. Identification service slouží ke zjištění rozložení sítě. Další služby definované standardem CANaerospace jsou uvedeny v dokumentaci [22] na straně 11 až 23 včetně příslušného tvaru rámce.

Standardní zprávy protokolu CANaerospace jsou navíc rozšířeny o identifikátory. Tyto identifikátory efektivně rozšiřují vzájemnou spolupráci mezi jednotlivými uzly. Každý uzel sběrnice může být vyroben různým výrobcem, a tak byl zaveden seznam standardních identifikátorů, rozlišujících mezi standardními veličinami používanými v letectví. Seznam definovaných leteckých parametrů a jejich identifikátorů je uveden v tabulce na straně 26. Použité jednotky, příslušné každému parametru, jsou standardní jednotky SI definované

Vysílání	Stav	Příjem
$+10.0V \pm 1.0 V$	Vysoká úroveň	+6.5 až 13 V
$0 \pm 0.5 V$	Nulová úroveň	$\pm 2.5 V$
$-10.0 \pm 1.0 V$	Nízká úroveň	-6.5 až -13V

Tabulka 3.2: Popis napět'ových úrovní a stavů sběrnice ARINC 429

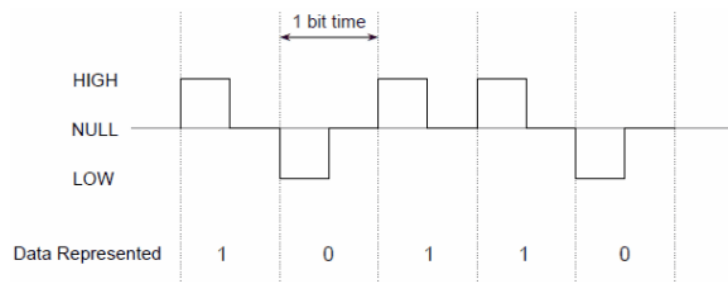
ve standardu ISO 1000. Používaná znaménka jsou určena podle mezinárodních konvencí a jsou uvedena v téže tabulce.

Podle dokumentace je pravděpodobnost špatného přenosu dat po sběrnici CAN přibližně 10^{-13} na zprávu. Pokud uvažujeme 100% vytížení sběrnice (8000 zpráv za sekundu), výsledná pravděpodobnost chyby bude přibližně 2.9×10^{-6} na hodinu letu, což činí sběrnici CANaerospace kandidátem na použití v kritických systémech [22, kap. 7]. Aby se dále snížila pravděpodobnost výskytu chyby, byla přidána podpora redundance. Takto upravená architektura sběrnice obsahuje dvě redundantní jednotky propojené stejným množstvím komunikačních kanálů. Redundance poskytuje odolnost systému na kritickou chybu, která by mohla způsobit úplnou ztrátu funkce. Příkladem budiž zkrat na vodičích CAN_H a CAN_L vzniklý při poškození jednoho uzlu na jedné sběrnici. V případě, že je ve sběrnici implementována redundance uzlů a kanálů, musí být použit 29 bitový identifikátor. K identifikaci jednotlivých redundantních uzlů je pak použit offset identifikátoru +65536.

3.4 Arinc 429

Aeronautical Radio INC. (ARINC) je technický standard převládající v letectví a to převážně v komerčních a transportních letadlech. Standard ARINC 429 definuje fyzické a elektrické charakteristiky (fyzickou vrstvu v ISO/OSI) modelu a také tvar datového rámce. Sběrnice používá kroucený pár diferenciálních vodičů, ve kterém se data pohybují pouze jedním směrem, tzv. simplex. Je-li implementována dvou párová sada vodičů, pak může být komunikace duplexní. Je-li tedy požadováno potvrzení přijetí datového balíčku, musí nutně být připojen druhý pár vodičů. Používané topologie jsou nejčastěji hvězdicové a sběrnicové. Uzel, který vysílá, může komunikovat až s 20ti zařízeními připojenými na jednu sběrnici.

Sběrnice ARINC 429 používá tři stavy, kterých může nabývat sběrnice: high, null a low. Napět'ové úrovně jednotlivých stavů jsou popsány v tabulce 3.2. Data jsou vysílána ve formátu return-to-zero. Log.1 je docíleno při přechodu napět'ové úrovně z nulové úrovně do vysoké v první půlce cyklu. V druhé půlce hodinového pulzu se napětí vrací do nulové úrovně. Obdobně tomu je i v případě logické 0, kdy signál přechází do záporného napětí a zpět. Tento způsob modulace v sobě nese informaci o hodinovém signálu a není tedy nutné další vodič nesoucí tento signál. Příklad změny napět'ových úrovní je k dispozici na obrázku 3.5. Standard ARINC 429 specifikuje dvě rychlosti datové komuni-



Obrázek 3.5: Příklad změny napět'ových úrovní na sběrnici ARINC 429 [1]

kace: pomalou, s rychlostí 12.5 kHz (povolená rychlost 12 až 14.5 kHz). Vysokorychlostní komunikace probíhá na 100 kHz ± 1 %. Tyto dvě rychlosti nemohou být použity na stejné sběrnici.

ARINC 429 definuje rámec, obsahující 32 bitové slovo. Tvar rámce je k dispozici na obrázku 3.6. ARINC 429 používá sudou paritu: počet vysokých úrovní ve slově musí být sudý a proto paritní bit slouží k detekci chyby nebo úpravě datového rámce.

30. až 31. bit je použit k identifikaci typu vysílaných dat a to v závislosti na rámci label. Tyto bity mohou zároveň indikovat znaménko, směr slova (kódováno v BCD) nebo případně status zařízení. Pokud rámec label indikuje binární data, bity 31 až 30 indikují status zařízení. Detailní rozpis informace nesený bity 31 a 30 v závislosti na kódování jsou k dispozici na straně 15 a 16 dokumentace.

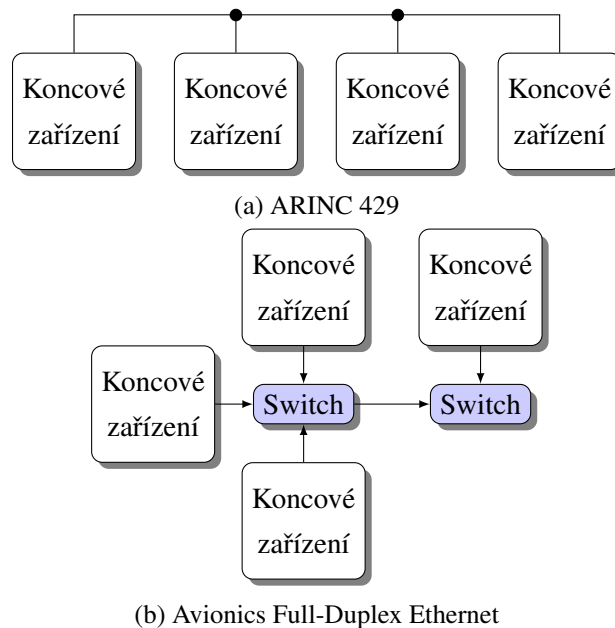
Bity 11 až 29 obsahují samotná data. Bit číslo 29 datového rámce je volitelný a označuje znaménko (log.0 značí +, log.1 značí -). 9. a 10. bit je označen jako Source/Destination Identifier a je ve standardu ARINC 429 označován jako volitelná. Tyto bity mohou sloužit jako identifikátor zdroje odesílání zprávy, případně ho mohou využít příjemci zprávy k detekování, pro který uzel sběrnice je tato zpráva primárně určena. Tyto dva bity mohou být využity k rozšíření pole label.

První odeslané bity jsou vždy bity značené label (MSB first) a stejně jako paritní bit jsou povinné. Datové typy definované standardem ARINC 429 jsou:

- Binární data BNR - data jsou kódovaná dvojkově
- Binary coded decimal BCD, česky dvojkově kódované dekadické číslo.
- Diskrétní data - Kombinuje BNR a BCD nebo individuální reprezentaci bitů
- Maintenance data a acknowledgement - sběrnice musí být duplexní. Typicky požaduje výměnu sekvence zpráv.
- Williamsburg/Buckhorn protokol - bitově orientovaný protokol použitý k přenosu většího množství dat než je základních 21bitů. Zdrojový a cílový uzel si nejprve vymění packet s požadavkem na odeslání (request to send), následovaný odpovědí o připravenosti k odeslání (clear to send). Vysílač následně zahájí datový tok. K použití tohoto typu přenosu musí být sběrnice duplexní.

8	7	6	5	4	3	2	1	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
Label								SDI		MSB								Data								LSB				SSM		P

Obrázek 3.6: Datový rámeček sběrnice ARINC 429 [1]



Obrázek 3.7: Porovnání topologie fyzické vrstvy Arinc 429 a AFDX

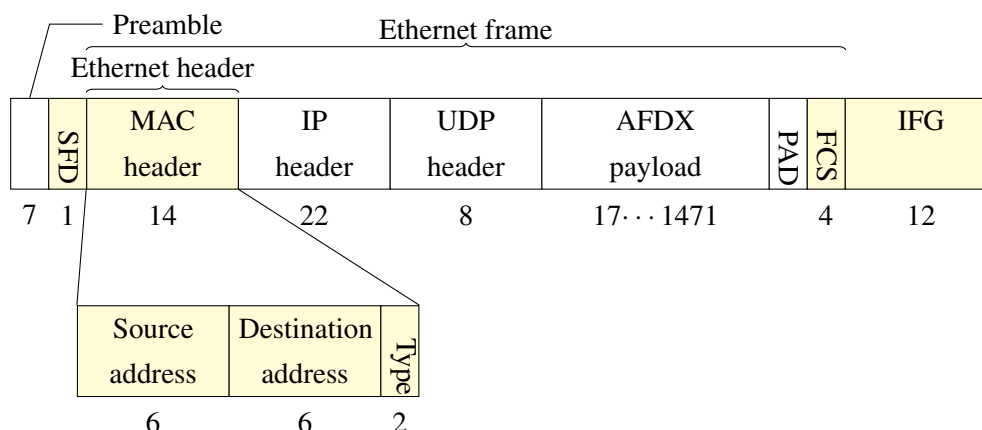
Rámeček label může být dále rozšířen bity 11 až 13, označované jako identifikátor zařízení (equipment identifier) k rozpoznání zdroje zprávy.

3.5 Avionics Full-Duplex Ethernet

Avionics Full-Duplex Ethernet, neboli AFDX, je standard který definuje elektrické (IEEE 802.3) a protokolové specifikace (ARINC 664, Část 7) a slouží pro komunikaci mezi jednotlivými leteckými subsystémy. Tento standard je založen na oblíbené technologii Ethernet, která je rozšířeně používána v domácnostech i průmyslu.

Letecká verze Ethernetu používá ke komunikaci dva páry diferenciálních vodičů, jeden pár pro odchozí a druhý pro příchozí komunikaci. Napětíové úrovně signálů se běžně pohybují od 0 V (log.0) do ± 2.8 V (log.1).

Topologie fyzické vrstvy je znázorněna na obrázku 3.7. Narozdíl od standardu ARINC 429, který používá sběrniceovou topologii, používá letecká verze ethernetu topologii hvězdicovou. Jednotlivá koncová zařízení jsou připojena přímo k přepínači komunikace (switch) a navzájem spolu skrz toto zařízení komunikují. Switche jsou navzájem propojené a rozšiřují tak množství připojených uzlů. ARINC 429 umožňuje připojení až 20ti zařízení na jednu sběrnici. Standard AFDX rozšiřuje připojení až na 2^{16} virtuálních spojení. Virtuální spojení (VL) se ve standardu AFDX používá k posílání rámců mezi uzly sítě AFDX. Virtuální spojení mezi zařízeními mohou být typu unicast, kdy dochází ke komunikaci



Obrázek 3.8: Rámec AFDX

pouze mezi dvěma zařízeními, nebo multicast, kdy jsou rámce odeslány více cílovým uzlům.

Jak je ilustrováno v obrázku 3.8, rámec odesílaný AFDX se sestává ze 7 bytů dlouhého rámce preamble [5]. Následuje rámec Start delimiter, který zahajuje komunikaci. MAC header, který je v AFDX terminologii často označován Ethernet header obsahuje cílovou a zdrojovou adresu zařízení. Tyto rámce v sobě obsahují dále definovanou strukturu, která je k dispozici [5, str. 45]. Cílová adresa identifikuje zařízení, které odeslalo rámec a je vždy typu unicast. Cílová adresa je vždy multicast (broadcast není povolen) a identifikuje koncová zařízení.

IP header obsahuje identifikaci cílového systému a identifikátor oddílu. Tento rámec se používá pro kontrolu fragmentace, jsou-li odesílány dlouhá data ve více rámcích. Dále obsahuje ID virtuálního spojení.

UDP header délky 8 bytů obsahuje zdrojové a cílové číslo portu.

AFDX payload je tvořen samotnými daty, které se ještě dále člení do menších oddílů. Každý oddíl má v hlavičce AFDX payload definovaný formát dat. Je-li délka dat menší než 18 bytů, rámec PAD funguje jako datová výplň, protože rámec ethernetu má povolenou minimální délku 64 bytů.

Rámec je uzavřen polem Frame Check Sequence(FCS) sloužícím k detekci chyb v rámci. Následuje poslední rámec IFG obsahujícím prázdná data. Těchto 12 bytů slouží k vzájemnému oddělení rámců (Inter-Frame Gap).

Kapitola 4

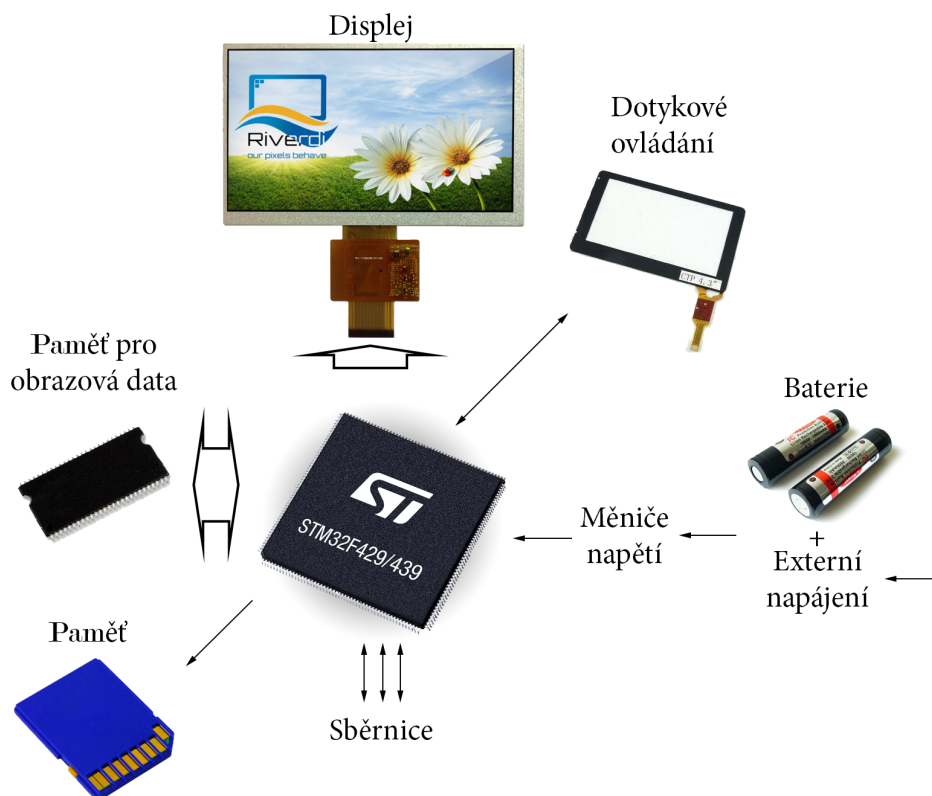
Koncept zařízení

V první fázi návrhu zařízení bylo nutné utřídit a sepsat požadované parametry zařízení. Z prvního konceptu bylo známo, že jednotka bude osazena zobrazovacím zařízením, displejem. Tento displej by měl mít dostatečně velké rozlišení a silný podsvit, aby bylo možné pozorovat displej i na slunci. Displej musel být zároveň osazen korektním rozhraním pro komunikaci s procesorem. Nejběžnější alternativy, poskytované výrobcí jsou: I²C/SPI, 8080(6800) a paralelní RGB. I²C je jednoduchá sběrnice používaná pro komunikaci mezi integrovanými obvody a poskytuje rychlost čtení dat až do rychlosti 5 MHz (standard Ultra-fast mode vyvinutý v roce 2012). [13] Tento komunikační standard definuje fyzickou vrstvu (a dále i linkovou) použitím datového a hodinového vodiče. Každé zařízení má přiřazenou unikátní adresu, která je často nastavitelná pomocí externích pinů, případně použitím vnitřních registrů integrovaného obvodu. SPI je sériová sběrnice, která na rozdíl od I²C používá čtyři vodiče. Odchozí a příchozí data mají každá svůj vlastní vodič. Sběrnice je doplněna hodinovým signálem a signálem, kterým se povoluje komunikace s cílovým zařízením. Obě sběrnice jsou lehce implementovatelné na desce plošných spojů a také po softwarové stránce. V případě použití displeje s velkým rozlišením může být rychlost komunikace nedostatečná a mohly by na displeji vznikat nechtěné artefakty, případně by mohlo docházet k blikání displeje. Tyto rozhraní se dají nejlépe použít ve spojení s malými displeji.

8080 je rozhraní, používající 8mi, 4 nebo 2 paralelních signálů pro obousměrný přenos dat. Rozhraní používá další vodiče pro signalizaci zápisu nebo čtení do/z zařízení. Toto rozhraní se často používá na monochromatických displejích.

V této diplomové práci bylo použito RGB paralelní rozhraní. Tato sběrnice používá až 24 paralelních datových vodičů, 8 pro každou barvu. Data jsou do displeje posílána na náběžnou či spádovou hranu hodinového signálu, jehož frekvence se může pohybovat v řádu desítek až stovek MHz (u větších displejů). Podrobný popis parametrů časování je k dispozici v kapitole 6. Důvodem pro výběr této sběrnice byla absence nutnosti použití externích řadičů a budičů, protože rozhraní je implementováno v periférii vybraného mikrokontroléru.

Těmto parametrům nejlépe vyhovoval displej RVT70UQTNWC0x, vyrobený společ-

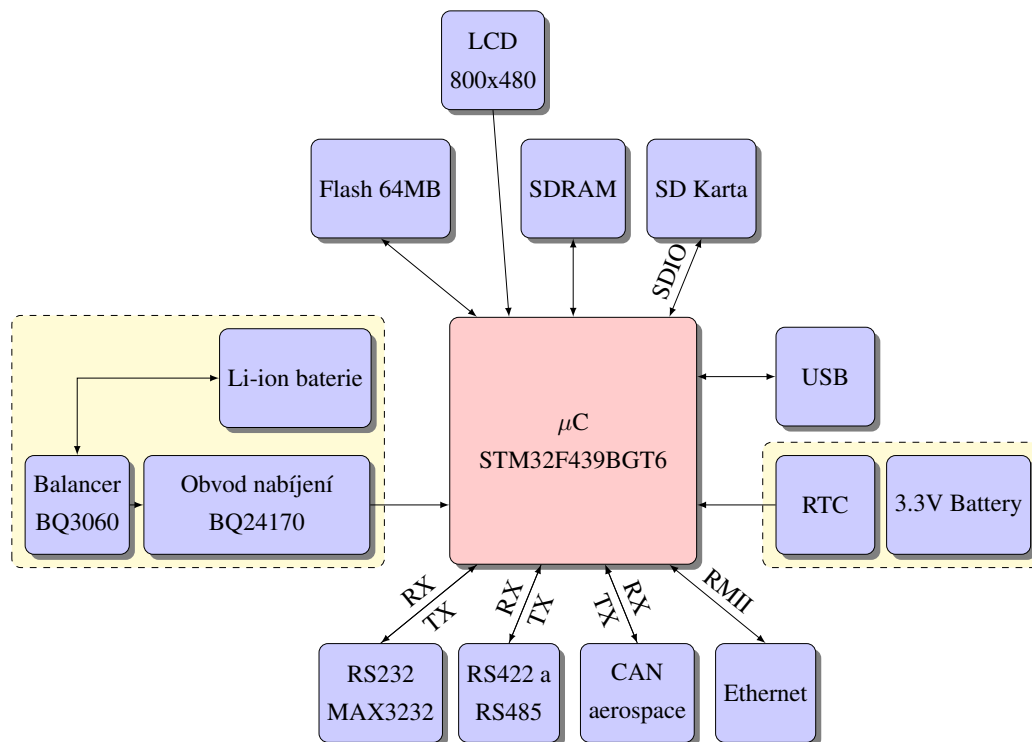


Obrázek 4.1: Koncept zařízení

ností Riverdi. Displej má rozlišení 800×480 pixelů a podporuje barevnou hloubku true-color, obsahující přes 16 miliónů různých barev. Vybraná verze displeje je osazena dotykovou kapacitní vrstvou s integrovaným řadičem, který komunikuje s mikrokontrolérem pomocí sběrnice I²C.

Data, odesílaná do displeje, musí být někde uložena a s dostatečnou rychlostí přeposílána. Aby byly parametry displeje použity v plném rozsahu, musí paměť mít dostatečnou velikost. Uvažujeme-li, že počet obrazových bodů displeje je 384000 a 8 bitů na barvu (32 bitů včetně průhlednosti - formát ARGB), bude potřeba minimálně 1536000 bitů paměti. Rychlost přenosu dat musí být maximální možná. Z toho důvodu byla vybrána paměť s 32bitovým paralelním rozhraním pro přenos dat. Paměť dokáže tedy přenést najednou 32 bitů dat. Těmto a dalším parametrům vyhovovala nejlépe paměť IS42S32400F-7TLI. Jedná se o paměť typu SDRAM, která je přímo připojitelná na vybraný mikrokontroler pomocí FMC periferie.

Centrem komunikace a nejdůležitějším komponentem celého návrhu byl mikrokontrolér. Od počátku návrhu bylo jasné, že bude použit mikrokontrolér postavený na jádře ARM od společnosti STMicroelectronics. Tyto procesory poskytují dostatečnou výpočetní rychlost i pro složité operace. Zároveň je k jádru připojeno velké množství periférií, které se dají použít pro generování signálů, řízení komunikace po sběrnících či k odesílání dat do podpůrných integrovaných obvodů. Některé integrované obvody z této řady obsahují integrovaný řadič externí paměti (FMC periferie), na který se dá připojit paměť různých



Obrázek 4.2: Blokové schéma záznamové jednotky

typů a také periférii sloužící pro odesílání dat do displeje (periferie LTDC). Vybraný mikrokontrolér v sobě musí také obsahovat periferie pro komunikaci po vybraných sběrnicích, periferie pro odesílání dat do SD karty, atd. Těmto a dalším parametrům nejlépe vyhovoval mikrokontrolér STM32F439BGT6 v pouzdře LQFP208, který má navíc dostatek vstupně-výstupních pinů.

V zadání práce bylo požadováno, aby jednotka byla vybavena možností komunikace po sériové sběrnici RS232. Tato jednoduchá sběrnice je teoreticky rozebrána v kapitole 3, v sekci 3.1. Mikrokontroler je vybaven periférií USART, která se stará o správnou konfiguraci linkové vrstvy komunikace. Korektní implementace fyzické vrstvy tohoto protokolu musí být dosaženo použitím správného budiče. Těchto budičů, splňujících normu, je velké množství, proto byl budič sběrnice vybírán převážně podle jeho proudové spotřeby v aktivním režimu. Vybrán byl obvod max3232, který kromě spotřeby v řádu desítek mikroampér obsahuje také nábojovou pumpu. Odpadá tedy nutnost implementace symetrického zdroje napětí.

Data přijatá z množství sběrnic musí být kromě zobrazování také uložena na některé vyjímatelné paměťové zařízení. Byla zvolena SD karta a to kvůli přítomnosti SDIO periferie v mikrokontroleru pro komunikaci s ní a také díky velké variabilitě a snadnému připojení k počítači.

V požadavcích na tuto práci bylo také definováno, že zařízení musí být přenositelné. Z toho důvodu musel být vybrán zdroj, který by zajistil trvalé napájení obvodu i při absenci externího napájení. Vybrány byly lithium-iontové bateriové články s kapacitou minimálně



Obrázek 4.3: Vize finální podoby jednotky

5000 mAh. Tento typ má velkou hustotu energie na objem baterie a proto se často používá. Vybrány byly baterie od společnosti Samsung s kapacitou jednoho článku 2600 mAh [2]. Tento typ baterie je náchylný na překročení hraniční teploty a na správný způsob nabíjení. Z toho důvodu musel být také implementován obvod řízení nabíjení, správy a ochrany baterie. Více informací k dispozici v kapitole 6 a v příloze B na straně 1 a 2.

Kapitola 5

Mechanická část jednotky

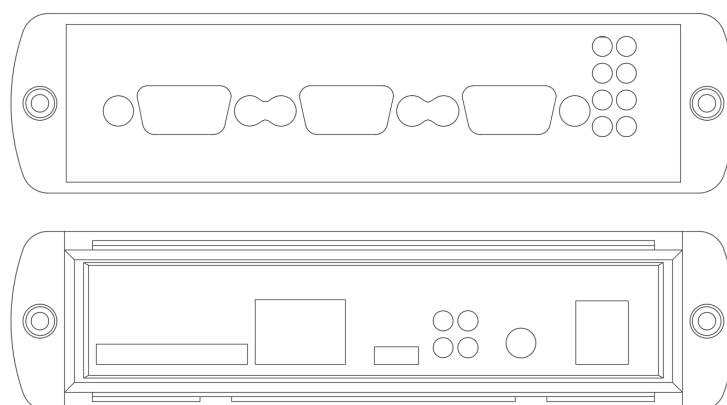
Součástí této diplomové práce bylo navrhnout mechanické zapouzdření celé jednotky. Navržený obal bude v sobě obsahovat všechny hlavní části projektu, kterými jsou deska plošných spojů s osazenými komponenty, pouzdro baterie a LCD displej. Z mechanického pouzdra musí být přístupné konektory tak, aby uživatel zařízení mohl ke konektorům volně přistupovat, bez nutnosti demontáže pouzdra. Vybrána byla krabička Alubos ABPH 1300-0200 od společnosti Bopla s bočnicemi ABD a ABM. Jedná se tedy o pouzdro s nesymetrickými bočními kryty. Důvodem byla nutnost ochrany pravé strany s vypínačem a náchylnějšími konektory před nechtěným mechanickým poškozením při manipulaci se zařízením.

Vnitřní část mechanického pouzdra obsahuje lyžiny, umístěné po delších stranách, které byly použity pro umístění desky plošných spojů. Z důvodu asymetrických bočních uzávěrů, které obsahují vystupující části, byl půdorys plošného spoje navržen tak, aby jeho výstupky přesně zapadaly do bočních dílů. Obdobným způsobem byl v desce plošných spojů vyfrézován otvor obdélníkového tvaru, do kterého bude umístěna a ukotvena baterie. Z těchto důvodů byl vytvořen přesný trojrozměrný model krabičky, ze kterého by bylo možné odvodit tvar desky plošných spojů. Orientačně okótovaný výkres je k nahlédnutí v příloze A. Podklady ke kresbě 3D modelu byly získány z dokumentace poskytované výrobcem [3].

Poté, co byla vyrobena deska plošných spojů a osazena konektory, byla za pomoci trojrozměrného modelu konektorů a krabičky odvozena pozice a tvar otvorů konektorů a LED diod vystupujících z pouzdra. Výkres obou bočních dílů je k dispozici v obrázku 5.2. Části pouzdra byly frézovány na CNC frézovacím stroji ve firmě Třeštík.



Obrázek 5.1: Mechanické zapouzdření jednotky s vyfrézovanými otvory v bočnicích a s namontovaným displejem



Obrázek 5.2: Výkres otvorů pro konektory v pouzdrú jednotky

Kapitola 6

Elektrická část jednotky

K vytvoření elektrického schématu diplomové práce byl použit software OrCAD Capture od společnosti Cadence. Program umožňuje přehledně uspořádat jednotlivé části projektu do ucelených stránek. Každá strana obsahuje tu část celého zapojení, která spolu tematicky souvisí. Schéma práce je k dispozici v příloze B. Při návrhu zařízení byly použity knihovny přiložené výrobcem programu. Dodatečné součástky, které v základní distribuci programu OrCAD nejsou k dispozici, byly dokresleny autorem této práce (včetně odpovídajících pouzder) a jsou umístěny na přiloženém CD. V tabulce 6.1 je uveden krátký popis obsahu jednotlivých souborů.

Deska plošných spojů byla navržena v programu OrCAD PCB od společnosti Cadence. Vzdálenost spojů a součástek od okraje plošného spoje byla zvolena 80 milů (1 mil = 2.54×10^{-2} mm). Vzdálenost musí být dostatečně velká na to, aby nedošlo k poškození rozlité mědi a spojů u kraje plošného spoje při frézování finálního tvaru.

Z konceptu zařízení plyne zvýšená náročnost návrhu desky plošných spojů z důvodu velkého počtu propojení. Byla proto zvolena čtyřvrstvá deska plošných spojů. První a čtvrtá vrstva plošného spoje obsahuje signálové spoje. Druhá vrstva je dedikovaná pro rozlitou měď signálu GND. Napájení celé desky plošných spojů je rozvedeno převážně ve vrstvě číslo tři. Použití čtyřvrstvého plošného spoje s vnitřní vrstvou země snižuje dále vyzařování a při správném návrhu spojů minimalizuje proudové smyčky [30]. Při designu plošného spoje bylo postupováno podle dokumentu od Ing. Víta Záhavy, CSc, viz [30].

6.1 Zdrojová část

Základní částí zařízení je úprava napájení a transformace vstupního napětí na potřebnou úroveň. Všechny komponenty digitální části, vyjma správy nabíjení, byly voleny tak, aby jejich napájecí napětí bylo standardních 3.3 V nebo 5 V. Velikost vstupního napájecího napětí, které napájí celou desku plošných spojů včetně nabíjecích obvodů, je omezena horní a dolní hranicí. Spodní hranice napětí je definována integrovaným obvodem bq24170 jako napětí baterie v nabitém stavu (3×4.2 V) plus 0.6 V. Horní limit 17 V je tvořen maximálním vstupním napětím měničů tps62140a. Nižší napětí, než je povoleno, bude mít

Název souboru	Obsah souboru
1 Battery watch	Ochrana první úrovně a balancování napětí baterií
2 Charger	Obvod obstarávající nabíjení baterie a ochranu druhé úrovně
3 Power	Filtrace vstupního napájení, spínání, zdroje napětí pro digitální část a zdroj proudu pro podsvit displeje
4 Input pwr	Blokovací kondenzátory, filtrace analogové části a baterie obvodu reálného času
5 MCU, SDRAM, Periph	Hlavní procesor, obrazová paměť a podpůrné periferie
6 Ethernet	řadič ethernetu, konektor a izolační transformátor
7 Display	Výstup LTDC řadiče pro displej, konektor pro dotykovou kapacitní vrstvu
8 RS232, RS485, CAN	Výstupní sběrnice RS232, RS485, CAN a jejich příslušné sběrnice a USB konektor. Dokument navíc obsahuje spínání a hlídání distribuce napájení

Tabulka 6.1: Popis obsahu souborů obsahujících elektrické schéma zařízení

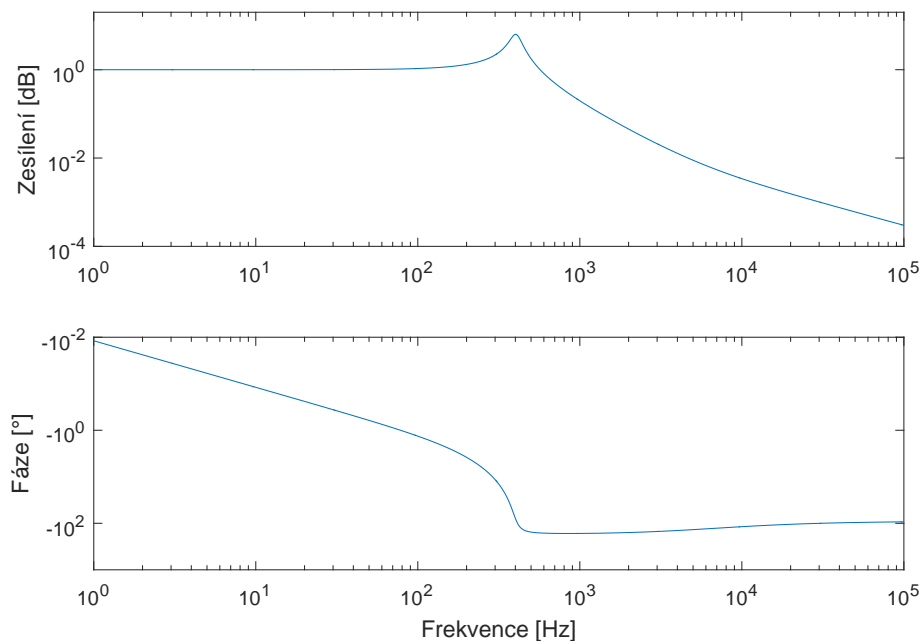
za následek vyhlášení chyby a uzavření nabíjecích a vybíjecích FET tranzistorů v nabíjecí části baterie, popřípadě může dočasně nastat přepnutí zařízení do napájení z baterie. Měníče budou vstupní napětí konvertovat až do hodnoty nastavené pomocí děliče napětí na vstupu zpětné vazby. Horní limit je omezen transilem na 17 V. Ochrana proti přepólování je zajištěna unipolárním tranzistorem typu p-mosfet s nízkým $R_{DS(ON)}$.

Na vstupu hlavního napájení byla umístěna tavná pojistka s hodnotou 4 ampéry, která dále omezuje možnost zkratu. Za pojistkou byl umístěn filtrační pí člen, který filtruje vstupní napájení a brání vstupu vyšších frekvencí do zařízení. Bodeho graf dolní propusti je k dispozici v obrázku 6.1. Kondenzátory, použité ve filtru, jsou elektrolytické a mají hodnotu 470 μF a toroidní cívka, umístěná mezi nimi má velikost 47 μH . Před samotným filtrem byla umístěna tlumící cívka malé hodnoty, která snižuje velikost proudového rázu, vznikajícího po připojení zařízení k napájení.

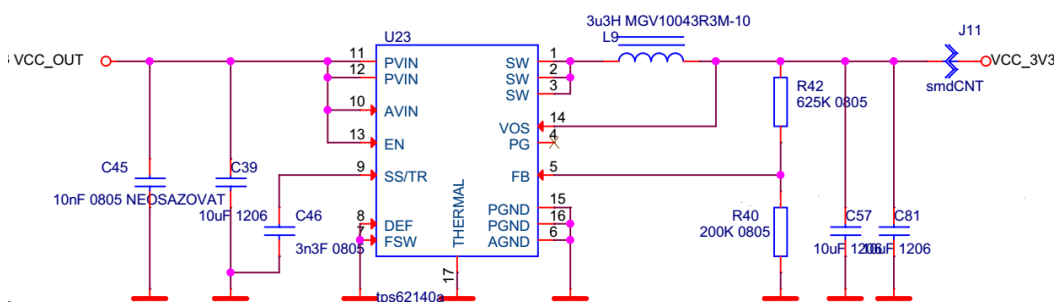
V příloze B na listu 3/8 jsou zapojeny 3.3 V a 5 V měniče napětí potřebné pro napájení digitální části a přidružených periférií. 3.3 V měnič napětí je uveden i na obrázku 6.2. Vstupní svorky obou měničů byly opatřeny filtračními kondenzátory, obdobně tak i svorky výstupní. Nastavení hodnoty výstupního napětí se provádí připojením děliče napětí na pin zpětné vazby. Hodnotu odporů udává vzorec uvedený v dokumentaci na straně 14 [24]

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right),$$

kde R_1 a R_2 jsou odpory zpětné vazby, V_{out} je požadované výstupní napětí a V_{ref} je vnitřní napětí regulátoru sloužícího k porovnání. Velikost V_{ref} je 0.8 V. Hodnota odporů se může



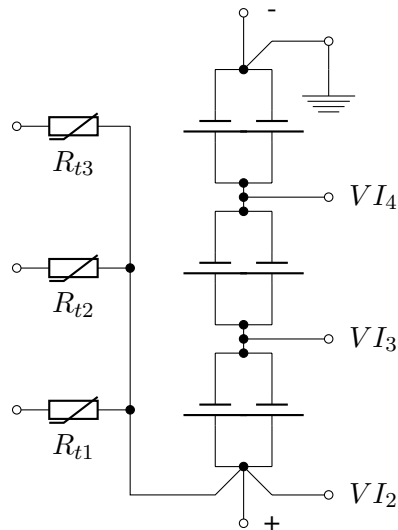
Obrázek 6.1: Bodeho graf vstupního filtru



Obrázek 6.2: Zapojení 3.3 V měniče napětí

pohybovat v horních mezích dovolených dokumentací 6.1, protože obvody, tvořící zátěž, mají dostatečnou proudovou spotřebu a není potřeba používat odpory nižších hodnot, které by sloužily jako předzátěž. Součástky zdroje byly umístěny na desku plošných spojů přibližně podle doporučeného rozmístění výrobce.

Proudový zdroj TPS61165 pro napájení LED diod podsvitu byl nastaven podle doporučené konfigurace uvedené v dokumentaci výrobce [27]. Zpětnovazební odpor zdroje byl vybrán podle vzorce uvedeného v dokumentaci [24] na straně 17 tak, aby proud LED diodami podsvitu byl 180 mA. Maximální hodnota proudu je dána výrobcem použitého displeje [16]. Vypočtená hodnota odporu je 1.1Ω . Ve zpětné vazbě bylo použito paralelního zapojení odporů 1.2 a 15 Ω z řady E24. Odpory s přesností 1 % byly vybrány, protože malá změna hodnoty odporu má za následek velkou změnu protékajícího proudu. Hodnota proudu a tím i intenzita podsvitu displeje, je ovládána z mikroprocesoru PWM signálem.



Obrázek 6.3: Schéma zapojení bateriového packu

6.2 Baterie a řízení nabíjení

Zadáním této diplomové práce bylo navrhnout součást zařízení, která by se starala o nabíjení a balancování článků baterií. Potřebné minimální napětí baterie bylo určeno jako minimální vstupní napětí 5 V měniče, což je podle dokumentace taktéž 5 V [24]. Maximální napětí bateriového packu, které je omezeno obvodem nabíjení a balancování, bylo určeno na 16.8 V. Jak je uvedeno v kapitole 4, byly vybrány baterie typu li-ion a jmenovité napětí celého packu přibližně 12 V. Baterie založené na technologii li-ion mají typicky hodnotu jmenovitého napětí 3.7 V [2]. Baterie s grafitovou anodou mají konečné nabíjecí napětí (maximální povolené napětí) 4.2 V a konečné vybíjecí napětí (minimální povolené napětí) 2.75 V. V kapitole 4 byla také zdefinována minimální kapacita baterie 5000 mAh. Z těchto údajů bylo odvozeno zapojení bateriového packu a je uvedeno v obrázku 6.3.

Baterie byly zapojeny tři v sérii po dvou paralelně. Z kontaktů mezi bateriemi byly vyvedeny vodiče VI_2 , VI_3 a VI_4 , sloužící k měření napětí na jednotlivých člancích a k případnému balancování jejich napětí, viz dále. Tyto kontakty jsou k baterii zapojeny technikou kelvinova zapojení. Kelvinovo zapojení minimalizuje úbytek napětí na přívodních vodičích a snižuje tak chybu měření. Z baterie byl vyveden vodič sloužící jako lokální zem pro obvod balancování napětí. Na každé dvojici byl umístěn NTC termistor 103AT-4-80025, který je doporučen v dokumentaci výrobce obvodu. Dva krajní termistory jsou připojeny k hlídacím obvodům první úrovně a prostřední k obvodu nabíjení a hlídání úrovně druhé.

Ze schématu 6.3 je patrné, že napětí baterie se bude jmenovitě pohybovat na intervalu 8.25 až 12.6 volt, což splňuje podmínky vstupního napětí měničů a nabíjecího obvodu. Ze schématu lze také odvodit očekávanou kapacitu packu na 5200 mAh při standardních okolních podmínkách. Maximální vybíjecí proud baterie pak může být 10 A.

Při nabíjení baterie dochází ke zvýšení teploty, které je závislé hlavně na nabíjecím

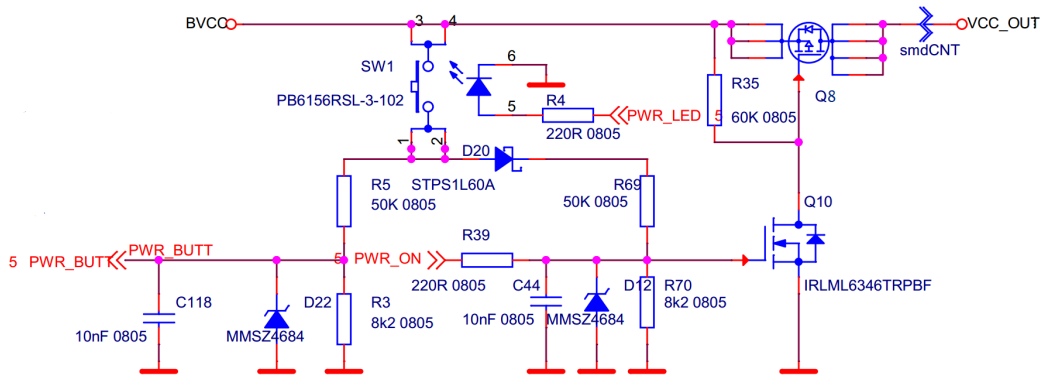
proudu baterie a okolních podmínkách. Dokumentace baterie uvádí přípustný rozsah teplot, kterých smí baterie dosáhnout (0°C až 45°C) [2]. Při překročení povoleného rozsahu teplot může dojít k poškození baterie, v extrémních případech i k uvolnění pláště baterie, k úniku vnitřního elektrolytu a ke vznícení. Bylo tedy nutno navrhnout obvod, který by hlídal teplotu baterie a v závislosti na teplotě upravoval nabíjecí a vybíjecí proud. Mezi další parametry kontrolované obvodem jsou napětí jednotlivých článků, vybíjecí a nabíjecí proud, atd. Nabíjení baterie je zajištěno obvodem bq24170. Integrovaný obvod bq24170 zajišťuje správný průběh nabíjení. Po zapojení nabíjecího adaptéru dojde k přepnutí součástky do módu *precharge*, kdy se baterie nabíjí na minimální hodnotu napětí. Po překročení hraniční hodnoty, která je definována v dokumentaci se přepne obvod do módu *constant current*. V tomto módu nabíjí obvod baterie konstantním proudem a to do chvíle, než baterie dosáhne hraničního napětí. Poslední fáze nabíjení baterie se nazývá *constant voltage*. Fáze konstantního napětí udržuje napětí na baterii a završuje nabíjecí cyklus. Obvod slouží také jako ochrana baterie druhého stupně monitorováním teploty baterie a proudu procházejícím oběma směry. V případě, že obvod eviduje překročení hraničních hodnot, vypne tranzistory *Q2* a *Q4* a vyhlásí poruchu a to signalizací LED diodou označenou na pouzdru jednotky. Navržený obvod zároveň kompenzuje za pomoci baterie ztrátu napájecího napětí přepínáním tranzistoru *Q11* a nedochází tak ke ztrátě dat nebo k restartu mikrokontroléru. Detailní zapojení obvodu je k dispozici v příloze B na straně 2/8 dokumentace. Pomocí napěťových děliček byl obvod nastaven na nabíjecí proud 500 mA a napětí 12.6 V. Při podkročení napětí baterie pod hranici 3 V dojde k odpojení baterie a vypnutí celého zařízení, aby nedošlo k zvýšenému namáhání baterií.

Na straně 1/8 dokumentace v příloze B je zakresleno elektrické schéma obvodu monitoringu a balancování jednotlivých článků. Obvod bq3060 měří napětí na jednotlivých článcích, porovnává jejich napětí s ostatními články a pomocí spínání tranzistorů *Q7* a *Q9* je vyvažuje [26]. Obvod funguje také jako ochrana baterie první úrovně. K tomu používá dvou NTC termistorů a $10\text{ m}\Omega$ odporu pro měření procházejícího proudu. Odpor je na desce plošného spoje zapojen v kelvinově zapojení.

Obvod bq3060 komunikuje s mikrokontrolérem po sběrnici SMBus, bez použití Alert pinu, který je ve sběrnici volitelný a obvod ho nepoužívá. Součástka v pravidelných, nastavitelných intervalech měří výše zmíněné parametry, ze kterých počítá aktuální stav baterie. Příkladem měřených hodnot je okamžitá kapacita baterie v miliampérhodinách, nabíjecí a vybíjecí proud, doba do úplného vybití a doba do plného nabití.

6.3 Mikrokontrolér

Před částí věnovanou mikrokontroléru je nutno zmínit způsob zapínání celého zařízení. Zapínání a vypínání zařízení bylo nutné vyřešit elektricky. Důvodem, proč nebylo použito jednoduché mechanické zapojení je přítomnost paměťového zařízení. Pokud by bylo zařízení vypnuto v průběhu komunikace před odebráním zařízení, může dojít k poruše či ztrátě



Obrázek 6.4: Schéma obvodu pro spínání zařízení

dat. Vypínání zařízení pomocí procesoru a odebrání karty je snadno zajištěno softwarově. Schéma spínače je k dispozici v příloze B v listu 3/8 a v obrázku 6.4.

Dojde-li ke stisku spínače *SW1*, sepne se tranzistor *Q10*. Ten následně otevře hlavní výkonový p-mosfet tranzistor *Q8* s nízkým $R_{DS(ON)}$. Otevření tranzistoru *Q8* má za následek zapnutí měničů napětí, zmíněných na straně 21 a k zapnutí mikrokontroléru. Ten ihned po inicializaci potřebných periférií nastaví hodnotu pinu *PWR_ON* na log. 1. Mikrokontrolér tak ovládá své vlastní napájení. Ze spínače *SW1* vede signál *PWR_BUTT* do mikroprocesoru. Ten následně může detekovat stisk. Vstup a výstup procesoru je připojen v okolí napětí vyššího, než je přípustné vstupní napětí procesoru, proto jsou oba vodiče na desce plošných spojů chráněny zenerovou diodou proti přepětí.

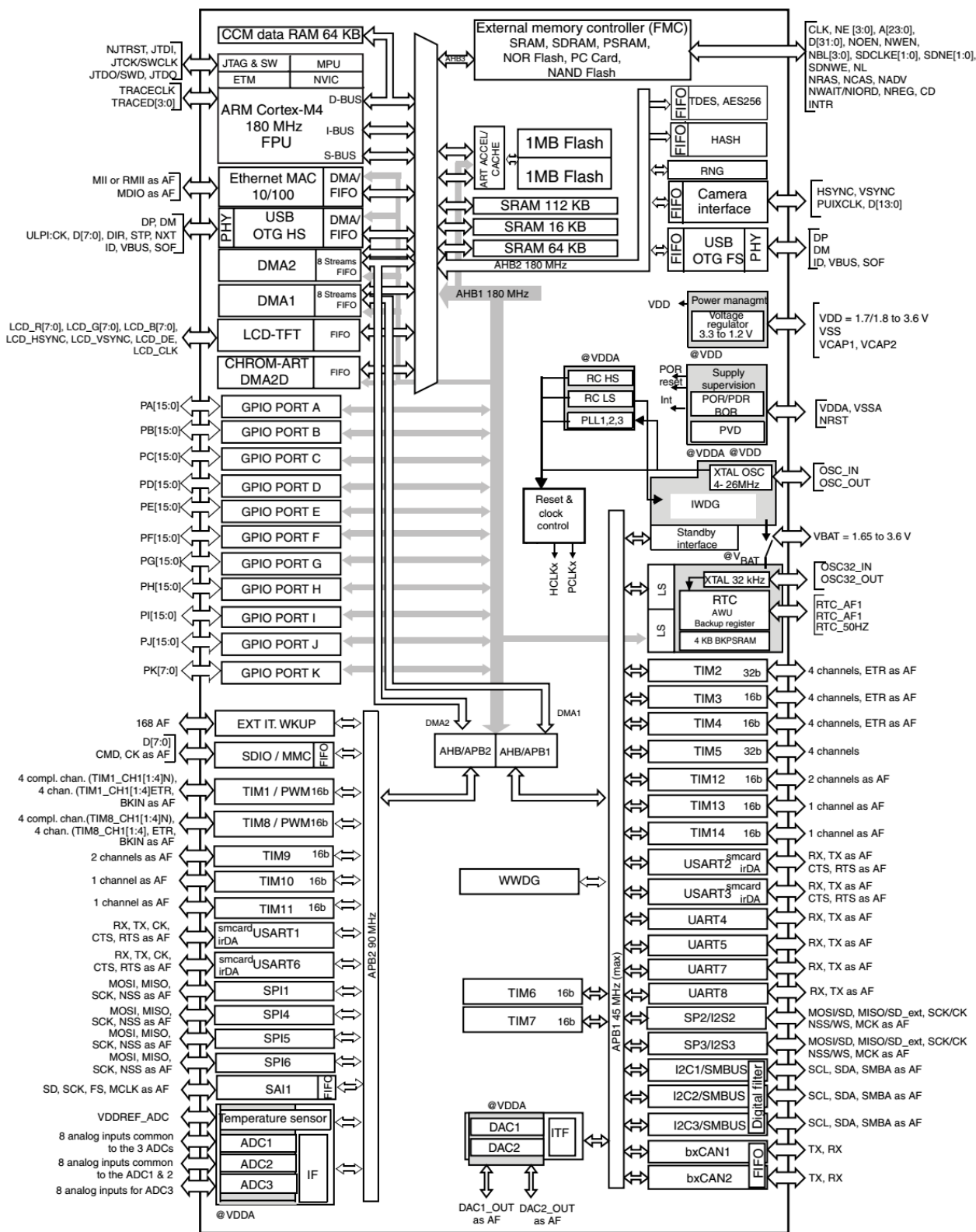
Pro tuto práci byl vybrán procesor STM32F439BGT6 od společnosti STMicroelectronics. Jedná se o procesor založený na jádru Cortex-M4, uloženého v pouzdře LQFP208.

Mikrokontrolér je vybaven interní 1MB flash pamětí a 256 KB pamětí typu RAM. Procesor může být taktován na frekvenci 180MHz, při níž má výkon 225 DMIPS (1.25 DMIPS/MHz). Důležitým parametrem pro výběr mikrokontroléru byla přítomnost LTDC periferie, což je integrovaný řadič displeje a FMC, která obsluhuje externí paměť. Detailní schéma periférií mikrokontroléru je k dispozici v obrázku 6.5. Pro řádné splnění zadání diplomové práce byly přidány požadavky na přítomnost periferie USART, CAN a Ethernet. Těmto a dalším parametrům výběru vyhovoval nejlépe výše zmíněný mikrokontroler.

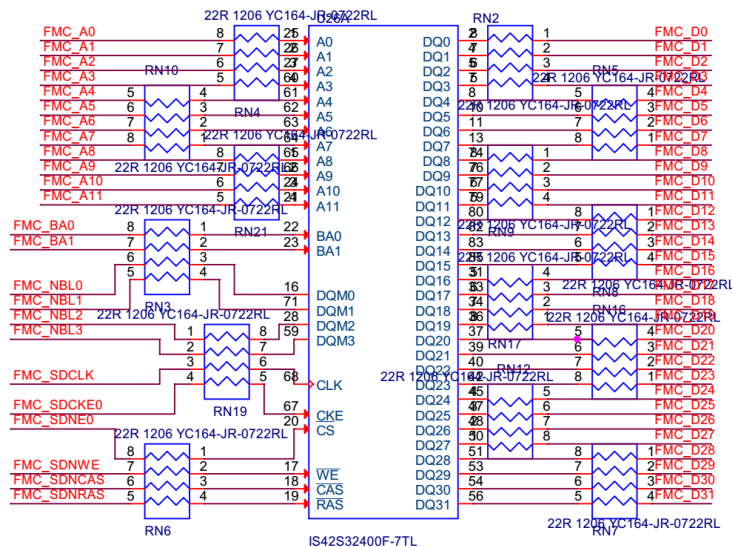
K procesoru byl připojen přesný externí 26 MHz krystal, který ve spojení s integrovanou frekvenční násobičkou zajišťuje 180 MHz taktovací hodinový signál. 32.768 kHz krystal *Y1* je použit pro RTC, která bude zajišťovat korektní časovou značku pro každou přijatou a uloženou hodnotu do paměti. V obou případech byly hodnoty přidružených kondenzátorů spočteny pomocí příručky AN2867 Application note poskytované firmou STMicroelectronics [20]. V sekci 3.3 příručky je uveden vzorec

$$C_L = \frac{C_{L1} \times C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_s,$$

kde $C_L = 16$ pF je kapacita zátěže použitého krystalu, C_s je parazitní kapacita, jejíž hodnota byla odhadnuta na 5 pF + 7 pF maximální parazitní kapacita krystalu. Z tohoto



Obrázek 6.5: Blokové schéma použitého procesoru STM32F439 [19]



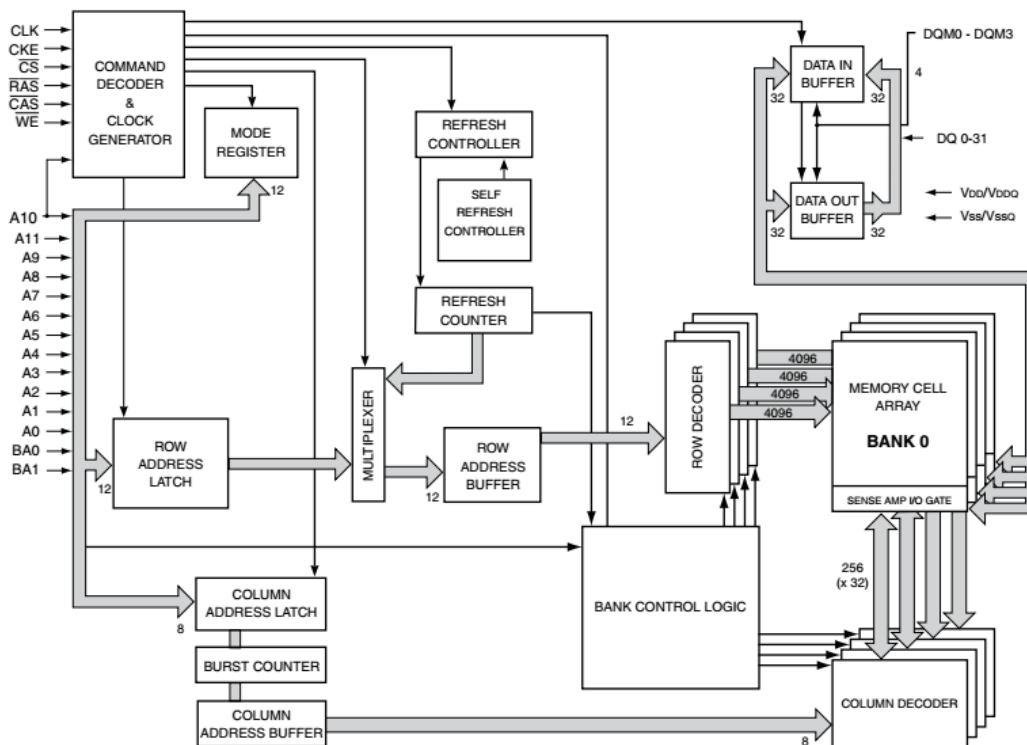
Obrázek 6.6: Schéma zapojení paměti SDRAM

vzorce byla spočtena hodnota 6,8 pF obou kondenzátorů. V případě krystalu pro obvod reálného času byla hodnota kondenzátorů 22 pF spočtena obdobným způsobem ze znalosti kapacity zátěže 12,5 pF a parazitní kapacita 1,35 pF. Detailní schéma mikrokontroléru a krystalů je k dispozici v příloze B, list 5/8 v sekci *Mikrokontrolér*. .5 Mikrokontrolér STM32F439BGT6 má vyvedených 208 externích pinů, z nichž 168 je plně uživatelsky volitelných. Většina pinů je v základu připojena k periférii GPIO. Každý výstupní a vstupní pin může být navíc připojen k některé z integrovaných periférií, čímž se změní funkce pinu. Usnadnění hardwarového návrhu může být dosaženo použitím software STM32CubeMX [21], který je zdarma ke stažení poskytován společností STMicroelectronics na jejich webových stránkách.

6.4 Paměť pro obrazová data

Zařízení obsahuje displej o rozlišení 800×480 pixelů, který podporuje true color barevnou hloubku obsahující 2^{24} barev. Pro použití plné barevné hloubky je zapotřebí 8bitů na kanál barvy plus 8 bitů na kanál definující průhlednost (tzv. alpha). Předcházející výpočet udává minimální velikost externí paměti jako 1536000 bajtů dat a to v případě, že v řadiči nebude implementována možnost použití dvou vrstev a jejich prolínání. Z toho důvodu byla implementována externí, 128 Mb SDRAM paměť. Paměť je rozdělena na $1 \text{ Mb} \times 32 \text{ bit}$, a obsahuje celkem 4 banky. Do této paměti mohou být nahrány obě vrstvy plus pět virtuálních obrazovek pro každou vrstvu. Velikost paměti je tedy dostatečná pro správný chod displeje. Schéma zapojení paměti včetně detailního připojení k mikrokontroléru je k dispozici v příloze B, list dokumentace 5/8.

Blokové schéma SDRAM paměti se nachází na obrázku 6.7. Komunikace procesoru s pamětí probíhá pomocí dvanácti adresních pinů A0 až A11, které jsou přímo ovládány řadičem paměti FMC v mikrokontroléru. Vstupně výstupní piny DQ0 až DQ31 obsahují



Obrázek 6.7: Blokové schéma použité paměti [8]

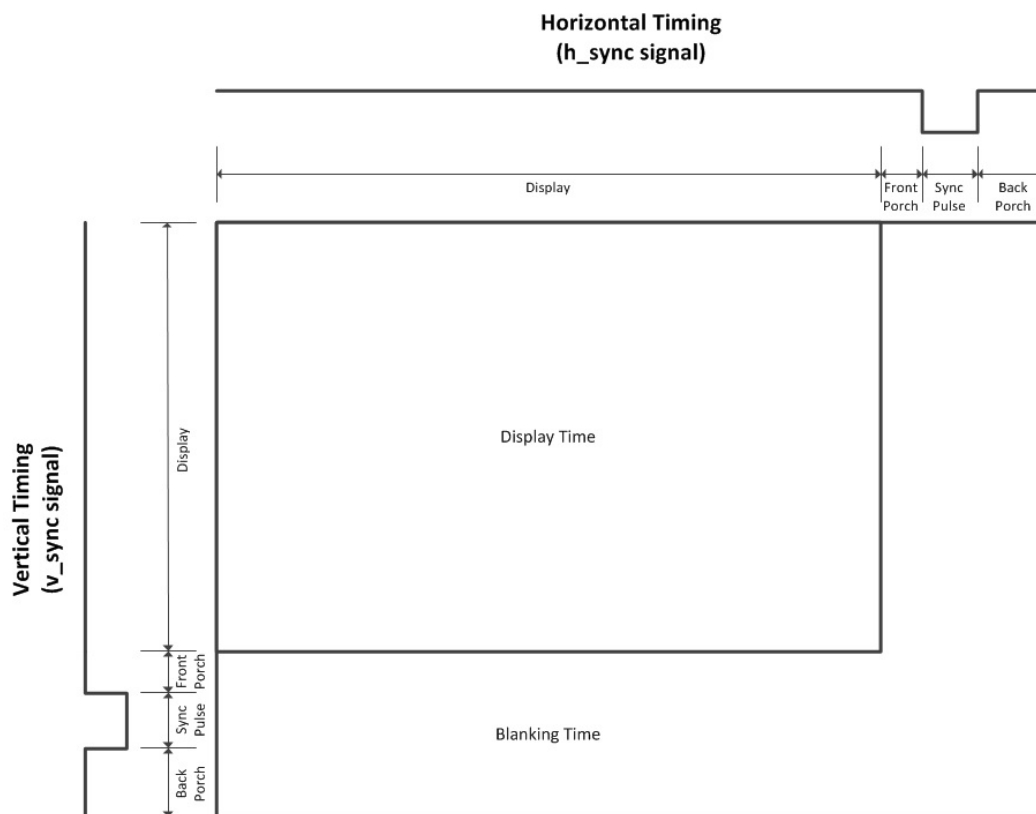
vlastní zapisovaná nebo čtená data. Paměť může s mikrokontrolérem komunikovat i pomocí pouze 16 ti bitů. Rychlost zápisu a čtení dat se pak sníží na polovinu. Protože rozměry displeje vyžadují velký datový tok, byla použita 32 bitová varianta komunikace. Piny CKE, CS, RAS, CAS, WE jsou příkazové piny sloužící k inicializaci, nastavení a ovládání paměti. CLK pin vede hodinový signál pro paměť.

Podle dokumentace při použití CAS latency 3 je maximální rychlost hodinového signálu 100 MHz. FMC periferie je schopna generovat hodinový signál o maximálním kmitočtu rovném polovině své taktovací frekvence (90 MHz). Další parametry použité při inicializaci paměti jsou k dispozici ve zdrojovém souboru init.c, který lze najít na příloženém CD.

Paměť komunikuje s mikrokontrolérem na frekvenci 90 MHz. Z důvodu této vysoké frekvence bylo nutné se při návrhu plošného spoje řídit podle metod návrhu vysokofrekvenčních plošných spojů [23]. Byly použity následující techniky návrhu: minimalizace délky spoje, minimalizace počtu proků, ekvivalence délek spojů, impedanční přizpůsobení, minimalizace přeslechů a minimalizace proudových smyček

6.5 Displej a dotyková vrstva

Mikrokontrolér STM32F439 obsahuje integrovanou periferii LTDC. Tento řadič převádí data z definovaného adresního prostoru na výstupní piny procesoru ve formátu definovaném při inicializaci. Jak bylo zmíněno v sekci 6.4, displej podporuje 24 bitovou



Obrázek 6.8: Diagram popisující základní parametry horizontálního a vertikálního časování [9]

paralelní komunikaci RGB s 8mi bity dat pro každou barvu. Další použité piny jsou CLK, HSYNC a VSYNC. Tyto vývody nesou hodinový signál, kterým se zapisuje barva pixelu z paralelních RGB pinů do vnitřního zásobníku. Signál HSYNC je signál horizontální synchronizace a VSYNC je signál synchronizace vertikální. Poslední důležitý pin je DE data enable, který povoluje nebo zakazuje zápis dat do displeje. Do 50 pinového FPC konektoru dále vede výstup proudového zdroje pro podsvět LED diod. Na druhém 10 pinovém FPC konektoru se nachází řadič dotykové vrstvy, který je k procesoru připojen sběrnici I²C a pinem použitým pro přerušení činnosti procesoru (tzv. interrupt).

Pro správné zobrazení dat na displeji musí být splněny parametry časování dané výrobcem displeje [16]. Výrobce v dokumentaci používá nestandardní označení parametru časování horizontal back porch, které v poskytnuté dokumentaci označuje jako horizontal blanking. Pojmem horizontal blanking se standardně označuje interval, který je součtem front porch, horizontal pulse width a horizontal back porch. Parametry časování displeje použité v této diplomové práci jsou uvedeny v tabulce 6.2. Řídící signály displeje jsou aktivní v log. 1 a zápis dat probíhá na sestupnou hranu hodinového signálu. Frekvence hodinového signálu DCLK byla volena tak, aby výsledná obnovovací frekvence displeje byla přibližně 29 Hz. Kontrola správnosti výpočtu je uvedena v kapitole 8.

Jak bylo naznačeno v kapitole 4, pro komunikaci mezi uživatelem a zařízením byla

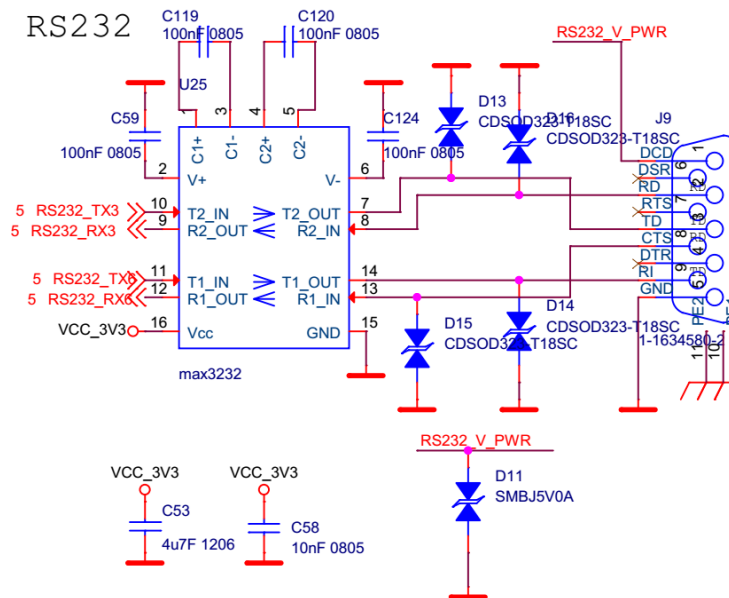
Anglický název	Český název	Hodnota	Jednotka
Data clock (DCLK)	Hodinový signál	16	MHz
Horizontal synchronization width	Šířka horizontálního synchronizačního pulzu	5	DCLK
Horizontal active width	Horizontální šířka aktivní části displeje	800	DCLK
Horizontal front porch	Horizontální přední zápraží	210	DCLK
Horizontal back porch	Horizontální zadní zápraží	41	DCLK
Vertical synchronization width	Šířka vertikálního synchronizačního pulzu	5	HSYNC
Vertical active height	Vertikální aktivní výška	480	HSYNC
Vertical front porch	Vertikální přední zápraží	22	HSYNC
Vertical back porch	Vertikální zadní zápraží	18	HSYNC

Tabulka 6.2: Popis a hodnoty časování displeje použité v této práci

použita kapacitní dotyková vrstva. Dotyková část je umístěna v rámu displeje nad jeho aktivní částí. Dotyková vrstva displeje je řízena integrovaným kontrolérem, který je umístěn na FPC konektoru na spodní straně kostry displeje. Kontrolér FT5406 automaticky zjišťuje přítomnost dotyku s frekvencí 60 Hz (výchozí hodnota). V případě, že dojde k detekci platného dotyku, uloží se souřadnice dotyku do vnitřního registru a signalizuje detekci procesoru pomocí pinu přerušení. Tento pin je v dokumentaci značen `T_INT`. Dotykový řadič displeje [7], stejně jako grafická knihovna `STemWin` [17, str. 1027] podporuje detekci a zpracování více dotyků současně.

6.6 Sběrnice a komunikační rozhraní

V zadání této diplomové práce je požadována implementace rozhraní RS232 po elektrické i softwarové stránce. RS232 je komunikační standard, který v referenčním modelu ISO/OSI představuje pouze fyzickou vrstvu. Definuje tedy pouze způsob přenesení určitého množství bitů. Mikrokontrolér obsahuje periférii USART, která se sama stará o odeslání a příjem bitů z paměti procesoru a to s definovatelnou přenosovou rychlostí, polaritou, atd. Výstup z procesoru má výstupní logické úrovně 0.4 až 2.9 V, což neodpovídá běžným rozsahům napětí tohoto rozhraní. Napětí se pohybuje od -3 do -15 V pro log.1 a 3 do 15 V pro log. 0. Správné logické úrovně je zajištěno integrovaným obvodem max3232 od společnosti Texas Instruments. Obvod je napájen z 3.3 V napěťového měniče a správných logických úrovní je dosaženo integrovanou nábojovou pumpou s přepínanými kondenzátory [25, str. 8]. Obvod max3232 obsahuje převodníky napěťových úrovní pro dvě nezávislé linky USART, proto byly obě linky vyvedeny zároveň. Tím bylo docíleno atypického uspořádání výstupních signálů na konektoru *J9*. Detailní zapojení je k dispozici



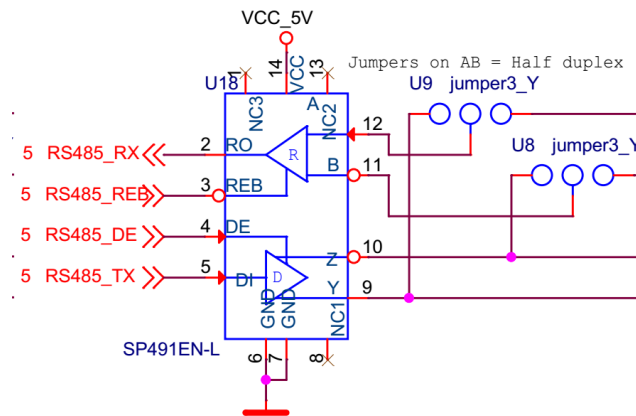
Obrázek 6.9: Schéma zapojení obvodu sériové komunikace s obvodem max3232

v příloze B na straně 8/8 a v obrázku 6.9.

V požadavcích vedoucího práce bylo definováno, aby z konektoru rozhraní RS232 bylo vyvedeno napětí zdroje (popřípadě baterie, je-li externí napájení odpojeno). Spínání distribuce napájení z vnitřního zdroje bylo vyřešeno obvodem FPF2702MX. Obvod zajišťuje elementární ochranu proti spojení nakrátko a proti nežádoucím tepelným účinkům procházejícího proudu. Obvod FPF2702MX byl nastaven tak aby vypnul napájení, dojde-li k odběru proudu většímu než 2 A. V případě detekce poruchy vyhlásí obvod chybový stav. Tento stav může být případně detekován mikrokontrolerem.

Obvod je přímo přístupný uživateli, který na svém těle může nést nebezpečný náboj. Proto byly na piny konektoru připojeny transily, chránící vnitřní elektroniku proti elektrostatickému výboji. Transily jsou připojeny přímo na datový spoj, proto při jejich výběru byl dán důraz na nízkou kapacitu přechodu (typ. 40 pF).

V záznamovém zařízení bylo implementováno rozhraní RS422 a RS485. Rozhraní RS422 se od RS232 liší napětíovými úrovněmi, které se pohybují v rozmezí ± 7 V a použitím dvou diferenciálních párů vodičů. Jedna dvojice diferenciálního páru slouží pro vysílání a druhá pro příjem dat. Tento způsob zapojení dovoluje použití plně duplexní komunikace. Je-li použit pouze jeden pár, zařízení pak může pouze přijímat nebo pouze vysílat. Standard sériové komunikace RS485 byl implementován na stejném převodníku napětíových úrovní jako standard RS422, protože napětíové úrovně obou standardů se překrývají. Obě sběrnice se liší v počtu diferenciálních párů - RS422 používá páry dva a podporuje plně duplexní přenos, zatímco RS485 používá diferenciální pár jeden a podporuje poloovičnický duplex. Použití převodníku napětíových úrovní pro oba standardy je zmíněno [18] v dokumentaci výrobce integrovaného obvodu SP491EN-L. Přepínání mezi oběma režimy je řešeno propojkami. Schéma části obvodu je k dispozici v obrázku 6.10. Ve specifikaci



Obrázek 6.10: Schéma zapojení budiče sběrnice RS422 a RS485

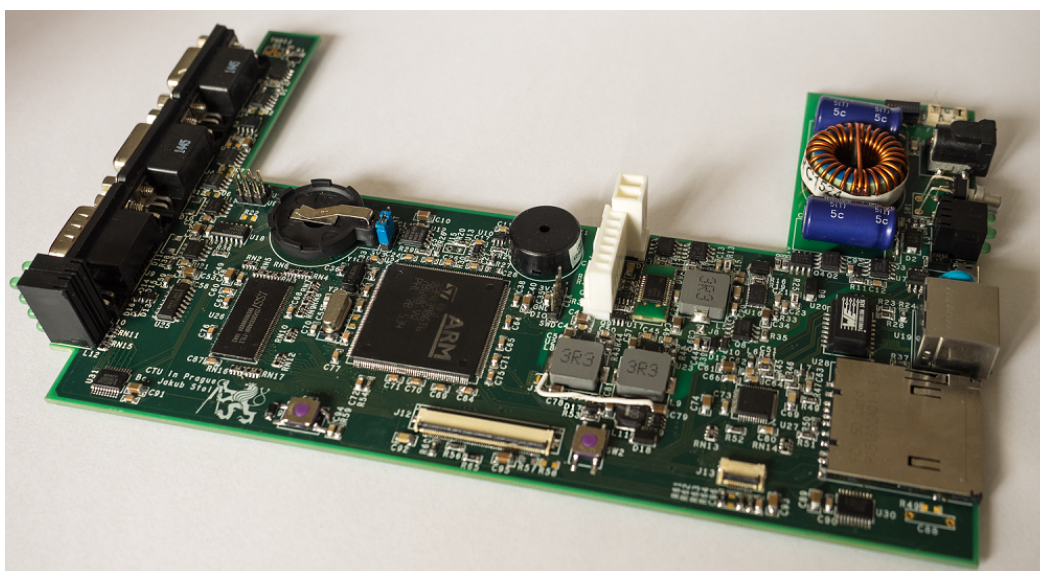
standardu RS485 je definováno zakončení linky odporem $120\ \Omega$. Odpor byl umístěn za přepínač režimu, protože standard RS422 zakončující odpor nevyžaduje. Obdobně, jako v případě RS232, linka byla opatřena ochrannými obvody.

Mikrokontroler STM32F439 obsahuje integrovanou periférii CAN a tato sběrnice byla nad rámec zadání práce implementována do záznamového zařízení použitím budiče od společnosti Microchip. Budič MCP2551 má nezanedbatelnou proudovou spotřebu ($610\ \mu\text{A}$), nachází-li se v aktivním režimu. Nastavením pinu CAN_SPEED do vysoké úrovně dojde ke snížení odebíraného proudu a přepnutí do režimu stand-by. Sběrnice je zakončena $120\ \Omega$ odporem a osazena ochrannými prvky proti přepětí.

Na závěr byla implementována hardwarová podpora pro komunikaci přes ethernet použitím RMI rozhraní mikroprocesoru. Od MII se RMI liší zvýšenou rychlostí komunikace a použitím menšího počtu ovládacích pinů. Ethernetová komunikace je řízena řadičem DP83848I, který je zapojen a nastaven v režimu automatického vyjednávání. Obdobně jako v případě budiče CAN lze snížit proudové nároky ethernetového řadiče nastavením pinu ETH_PWR_DWN do vysoké úrovně. V dokumentaci integrovaného obvodu je doporučeno použití pull-up rezistorů na výstupu řadiče. Tyto odpory byly navíc osazeny filtrem typu dolní propust. Tento filtr tlumí vysoké frekvence pronikající z okolí obvodu do a z ethernetu. Standardní ethernetový konektor RJ45 je připojen k vnitřnímu obvodu přes izolační transformátor, který galvanicky odděluje vnější a vnitřní část zařízení a blokuje případné nepovolené napětíové úrovně přicházející konektorem. Podrobné schéma zapojení ethernetu je k dispozici v příloze B v listu 6/8.

6.7 Interní a externí flash paměť a ostatní podpůrné periférie

Záznamové zařízení bylo osazeno flash pamětí. Integrovaná paměť komunikuje s procesorem po sběrnici SPI plně duplexně. Paměť, rozdělená na 128 sektorů a 2048 subsektorů, má velikost 64 Mb. Flash paměť byla do projektu integrována z důvodu nutnosti uchovat nastavení uživatele tak, aby při příštím zapnutí zařízení toto nastavení mohlo být



Obrázek 6.12: Deska plošných spojů s osazenými komponenty

Kapitola 7

Programová část jednotky

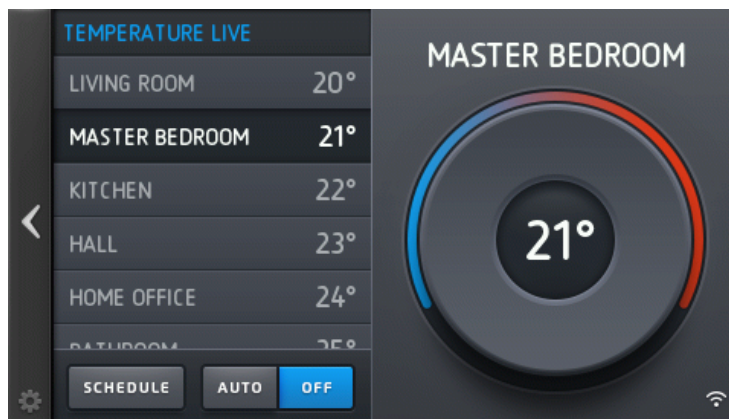
7.1 Dostupné grafické knihovny

Univerzální záznamová jednotka je osazena 7"LCD displejem, na který bude vykreslována nabídka menu a průběh aktuálně dat. Z tohoto důvodu musí být implementována grafická knihovna. Na internetu je dostupná řada komerčních i volně dostupných grafických knihoven. Příkladem komerčního produktu je TouchGFX od společnosti Draupner Graphics A/S. Ukázka vzhledu knihovny je k dispozici na obrázku 7.1.

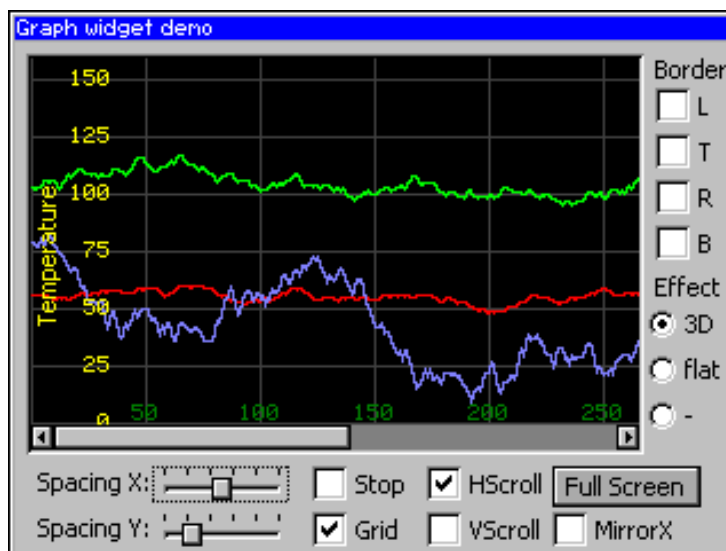
Cena knihovny TouchGFX je 3000 € až 15000 € (81 000 Kč až 400 000Kč) a je tedy nevhodná pro malé, nekomerční projekty.

Druhým příkladem je knihovna μ GFX, která je zdarma k dispozici. Tato knihovna je ve vývoji a v době tvorby této práce neposkytovala prozatím některé potřebné pokročilé prvky grafického uživatelského rozhraní, jako je například graf.

Nakonec byla vybrána grafická knihovna STemWin. Ukázka vzhledu aplikace, naprogramované pomocí této knihovny, je k dispozici v obrázku 7.2. Jedná se o knihovnu vyvinutou společností SEGGER Microcontroller GmbH, která byla uvolněna pro použití na mikrokontrolérech společnosti STMicroelectronics. Knihovna poskytuje velké množství prvků uživatelského rozhraní, označované jako widget. Na webové stránce výrobce



Obrázek 7.1: Grafická knihovna TouchGFX [28]



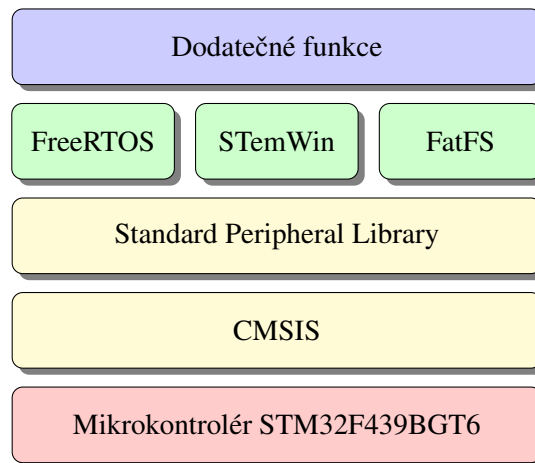
Obrázek 7.2: Příklad uživatelského rozhraní STemWin [12]

je také k dispozici řada demoverzí a ukázkových kódů, pro usnadnění implementace této knihovny na různé mikrokontrolery a to včetně mikrokontroléru řady STM32F4, který je použit v této práci.

7.2 Základní struktura a použité knihovny

Software pro mikrokontroler STM32F439 byl napsán ve vývojovém prostředí Atollic TruStudio od společnosti Atollic a to ve verzi 5.4.2. Tato verze poskytuje základní nástroje pro tvorbu kódu a jeho případné debugování, je-li správně připojen platný debugger. Prostředí je zdarma poskytováno ve verzi lite pro širokou veřejnost a od verze 5.2 není omezena délka kódu.

Nejprve byla definována cílová struktura celého projektu, viz obrázek 7.4. Celý projekt byl rozdělen na několik vrstev, které byly nad sebou vrstveny. První vrstva, označená mikrokontrolér STM32F439BGT6, je hardwarová vrstva celého projektu, představovaná v této části primárně samotným procesorem. Mikroprocesor obsahuje sadu registrů, s příslušnými adresami. Pro zjednodušení čtení a zápisu do registrů byla vyvinuta sada knihoven CMSIS. Tato abstrakční vrstva vyvinutá společností ARM obsahuje sadu definicí jmen jednotlivých registrů s přiřazenými adresami a hodnotami. Tato samotná knihovna je postačující pro elementární práci s použitým mikrokontrolérem. Programování kódu je nicméně obtížné a stále velmi nepřehledné, z toho důvodu byla vyvinuta sada knihoven označená Standard peripheral library. Tato knihovna obsahuje elementární funkce příslušné každé konkrétní periférii. Příkladem takové funkce je změna výstupní logické úrovně hodnoty pinu nebo zapnutí hodinového taktu vedoucí do periférie procesoru. V době tvorby této práce jsou intenzivně vyvíjeny nové knihovny označované jako HAL (Hardware abstraction layer), které jsou i preferovány společností STMicroelectronics. Zároveň software



Obrázek 7.3: Struktura softwarové části projektu

STM32CubeMX, zmíněný v kapitole 6, podporuje export elementární inicializace periférií pomocí knihoven HAL do mnoha vývojových prostředí, včetně použitého Atollic Truostudio. V době tvorby tohoto projektu obsahovaly knihovny HAL stále značné množství chyb a bugů, převážně ve složitějších perifériích a tak byly použity složitější knihovny Standard Peripheral Library. Dále byly implementovány knihovny uživatele Tilen Majerle [11], které usnadňují komunikaci s některými perifériemi mikrokontroléru. Tyto knihovny byly použity v komunikaci s periférií I²C a USART.

Nad vrstvou Standard Peripheral Library byla umístěna vrstva obsahující knihovny třetí strany, které jsou nezávislé na hardwaru. Ze zadání projektu byla již v první fázi návrhu patrna nutnost použití jednoduchého operačního systému, který by zajišťoval možnost vykonávání více výpočtů současně v přesně definovaných intervalech. Tato funkce se nazývá multi-tasking. Na internetu je v současné době celá řada projektů operačních systémů určených pro mikroprocesorovou techniku. Pro tuto diplomovou práci byl vybrán operační systém FreeRTOS. Tato knihovna poskytuje podporu práce s procesy (označovanými *task*), jejich vytváření, vypínání, pozastavování, přepínání, atd. Implementována je také podpora komunikace mezi jednotlivými procesy a to pomocí semaforů (*semaphore*) a zásobníků (*queue*). Deterministické přepínání jednotlivých procesů a jejich vykonání v definované době je zajištěno použitím priorit, přiřazených každému procesu. Plánovač procesů (*scheduler*) poté na základě priorit rozhoduje kterému procesu bude přiřazen procesorový čas. Více informací o této knihovně je k dispozici na webových stránkách [15].

Grafická strana projektu byla implementována knihovnou STemWin. STemWin je distribuována v podobě uživateli uzavřených statických knihoven s příponou *.a* a s hlavičkovými soubory. Uvnitř souborů jsou obsaženy funkce pro vykreslování základních tvarů a prvků GUI. Pro použití této knihovny bylo nutno zadefinovat základní funkce pro inicializaci potřebných periférií procesoru a propojit je s funkcemi definovanými v dokumentaci grafické knihovny [17].

Poslední použitá knihovna třetí strany byla knihovna FatFS [4]. Použití této knihovny

dovoluje implementaci souborového systému FAT, který je kompatibilní se systémem souborů použitým například v operačním systému Microsoft Windows. Implementována byla z důvodu přítomnosti SD karty, sloužící k přenosu naměřených dat mezi záznamovou jednotkou a počítačem. Knihovny modulu FatFS poskytují funkce pro připojení karty, inicializaci a správu souborů. Uživatel musí doplnit fyzickou vrstvu knihovny, která připojuje a inicializuje vstupně výstupní piny a SDIO periférii. Pro snazší implementaci byla použita knihovna [10] fyzické vrstvy, vytvořená uživatelem Tilnem Majerlem. Knihovny od stejnojmenného autora byly použity také pro I2C komunikaci a pro odesílání dat po sběrnici RS232.

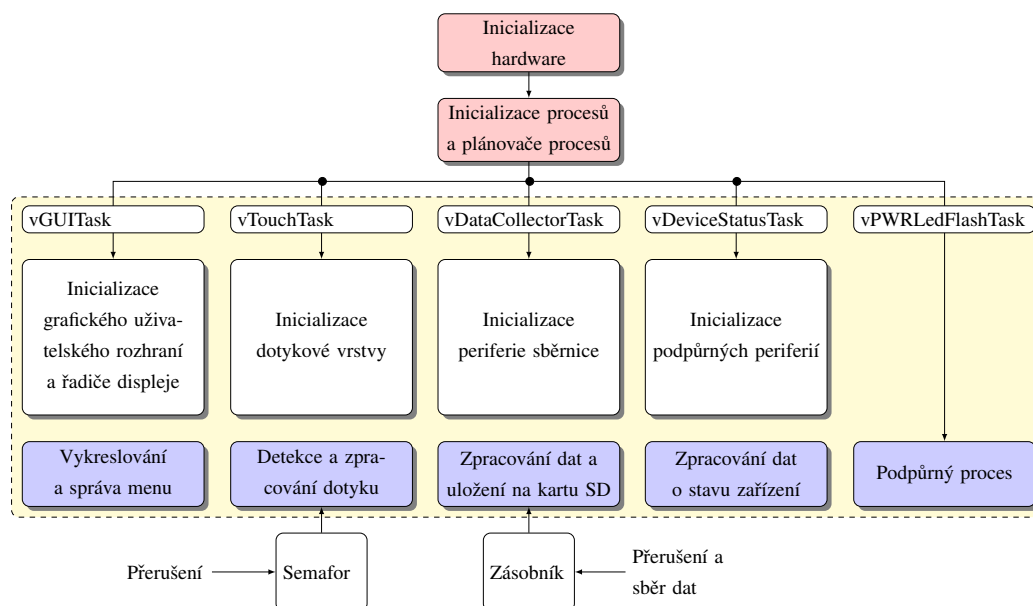
7.3 Inicializace a procesy

Poté, co dojde ke stisku hlavního spínače, zapnou se oba napět'ové měniče. Jakmile hodnota výstupního napětí překročí hodnotu 1.8 V, dojde k zapnutí vnitřního regulátoru napětí procesoru a začnou se vykonávat instrukce, uložené v paměti. Nejprve dojde k inicializaci externího krystalu o frekvenci 25 MHz. Následně jsou inicializovány frekvenční děličky a násobičky, kterými je do jádra procesoru vpuštěn hlavní hodinový signál o frekvenci 180 MHz. Tento signál, běžící na hlavní hodinové sběrnici AHB1, je poté vydělen tak, aby vznikla frekvence 90 MHz a 45 MHz pro ostatní periferie.

Následně je co nejrychleji inicializován výstupní GPIO pin `PWR_ON`, kterým se zapíná tranzistor udržující proud do celého obvodu. Více informací v kapitole 6. Následuje zapnutí pětivoltové větve obvodu a inicializace LED diod (a jejich vypnutí kvůli snížení proudového odběru). Dále je inicializován timer `TIM2`, na který je připojen piezo měnič a generátor PWM signálu pro podsvit displeje. Zapnuta je i FMC periferie pro komunikaci s externí pamětí, je nakonfigurována a po ukončení příkazu je již plně použitelná. Poslední inicializovanou periférií je obvod reálného času, který je inicializován pouze v případě, že již nebyl inicializován někdy dříve.

Procesy jsou inicializovány ihned po zapnutí a konfiguraci nejdůležitějších hardwarových a softwarových částí. Nejprve je zapnut proces `vGUITask`. Uvnitř tohoto procesu je funkce `GUI_Init()`, poskytovaná knihovnou `STemWin`. Tato funkce zapíná periférii `LTDC` a připravuje procesor pro použití s displejem. Tato funkce je uzavřena do kritické sekce, aby nedošlo k přerušení vykonávání inicializace grafického uživatelského rozhraní jiným procesem. Je-li GUI zapnuto korektně, je vykreslena uvítací obrazovka obsahující verze knihoven a verze této diplomové práce. Po opuštění kritické sekce a vykreslení obrazovky jsou inicializovány další procesy. Mezi nejdůležitější patří proces `vTouchTask`, který inicializuje I²C sběrnici a dotykovou vrstvu displeje, které nastaví prahy citlivosti. Tento proces následně čeká na udělení semaforu, po kterém přečte a zpracuje bod dotyku a souřadnice odešle do funkce `GUI_PID_State()`, která se používá pro vložení souřadnic dotyku do knihovny `STemWin`.

Přepne-li uživatel záznamové zařízení do režimu měření, je zobrazena obrazovka ob-



Obrázek 7.4: Inicializace zařízení a procesů

sahující elementární nastavení grafu a graf samotný. Spuštění měření má za následek zapnutí procesu `vDataCollectorTask`, který v případě naplnění zásobníku zpracuje data, vloží do grafu a uloží na kartu SD, je-li zapnuto ukládání.

Proces `vDeviceStatusTask` inicializuje podpůrné periferie, jako je teploměr či integrovaný obvod měření baterie. Data z těchto periférií jsou zobrazována na displeji a v budoucnu budou použita k vyhodnocení případného kritického stavu zařízení.

Podpůrný proces `vPWRLedFlashTask` se stará o časově nekritické funkce zařízení, jako jsou čtení stavu debugovacího tlačítka, nebo blikání LED diody ukazující zapnutý stav zařízení.

7.4 Dekódování výstupu z magnetometru

Pro otestování funkčnosti této jednotky byl dle zadání použit fluxgate tříosý magnetometr. Tento senzor byl poskytnut vedoucím této diplomové práce. Magnetometr se připojuje k jednotce (viz obrázek 7.5), která převádí výstup ze senzoru na digitální. Takto převedený výstup lze jednoduše připojit k počítači pomocí sériové RS232 sběrnice a vyčíst libovolným terminálem.

Data z digitální magnetometrické jednotky vystupují jako série číselných a znaménkových znaků oddělených mezerou. První data, odesílaná po sběrnici, jsou velikosti magnetického pole v ose X, Y a Z v jednotkách nanotesla. Následuje vnitřní teplota samotného senzoru a teplota digitální jednotky. Data jsou jednorázově odeslána na žádost uživatele odesláním znaku *a*. Odesláním znaku *c* jednotka začne odesílat data jednou za sekundu, znak *d* zahájí odesílání dat přibližně desetkrát za vteřinu.

Parametry komunikace s jednotkou jsou následující: rychlost komunikace je 57600baud,

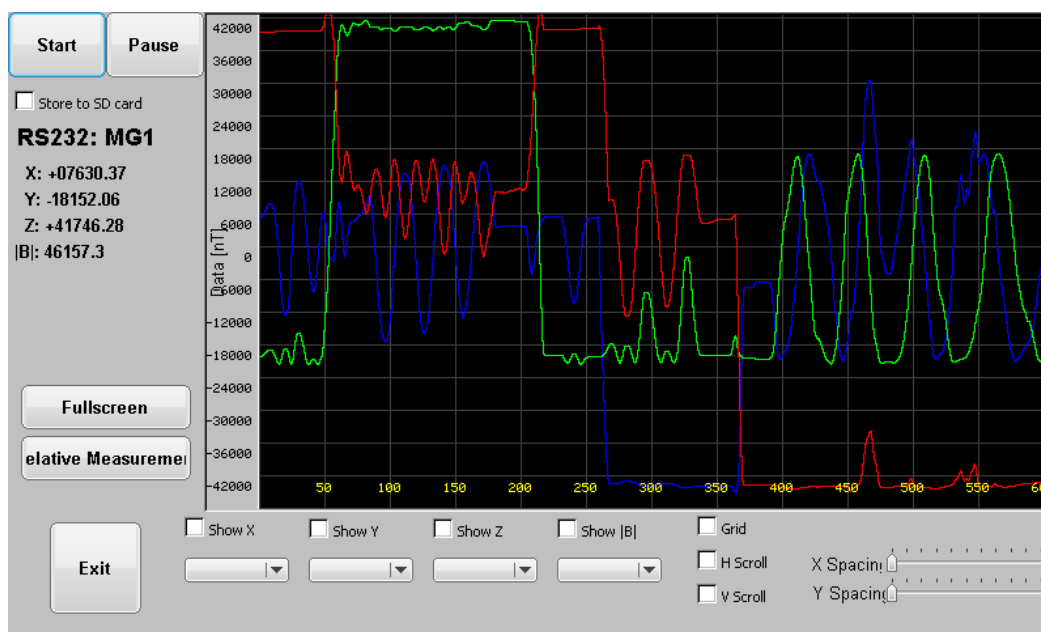


Obrázek 7.5: Jednotka magnetometru s digitálním výstupem

jeden stop bit, žádný paritní bit a délka dat 8 bitů. Po inicializaci USART periferie s použitím výše zmíněných parametrů byla úspěšně zahájena komunikace s digitální jednotkou.

Znaky přijaté ze sběrnice RS232 jsou pomocí přerušení ukládána do FIFO zásobníku. Implementace zásobníku je kritická pro správnou funkci předávání dat mezi paralelně běžícími vlákny. Takto uložená data jsou pomocí procesu `vDataCollectorTask()` rozparsována a převedena na datový typ `float`. Data jsou následně uložena na paměťovou kartu do datového pole. Toto pole knihovna `STemWin` používá pro vykreslování dat pomocí widgetu `graph`. Graf používá jako interní jednotky pixely. Hodnoty vložené do grafu jsou v poměru 1:1 k pixelům v grafu. Je-li například do grafu vložena hodnota 400, rozsvítí se čtyřstý pixel od spodní hrany grafu. Hodnoty jsou před vložením do grafu zmenšeny tak, aby maximální možná hodnota byla vždy v grafu viditelná (v případě magnetometru se hodnota pohybuje v rozmezí ± 46000). Korektní jednotky měřené veličiny jsou zajištěny správným nastavením os grafu.

Rozparsovaná a vykreslená data na displej jsou k dispozici na obrázku 7.6. V levé části displeje je vidět aktuální měřená hodnota s rozlišením na dvě desetinná místa. Obrázek byl pořízen implementováním krátkého kódu, který kopíruje aktuální stav paměti pro obrazová data a převádí je do formátu obrázku `.bmp` s použitím některých funkcí grafické knihovny a modulu `FatFs`.



Obrázek 7.6: Data z magnetometru vykreslená na LCDdispleji

Kapitola 8

Test jednotky

8.1 Měření synchronizačních pulzů displeje

Pro správnou funkci zařízení musela být správně nastavena LTDC periferie, sloužící k odesílání dat z adresního prostoru mikrokontroléru do displeje. Kromě správné konfigurace vrstev výstupních pinů, displeje nebo barevného prostoru, musely být správně nastaveny parametry časování displeje. Tato problematika byla nastíněna v sekci 6.5. Korektní nastavení těchto parametrů spolu s nastavením vnitřních frekvenčních děliček a násobiček displeje bylo poměrně složité a vytvářelo značný prostor pro chybné nastavení. Z toho důvodu byly proměřeny hlavní synchronizační signály vedoucí z mikrokontroléru do displeje. Druhým důvodem k proměření těchto signálů bylo mírné blikání displeje, které bylo viditelné při některých úhled pohledu. Nebylo jasné, zda se jednalo o chybu konfigurace SDRAM paměti, LTDC periferie nebo pulzně šířkového signálu použitého k ovládání intenzity podsvitu. Mohlo se také jednat o chybu nastavení grafické knihovny STemWin a ke vzniku tzv. flickeringu, o kterém pojednává dokumentace knihovny [17, str. 871].

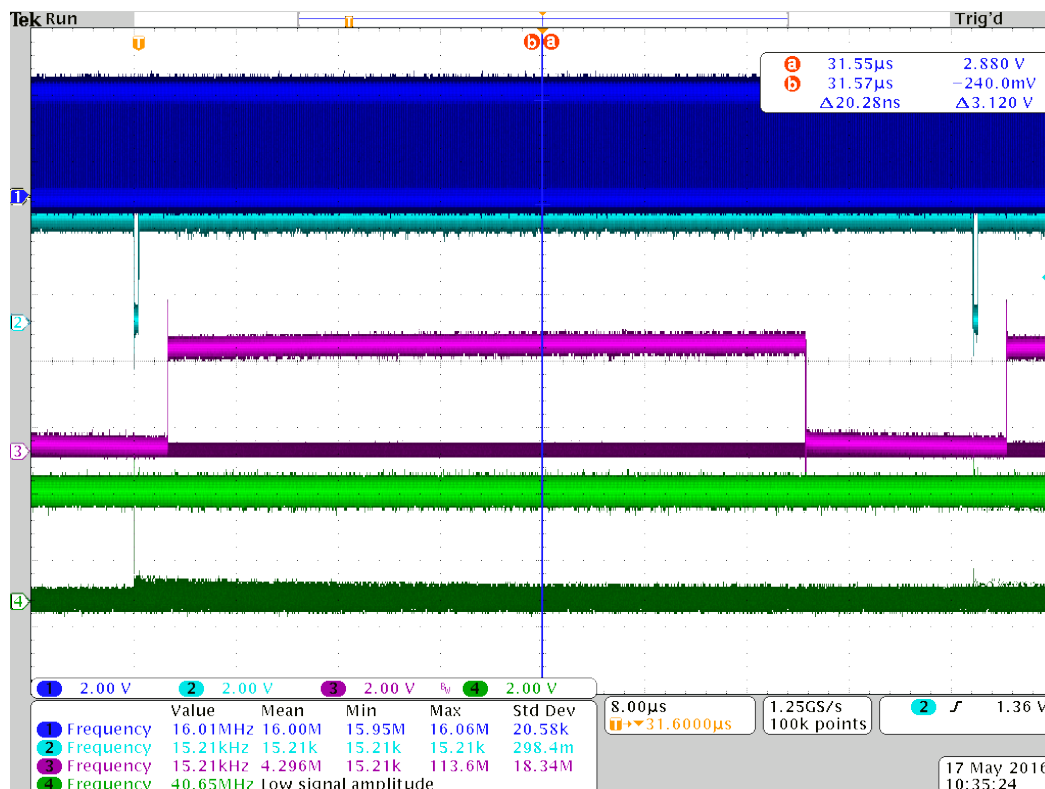
V grafu v obrázku 8.1 je v signálu č.1 (modře) patrný hodinový signál o frekvenci 16 MHz. Tento kmitočet odpovídá nastavené hodnotě v mikrokontroléru. Tento signál vzniká nastavením registru PLLSAI_N na hodnotu 160, čímž vznikne frekvence 160 MHz. Tato hodnota je následně vydělena pěti v registru PLLSAI_R a dvěma v registru PLLCDCLK.

V signálu číslo 2 (azurová) je patrný horizontální synchronizační signál. Frekvence tohoto pulzu je rovna podílu hlavního hodinového signálu ku celkové aktivní šířce. Celková aktivní šířka je rovna

$$HSYNC = \frac{DSYNC}{TAW} = \frac{DCLK}{AW + HBP + HFP} = \frac{16 \cdot 10^6}{800 + 41 + 210} = 15.22 \text{ kHz} ,$$

kde DCLK je hodinový signál, AW je šířka aktivní části displeje, HBP je horizontální zadní zápraží a HFP je horizontální přední zápraží. Tato spočtená hodnota přibližně odpovídá naměřené hodnotě.

Signál číslo 3 (růžový) je signál povolující zápis dat z 24 paralelních datových vodičů na spadovou hranu hodinového signálu. Délka pulzu je 800 hodinových pulzů a frekvence



Obrázek 8.1: Synchronizační pulzy a signály naměřené na vstupu do displeje

je rovná frekvenci horizontálního synchronizačního signálu. Z grafu je také vidět správné zadní a přední zápraží horizontálního signálu.

Signál číslo 4 je signál vertikální synchronizace. Frekvence tohoto signálu byla změněna a má hodnotu 29.2 Hz. Tato frekvence odpovídá obnovovací frekvenci displeje a byla spočítána ze vzorce

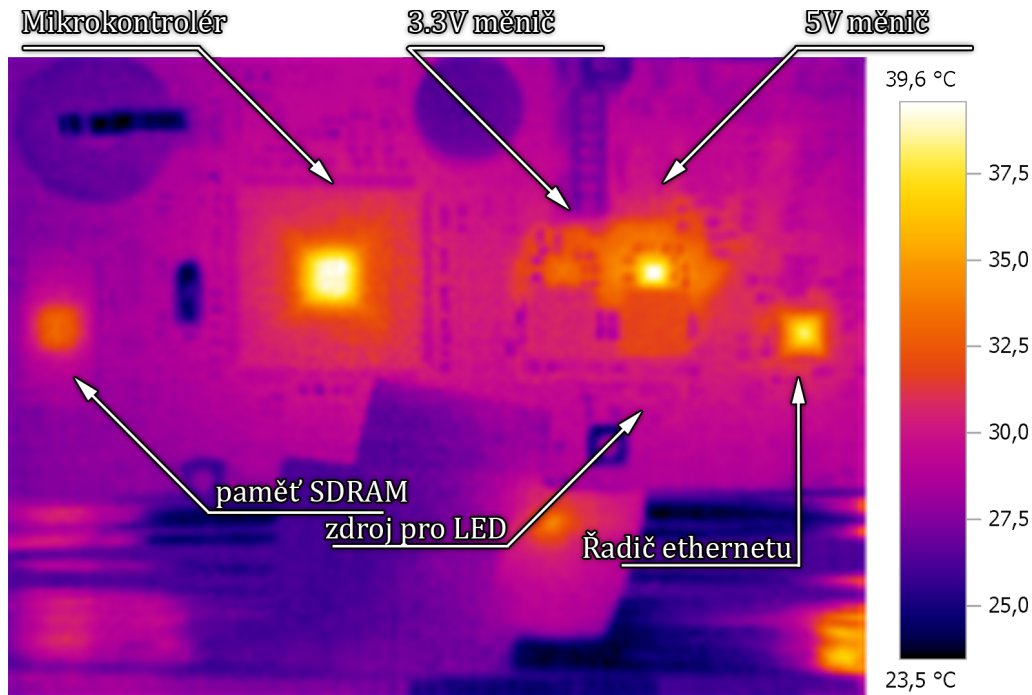
$$V_{\text{SYNC}} = \frac{H_{\text{SYNC}}}{T_{\text{AH}}} = \frac{H_{\text{SYNC}}}{A_{\text{H}} + V_{\text{BP}} + V_{\text{FP}}} = \frac{15.22 \cdot 10^3}{480 + 18 + 22} = 29.26 \text{ Hz},$$

kde A_{H} je výška aktivní části displeje, V_{BP} vertikální zadní zápraží a V_{FP} vertikální přední zápraží. Graf naměřený z osciloskopu ukazující vertikální synchronizační pulz je k dispozici v příloze D.

Z výsledku měření synchronizačních pulzů je patrné, že obnovovací frekvence displeje byla spočtena správně a konfigurace vnitřních registrů odpovídá reálnému chování. Obnovovací frekvence displeje je dostatečná aby nebyla viditelná pouhým okem. Blikání, viditelné pod některými úhly, bylo pravděpodobně způsobeno interferencí se zářivkovými světly, pracujícími na síťovém kmitočtu 50 Hz.

8.2 Měření tepelného vyzařování

V této práci byl dán důraz na vysokou efektivitu využití energie a tedy na minimalizaci tepelného vyzařování desky plošných spojů a součástek na ní umístěných. To bylo



Obrázek 8.2: Orientační snímek desky plošného spoje pořízený z termokamery

teoreticky docíleno minimalizací $R_{DS(ON)}$ tranzistorů, ležících na DPS mezi hlavním napájením, baterií a měniči napětí. Dále byly použity součástky s tepelnými ploškami pro odvod tepla ze součástky do desky, byly vybírány součástky s minimální proudovou spotřebou, atd. Fotografie plošného spoje z termokamery testo 875-1 je k dispozici v obrázku 8.2. Snímek byl vyfocen s nastavenou emisivitou $\varepsilon = 0.95$ a to po přibližně 30ti minutách kdy došlo k ustálení teploty.

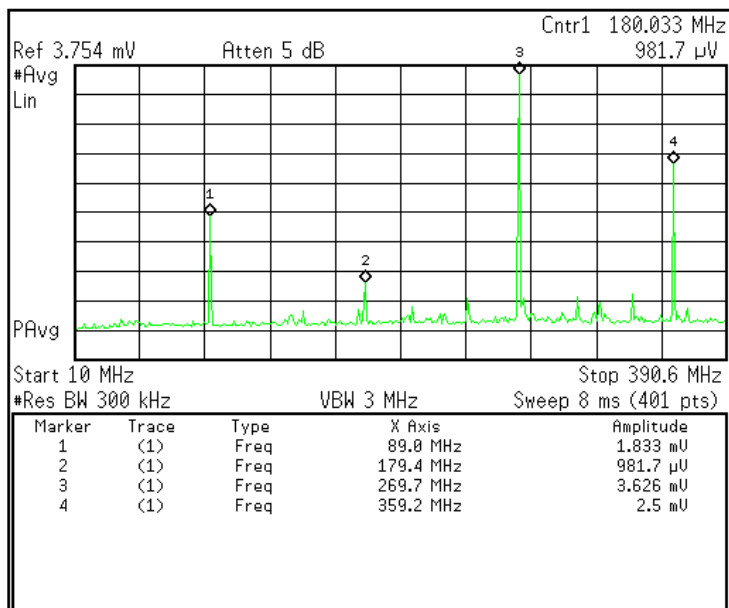
Na snímku je patrné intenzivnější vyzařování z integrovaného obvodu spínaného zdroje 5 V větve. Zdroj 5 V v době focení napájel zdroj pro podsvět LED diod (viz závěr) a poskytoval proud přibližně 250 mA (spočteno ze znalosti proudu procházejícího LEDdiodami a účinnosti obou zdrojů).

V obrázku je vidět tepelné vyzařování mikrokontroléru a paměti SDRAM pro obrazová data displeje. Na obou těchto součástkách je vidět přibližná velikost čipu v pouzdrě součástky.

Patrné je intenzivnější vyzařování řadiče ethernetu. Tato součástka byla v době focení aktivní a připojena k napájení, komunikace ale neprobíhala. Spotřeba integrovaného obvodu ethernetu ve stavu power-down je typicky 14 mA. Zvýšení teploty bylo tedy očekáváno.

8.3 Měření vyzařování mikrokontroléru

Další část byla věnována orientačnímu měření elektromagnetického vyzařování. K měření byl použit spektrální analyzátor Agilent E4403B a sada ručních sond Rhode&Schwartz



Obrázek 8.3: Spektrum vyzařování v okolí mikrokontroléru záznamového zařízení.

HZ-15 pro měření vyzařování na intervalu frekvencí od 30 MHz do 3 GHz. Výstup z analyzátoru je k dispozici v obrázku 8.3.

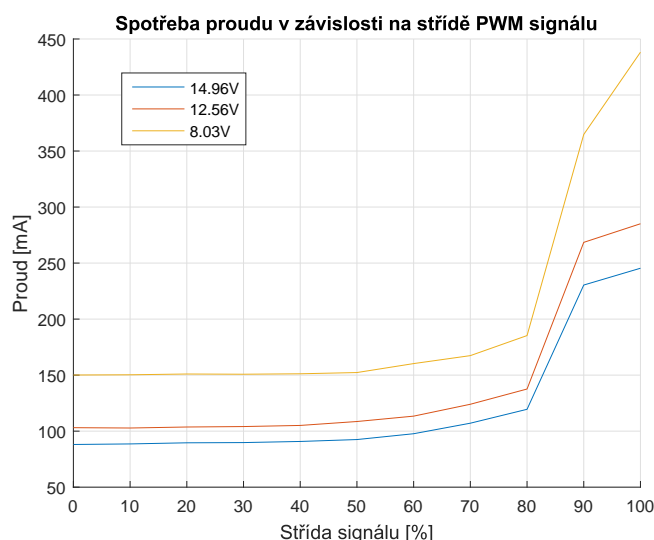
Měření vyzařování probíhalo v okolí nad mikrokontrolérem a to v rozsahu od 10 MHz až 390.6 MHz. Sondy, použité při měření, jsou určeny pro frekvence od 30 MHz a nebyly před začátkem měření zkalibrovány. Jednotky na ose Y tedy neodpovídají skutečnosti. Nezkalibrované sondy byly přesto použity, protože se jednalo pouze o orientační měření.

1. Na frekvenci 90 MHz, označené markerem 1, vyzařuje řadič paměti FMC a také periferie procesoru připojené na hodinový takt APB1 a APB2.
2. Na frekvenci přibližně 180 MHz je taktován samotný procesor a také vnitřní periferie připojené na sběrnici hodinového signálu AHB1.
3. Peak označený markerem 3 není v dokumentaci mikrokontroléru uveden. Může se jednat o součet třetí harmonické frekvence 90 MHz obdélníkového signálu s jinými frekvencemi, případně o některou vnitřní frekvenční násobičku, o které se dokumentace nezmiňuje.
4. Frekvence 360 MHz vzniká násobením 1 MHz signálu vzniklého vydělením 25 MHz externího krystalu procesoru. Tato frekvence se nastavuje v registru PLL_N.

Tímto měřením bylo potvrzeno korektní nastavení frekvenčních násobiček a děliček nutných pro správnou funkčnost periférií citlivých na přesnost hodinového signálu. Například sběrnice RS232 implementovaná a otestovaná v této práci používá hodnoty frekvencí uložených v paměti mikrokontroleru pro správný výpočet rychlosti přenosu dat (baudrate).

8.4 Měření spotřeby proudu záznamové jednotky

Dále byla proměřena velikost spotřeby proudu pro různé velikosti vstupního napětí. Zvolena byla hodnota 15 V, což je doporučené vstupní napájecí napětí jednotky. Druhá zvolená velikost vstupního byla napětí 12.6 V odpovídá napětí baterií ve stavu maximálního nabití (4.2 V na článek). Hodnota přibližně 8 V odpovídá hranici, kdy dochází k sepnutí ochranných prvků a k odpojení baterie od jednotky. Hodnoty proudů se při vypnutém a při probíhající měření výrazně neliší (rozdíl byl přibližně 1 mA). To potvrzuje korektnost výběru součástek budiče sběrnice RS232 a karty SD.



Obrázek 8.4: Měření proudové spotřeby záznamové jednotky v závislosti na střídě ovládacího signálu proudového zdroje

Z grafu je patrné nelineární chování průběhu proudové spotřeby zařízení v závislosti na střídě PWM signálu, ovládacího proudový zdroj. Tento průběh byl způsoben špatně nastavenou frekvencí řídicího signálu. Původní frekvence řídicího signálu byla 1 kHz. Po úpravě frekvence na 10 kHz byla chování proudové spotřeby v závislosti na PWM signálu téměř lineární. Minimální a maximální hodnota proudu zůstala stejná, jako v grafu 8.4. Offset grafu ve směru osy Y je způsoben spotřebou ostatních komponent, převážně pak paměť pro obrazová data a mikrokontrolérem. Proud při vypnutém podsvitu displeje byl změřen a má hodnotu přibližně 87 mA. Zařízení ve vypnutém stavu spotřebovává 2.95 mA, protože v jednotce jsou stále pod napětím ochranné a měřící prvky baterie. Tato hodnota přibližně odpovídá součtu spotřeb obou integrovaných obvodů při připojeném adaptéru. Hodnota proudu, je-li připojena pouze baterie, by měla být podle dokumentace o dva řády nižší.

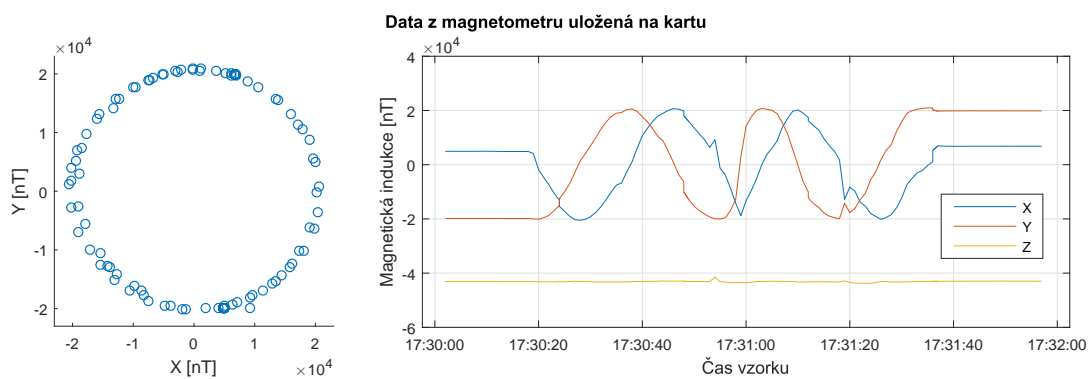
Závěrem této části byla změřena prahová hodnota napájecího napětí, kdy dojde k odpojení zařízení. Tato hodnota byla stanovena na 5.6 V napájecího napětí. Důvodem je pravděpodobně pokles napětí ochranného obvodu nabíjení baterie pod hodnotu 4.5 V (vlivem úbytku napětí na vstupním filtru a diodě D_8 , což má za následek uzavření tranzistorů

Q_2 a Q_4 a přerušení napětí na vstupu měničů.

8.5 Test komunikace s magnetometrem

K otestování funkčnosti komunikace a záznamu dat byl připojen k jednotce magnetometr a data z něj byla ukládána na paměťové zařízení. Z magnetometru bylo vyčteno 122 vzorků dat. Tato data byla následně z karty vyčtena použitím programu Matlab a zobrazena v obrázku 8.5.

Před začátkem měření byl fluxgate magnetometr umístěn na stůl a a po začátku měření postupně otáčen kolem osy Z. Takto naměřená data tvoří přibližně sinusový průběh v ose X a ose Y a po vynesení do XY grafu tvoří kruh se středem v nule, je-li senzor kalibrován. Osa X grafu je tvořena časovou značkou, která je vyčítána z obvodu reálného času mikrokontroléru STM32F439BGT6 a vložena do paměti při přijetí prvního bajtu dat.



Obrázek 8.5: Data zaznamenaná na kartu SD z magnetometru

Kapitola 9

Závěr

Tato diplomová práce seznamuje čtenáře s tvorbou univerzálního záznamového zařízení. Práce poskytuje základní pohled na parametry některých implementovaných sběrnic a to z pohledu teoretického (teoretická implementace hardwarové vrstvy a vrstvy linkové), tak i praktického (implementace budičů sběrnic na desce plošných spojů). Po teoretickém obsažení funkce sběrnic bylo vybráno mechanické pouzdro jednotky a displej s odpovídajícími parametry. Následně byla navržena deska plošných spojů, osazena komponenty a konektory. Nakonec byly pomocí trojrozměrného modelu na CNC stroji vyfrézovány otvory pro displej a konektory a vygravírovány popisky jednotlivých konektorů. Byl také naprogramován mikrokontrolér, do něžž byly nahrány knihovny operačního systému reálného času a grafické knihovny. Všechny tyto součásti byly propojeny tak, aby vzniklo univerzální záznamové a zobrazovací zařízení, což bylo cílem této práce.

Bylo dosaženo všech bodů stanovených zadáním diplomové práce. Výsledkem je fyzicky existující jednotka s funkčním hardwarem. Zařízení bylo na závěr otestováno na fluxgate senzoru magnetického pole s digitálním výstupem. Výstup tohoto senzoru byl správně interpretován, zobrazen na displeji a uložen na paměťové zařízení.

Navíc byly implementovány další funkce, které mohou časem rozšířit funkcionalitu záznamového zařízení. V první řadě byla jednotka osazena interními bateriovými články, které umožňují použití zařízení i bez přítomnosti napájení. Napětí baterie bylo také vyvedeno, pomocí integrovaných tranzistorových spínačů s tepelnou a proudovou ochranou a pomocí obvodu hlídání baterie, ven z univerzální záznamové jednotky k případnému napájení dalších zařízení.

Vzhledem ke komplexnosti celé práce vzniklo při návrhu několik omylů. Největším problémem se ukázal špatně implementovaný spínaný zdroj pro podsvit displeje. Měnič fungoval správně a měnil velikost výstupního proudu v závislosti na střídě ovládacího signálu. Topologie zdroje, použitá v návrhu, byla však zvyšující a hodnota výstupního napětí zdroje nemohla tedy být nižší, než velikost vstupního napětí. Výstupní napětí měniče porušovalo maximální absolutní hodnoty dané výrobcem displeje. Správná topologie zdroje by tedy byla SEPIC. Tato chyba byla napravena připojením zdroje na 5 V napětíovou větev. Druhým omylem bylo použití špatného pouzdra obvodu při návrhu desky plošných spojů

a to u obvodu hlídání a balancování baterie. Tento omyl byl napraven nakreslením malé desky plošných spojů, která sloužila jako redukce mezi správným a nesprávným pouzdem součástky.

Do budoucna je počítáno s další prací na záznamovém zařízení. V první řadě bude nutné otestovat další části hardwaru, které prozatím nebyly plně otestovány. Nejvíce ale bude potřeba zapracovat na softwarové části jednotky, ve které bude nutné časem implementovat pokročilé funkce jako USB, Ethernet (AFDX) a další sběrnice. Dále bude nutné řádně využít výsledků měření poskytovaných obvody měření a hlídání baterie.

Plně funkční jednotka může být použita jako výuková pomůcka, případně jako záznamové a měřicí zařízení, připojitelné na letecké sběrnice CANaerospace a Avionics Full-Duplex Ethernet. Jednotka může být také připojena na průmyslové sběrnice RS232, RS422 a CAN.

Použitá literatura

- [1] Avionics Interface Technologies: *ARINC 429 Protocol Tutorial*. [online].
Dostupné z: http://aviftech.com/files/2213/6387/8354/ARINC429_Tutorial.pdf
- [2] BELZA, J.: Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení. *Praktická elektronika*, 2001: str. 12.
- [3] Bopla Gehäuse Systeme GmbH: *ABPH 1300-0200*. [online].
Dostupné z: https://www.bopla.de/enclosure-technology/product/alubos/alubos-1300-enclosure-profiles/abph-1300-0200.pdf?filename=ABPH%201300-0200_84136200_complete_.pdf&tx__web2pdf_pi1%5Bargument%5D=printPage&tx_web2pdf_pi1%5Baction%5D=&tx_web2pdf_pi1%5Bcontroller%5D=Pdf
- [4] Chan: FatFs - Generic FAT File System Module. [online].
Dostupné z: http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html
- [5] Condor Engineering: *AFDX protocol tutorial*. [online].
Dostupné z: http://www.cems.uwe.ac.uk/~a2-lenz/n-gunton/afdx_detailed.pdf
- [6] DAVIS, L.: *TIA/EIA-422 Electrical Characteristics of Balanced Voltage Digital Interface Circuits*. [online].
Dostupné z: http://www.interfacebus.com/Design_Connector_RS422.html
- [7] FocalTech Systems CO.,Ltd: *True Multi-Touch Capacitive Touch Panel Controller*. 2012, [online].
Dostupné z: http://www.haoyuelectronics.com/Attachment/HY101CTP/FocalTech-FT5x06%20DataSheet%20V4.0_1212.pdf
- [8] Integrated Silicon Solution, Inc.: *IS42S32400F*. 2015, [online].
Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/198/42-45S32400F-258273.pdf>
- [9] LARSON, S.: *Signal Timing Diagram*. [online].
Dostupné z: <https://eewiki.net/pages/viewpage.action?pageId=15925278>
- [10] MAJERLE, T.: Library 21- Read SD card with FatFs on STM32F4. [online].
Dostupné z: <http://stm32f4-discovery.com/2014/07/library-21-read-sd-card-fatfs-stm32f4xx-devices/>

- [11] MAJERLE, T.: *STM32F4 Discovery*. [online].
Dostupné z: <http://stm32f4-discovery.net>
- [12] Biblioteka graficzna Segger STemWin dla STM32 – graficzne HMI bez problemu! [online].
Dostupné z: http://mikrokontroler.pl/system/files/artykuly/Biblioteka_graficzna_Segger_STemWindla_STM32_graficzne_HMI_bez_problemu/rys5.png
- [13] NXP Semiconductors: *I2C-bus specification and user manual*. [online].
Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf
- [14] Omega: *The RS-232 Standard*. [online].
Dostupné z: <http://www.omega.com/techref/pdf/RS-232.pdf>
- [15] FreeRTOS - Market leading RTOS (Real Time Operating System) for embedded systems with Internet of Things extensions. [online].
Dostupné z: <http://www.freertos.org>
- [16] Riverdi: *LCD TFT Module Specification*. 2015, [online].
Dostupné z: http://riverdi.com/wp-content/uploads/datasheet/RVT70UQTNWC0x_Rev.1.1.pdf
- [17] SEGGER Microcontroller GmbH & Co. KG: *emWin - Graphic Library with Graphical User Interface*. 2015, [online].
Dostupné z: https://www.segger.com/downloads/emwin/UM03001_emWin5.pdf
- [18] Sipex Corporation: *Full Duplex RS-485 Transceivers*. [online].
Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/290184.pdf>
- [19] STMicroelectronics: *ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 225DMIPS, up to 2MB Flash/256+4KB RAM, crypto, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 20 comm. interfaces, camera&LCD-TFT*. [online].
Dostupné z: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/fd/8c/0a/19/13/8f/41/99/DM00077036.pdf/files/DM00077036.pdf/jcr:content/translations/en.DM00077036.pdf>
- [20] STMicroelectronics: *Oscillator design guide for STM8S, STM8A and STM32 microcontrollers*. [online].
Dostupné z: http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/c6/eb/5e/11/e3/69/43/eb/CD00221665.pdf/files/CD00221665.pdf/jcr:content/translations/en.CD00221665.pdf
- [21] STM32CubeMX. [online].
Dostupné z: http://www2.st.com/content/st_com/en/products/development-tools/software-development-tools/stm32-software-development-tools/stm32-configurators-and-code-generators/stm32cubemx.html

- [22] Stock Flight Systems: *Interface specification for airborne CAN applications*. [online].
Dostupné z: http://www.stockflightsystems.com/tl_files/downloads/canaerospace/canas_17.pdf
- [23] Texas Instruments: *High-Speed Layout Guidelines*. [online].
Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/scaa082/scaa082.pdf>
- [24] Texas Instruments: *TPS6214x 3V to 17V 2A StepDown Converter in 3x3 QFN Package*. 2006, [online].
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps62140.pdf>
- [25] Texas Instruments: *MAX3232E 3-V to 5.5-V Multichannel RS-232 Line Driver and Receiver With ± 15 -kV IEC ESD Protection*. 2015, [online].
Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1962287.pdf>
- [26] Texas Instruments: *SBS 1.1-COMPLIANT GAS GAUGE and PROTECTION with CEDV*. 2015, [online].
Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/bq3060.pdf>
- [27] Texas Instruments: *TPS61165 High-Brightness, White LED Driver in WSON and SOT-23 Packages*. 2016, [online].
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61165.pdf>
- [28] TouchGFX: *The Home Automation screen (Demo 2014)*. [online].
Dostupné z: <http://touchgfx.com/documentation/html/Homeautomation.png>
- [29] United Electronic Industries, Inc.: *UEI LoggerTM 300/600*. [online].
Dostupné z: <http://www.ueidaq.com/media/catalog/product/pdf/datasheet/ueilogger.pdf>
- [30] ZÁHLAVA, V.: *Současné metody profesionálního návrhu plošných spojů*. [online].
Dostupné z: <http://www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2005/03/zahlava.pdf>

Seznam obrázků

2.1	Záznamové zařízení DT80 od společnosti CAS dataloggers	3
2.2	Zařízení UEIlogger 300 od společnosti United Electronic Industries	4
3.1	Zjednodušené schéma zapojení sběrnic RS-422 a RS-485	6
3.2	Konektor DSUB použitý v letecké variantě sběrnice CAN	7
3.3	Základní rámec sběrnice CAN	9
3.4	Rozdělení datové části rámce použité v protokolu CANaerospace	10
3.5	Příklad změny napět'ových úrovní na sběrnici ARINC 429	12
3.6	Datový rámec sběrnice ARINC 429	13
3.7	Porovnání topologie fyzické vrstvy Arinc 429 a AFDX	13
3.8	Rámec AFDX	14
4.1	Koncept zařízení	16
4.2	Blokové schéma záznamové jednotky	17
4.3	Vize finální podoby jednotky	18
5.1	Mechanické zapouzdření jednotky s vyfrézovanými otvory v bočnicích a s namontovaným displejem	20
5.2	Výkres otvorů pro konektory v pouzdru jednotky	20
6.1	Bodeho graf vstupního filtru	23
6.2	Zapojení 3.3 V měniče napětí	23
6.3	Schéma zapojení bateriového packu	24
6.4	Schéma obvodu pro spínání zařízení	26
6.5	Blokové schéma použitého procesoru STM32F439	27
6.6	Schéma zapojení paměti SDRAM	28
6.7	Blokové schéma použité paměti	29
6.8	Diagram popisující základní parametry horizontálního a vertikálního ča- sování	30
6.9	Schéma zapojení obvodu sériové komunikace s obvodem max3232	32
6.10	Schéma zapojení budiče sběrnice RS422 a RS485	33
6.11	Schéma zapojení slotu karty Secure Digital	34
6.12	Deska plošných spojů s osazenými komponenty	35

7.1	Grafická knihovna TouchGFX	36
7.2	Příklad uživatelského rozhraní STemWin	37
7.3	Struktura softwarové části projektu	38
7.4	Inicializace zařízení a procesů	40
7.5	Jednotka magnetometru s digitálním výstupem	41
7.6	Data z magnetometru vykreslená na LCDdispleji	42
8.1	Synchronizační pulzy a signály naměřené na vstupu do displeje	44
8.2	Orientační snímek desky plošného spoje pořízený z termokamery	45
8.3	Spektrum vyzařování v okolí mikrokontroléru záznamového zařízení.	46
8.4	Měření proudové spotřeby záznamové jednotky v závislosti na střídě ovládacího signálu proudového zdroje	47
8.5	Data zaznamenaná na kartu SD z magnetometru	48

Seznam tabulek

3.1	Popis identifikátorů priorit používaných v letecké variantě sběrnice CAN	8
3.2	Popis napěťových úrovní a stavů sběrnice ARINC 429	11
6.1	Popis obsahu souborů obsahujících elektrické schéma zařízení	22
6.2	Popis a hodnoty časování displeje použité v této práci	31

Slovník

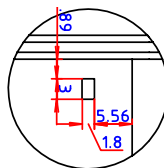
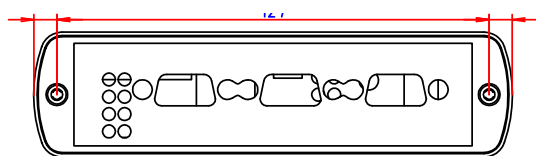
- AFDX** Avionics Full-Duplex Ethernet. 12, 13
- ARINC** Aeronautical Radion INC.. 10, 12, 13
- CMSIS** Cortex Microcontroller Software Interface Standard. 36
- DMIPS** Dhrystone Millions of Instructions per Second. Jednotka syntetického benchmarku používaných v mikroprocesorové technice.. 25
- FMC** Flexible Memory Controller, česky univerzální řadič paměti. 15, 25, 27, 28, 38, 43
- FPC** Flat Printed Circuit. Jedná se o tištěný spoj vyhotovený na ohebném pásku. Často se používá jako vodič, který má atypická propojení. 29
- GUI** Graphic User Interface, česky grafické uživatelské rozhraní. 37
- I²C** Označuje se také IIC - Inter-Integrated Circuit. Jedná se o sběrnici poprvé vyvinutou firmou Philips a používá se pro komunikaci mezi zařízeními. 14, 29, 38
- LTDC** LCD-TFT Display Controller, česky řadič LCD-TFT displeje. 16, 25, 28, 38
- PWM** Pulse Width Modulation, česky pulzně šířková modulace. 22
- RMI** Reduced media-independent interface. 32
- RTC** Real time clock, česky obvod reálného času. 25
- SDIO** Secure Digital Input Output. Jedná se o paralelní rozhraní používané převážně pro komunikaci s pamětmi SD. 33
- SDRAM** Synchronous Dynamic Random Access Memory, což je označení typu paměti DRAM se synchronním přenosem dat. 27
- SPI** Serial Peripheral Interface, česky sériové periferní rozhraní. Používá se například pro komunikaci mezi integrovanými obvody. 14, 32
- USART** Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter, česky univerzální synchronní/asynchronní sériové rozhraní. 16, 25, 30

Obsah přiloženého CD

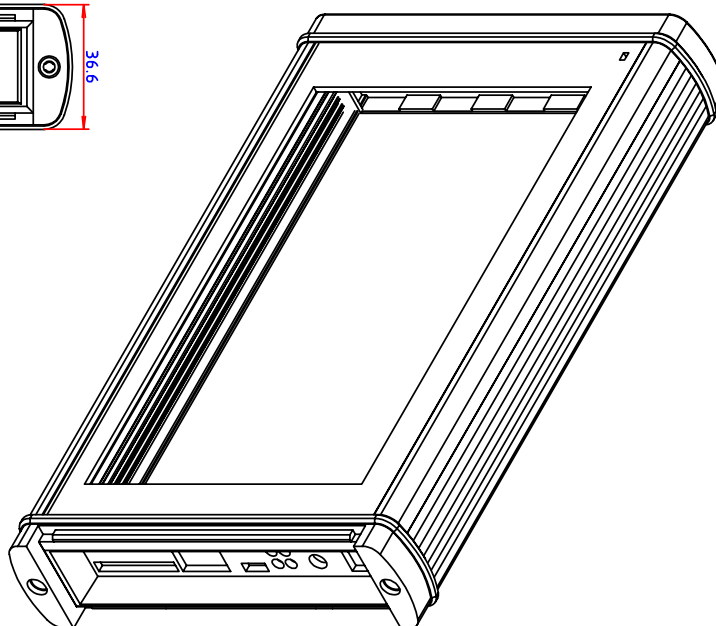
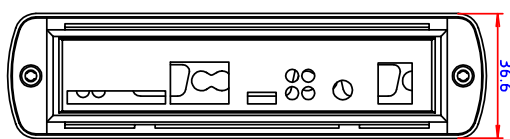
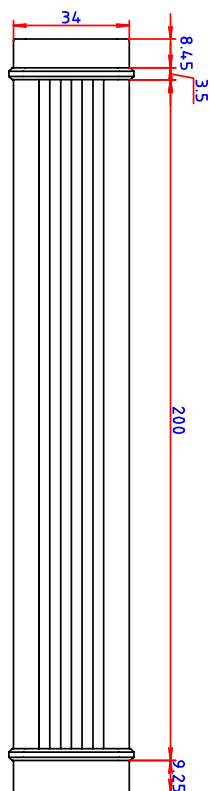
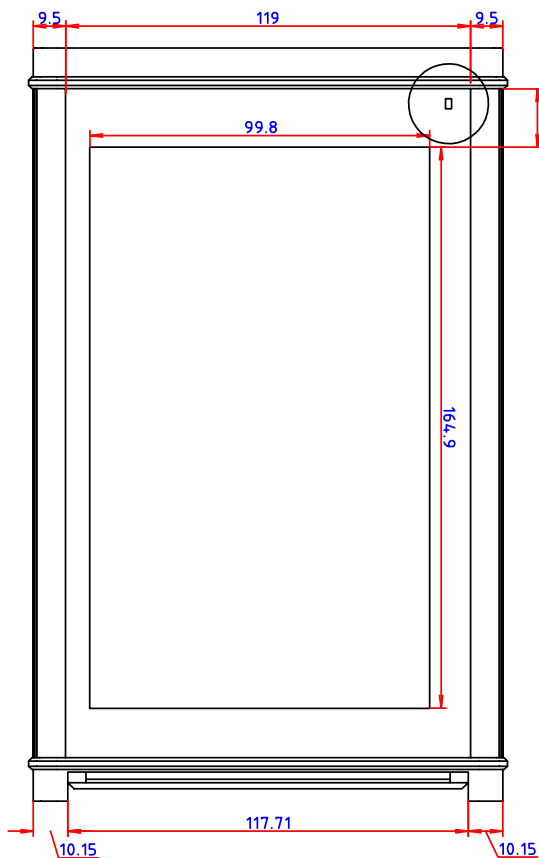
Diplomová práce	
Dokumentace	Dokumentace použitých součástek
Hardware	
datalogger	
allegro	Schéma desky plošných spojů
datalogger_stoljaku.opj	Schéma elektrické části pro OrCad Capture
...	
gerber	Podklady pro výrobu
billOfMaterials.xlsx	Seznam použitých součástek a jejich označení
datalogger_stoljaku.pdf	Schéma elektrické části
Render	Obrázky a podklady pro rendering ve formátu .c4d
Software	
datalogger	Složka zdrojových souborů programové části
fatfs	Složka zdrojových souborů modulu FatFs
FreeRTOS	Složka zdrojových souborů FreeRTOS
src	Složka zdrojových souborů samotné záznamové jednotky
STemWin	Složka zdrojových souborů nastavení STemWin
.project	Projekt vývojového prostředí TrueStudio
...	
STemWin_Library_V1.1.2	Zdrojové soubory knihovny STemWin
Texty	
diplomova_prace_stoljaku.pdf	Tato práce

Přílohy

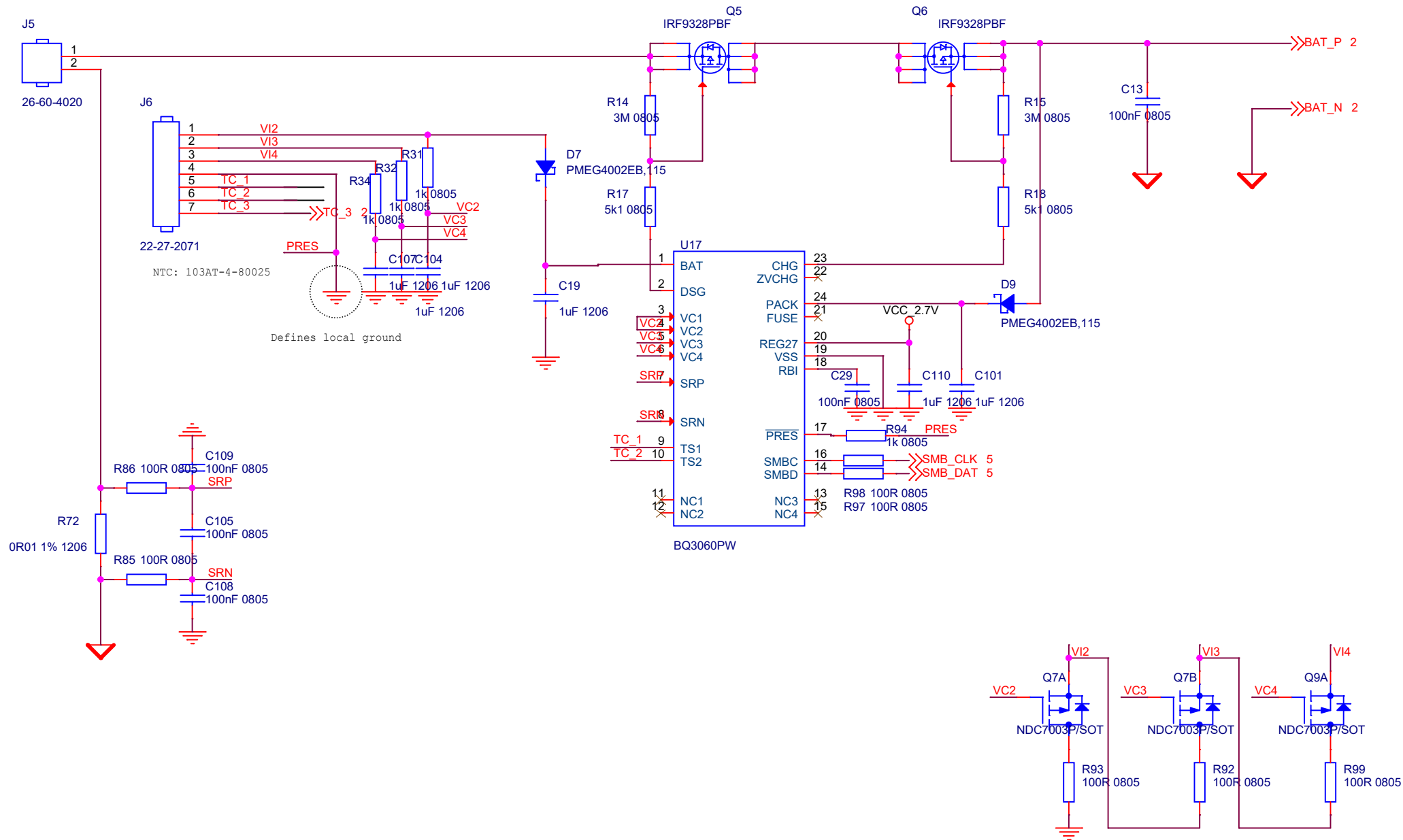
A Výkres pouzdra jednotky



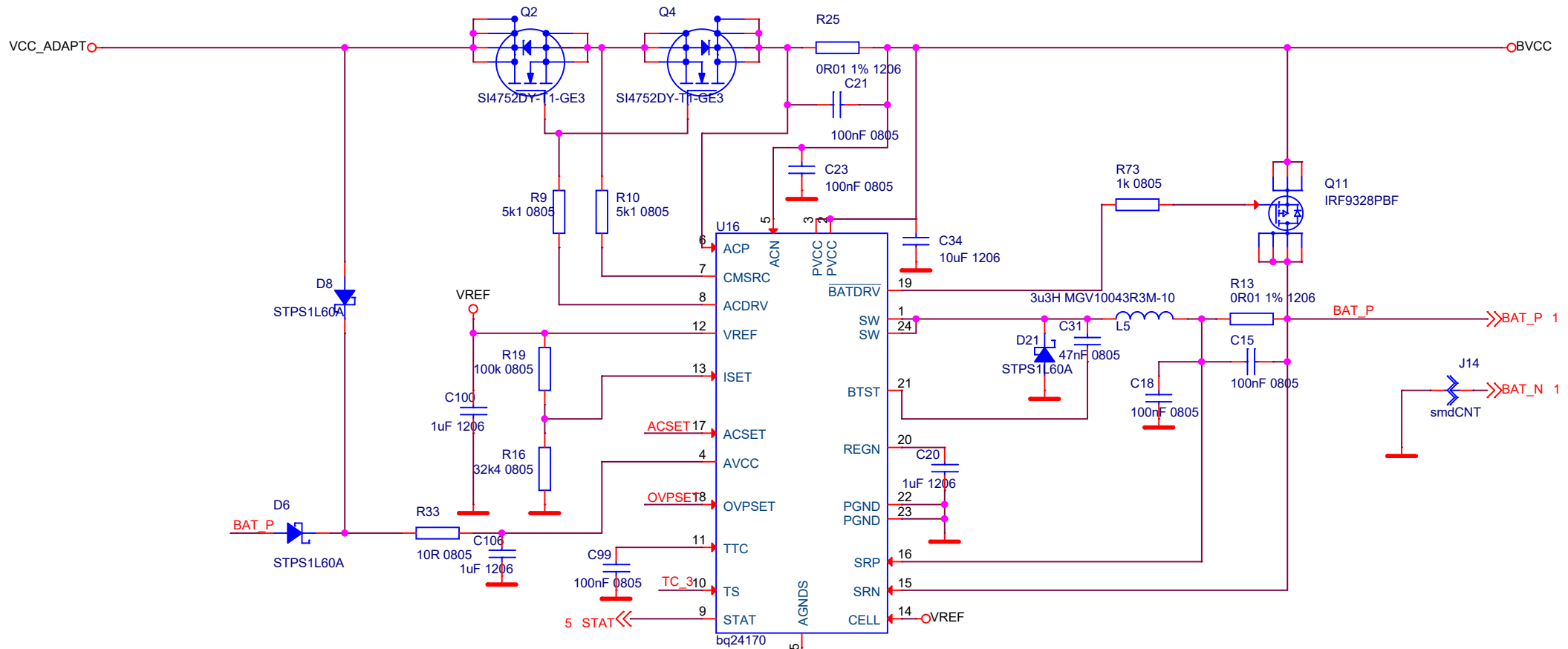
DETAIL A
MĚŘÍTKO 2:1



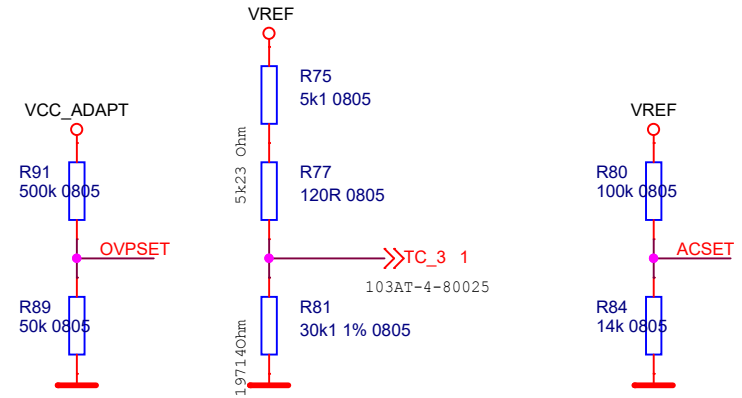
B Schéma záznamové jednotky



Title		
Battery supervisor and second order protection		
Size	Document Number	Rev
A4	datalogger_stoljaku.dsn	1.3
Date:	Thursday, January 07, 2016	Sheet 1 of 8

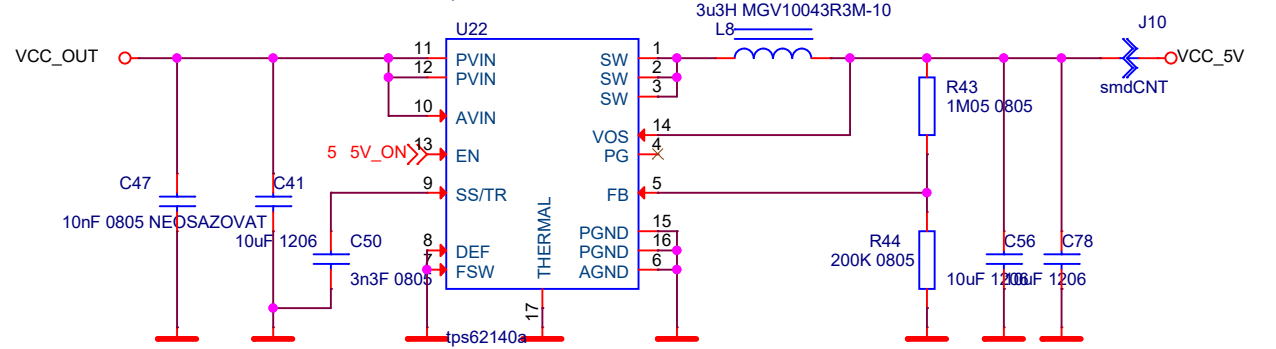
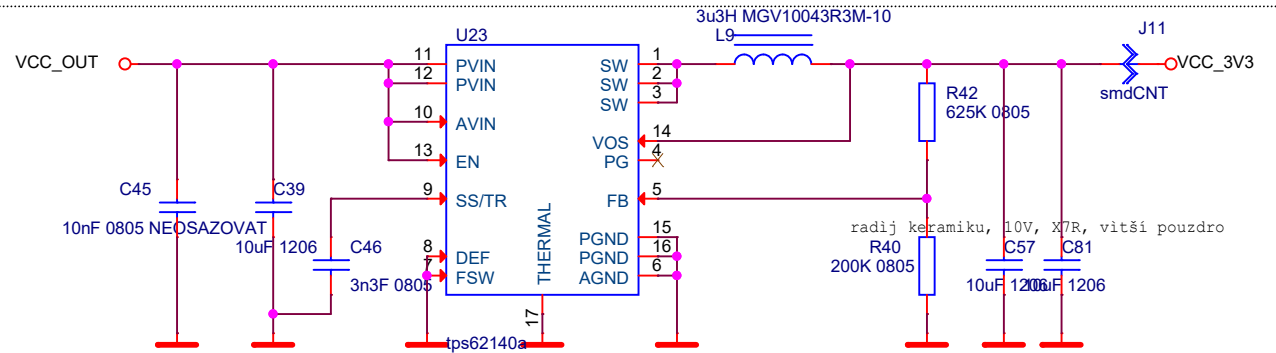
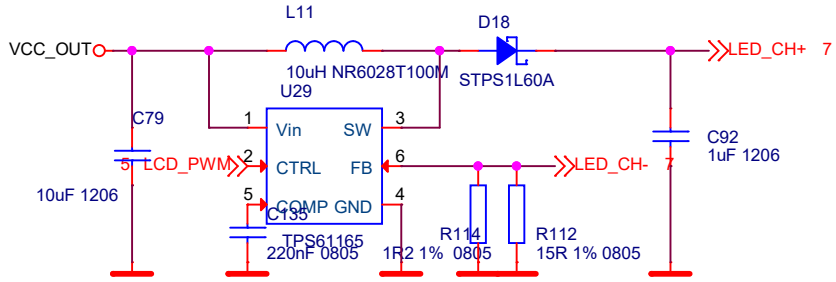


Power ground from battery must be connected right under the thermal pad along with D4, C14, C19

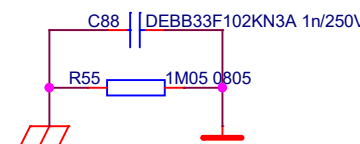
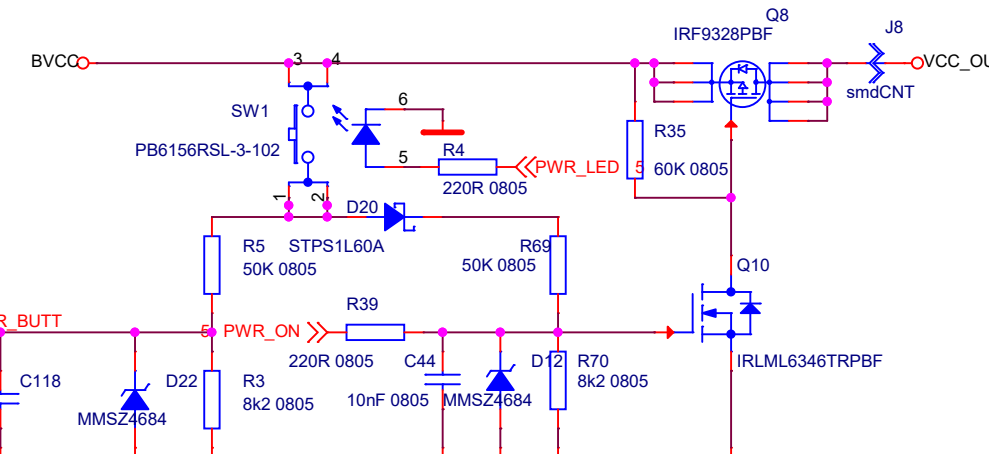
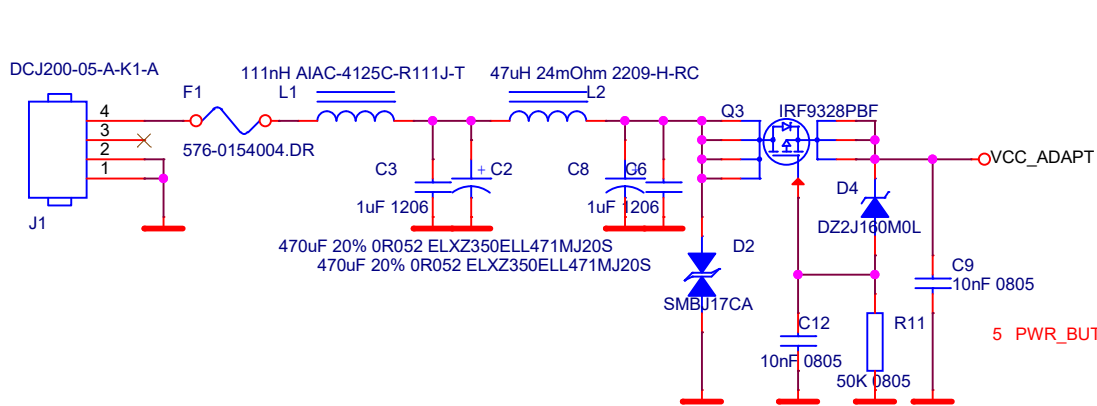


Title		
Battery charger circuit		
Size	Document Number	Rev
A4	datalogger_stoljaku.dsn	1.2
Date:	Thursday, January 07, 2016	Sheet 2 of 8

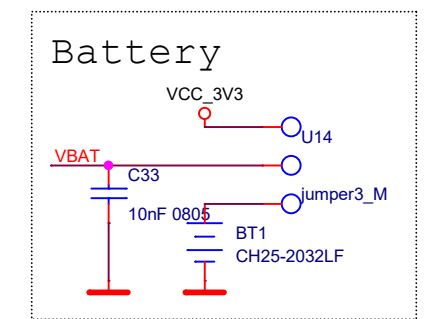
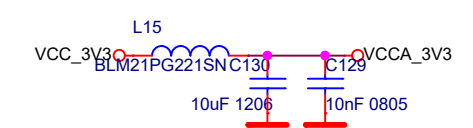
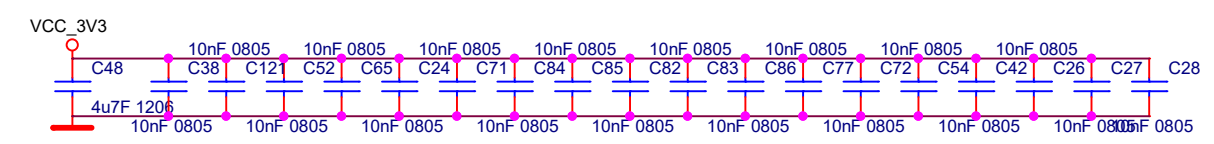
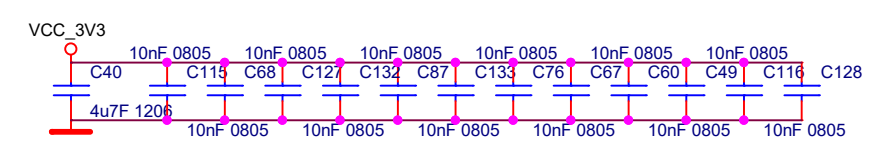
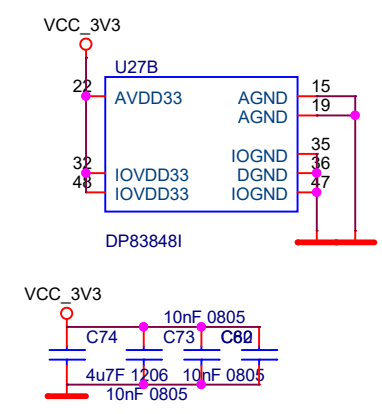
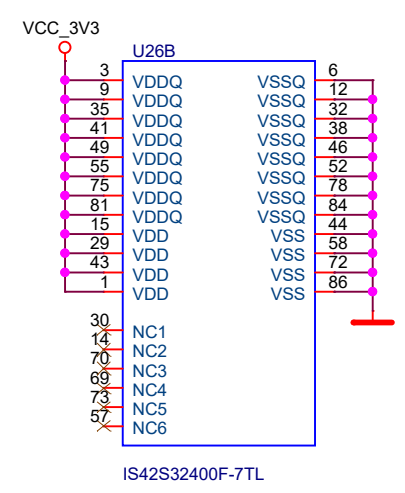
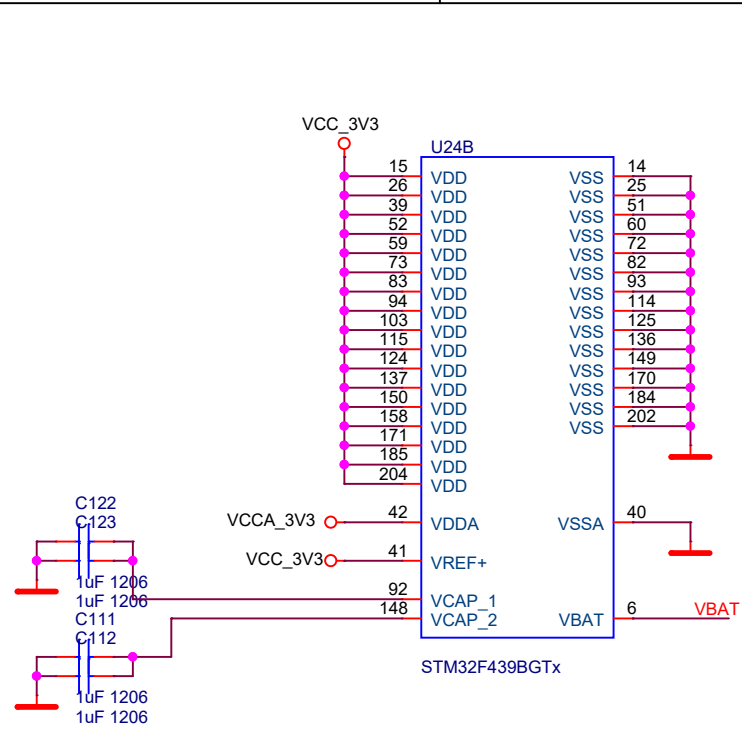
PWR 3V3 5V LED



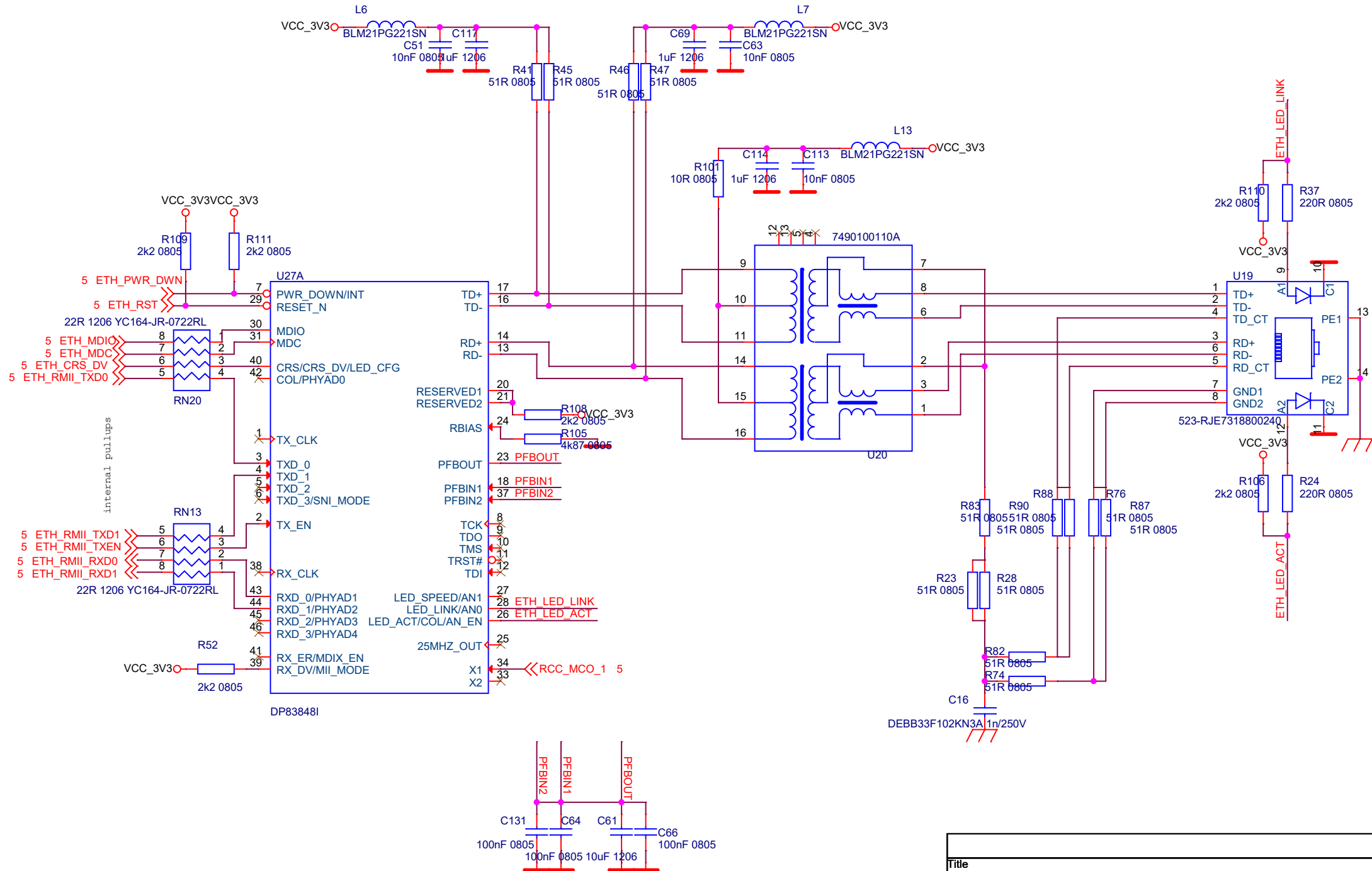
PWR Input, ON button



Title		
Switched power supply and LED power supply		
Size	Document Number	Rev
A4	datalogger_stoljaku.dsn	1.3
Date:	Saturday, January 09, 2016	Sheet 3 of 8

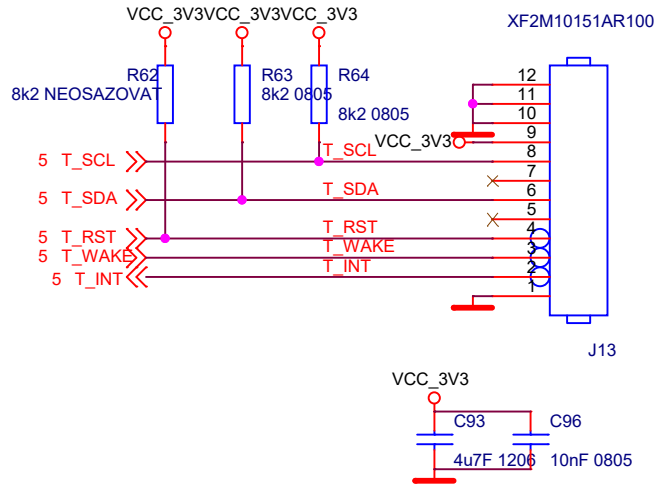


Title		
Part power and capacitors		
Size	Document Number	Rev
A4	datalogger_stoljaku.dsn	1.1
Date:	Thursday, January 07, 2016	Sheet 4 of 8

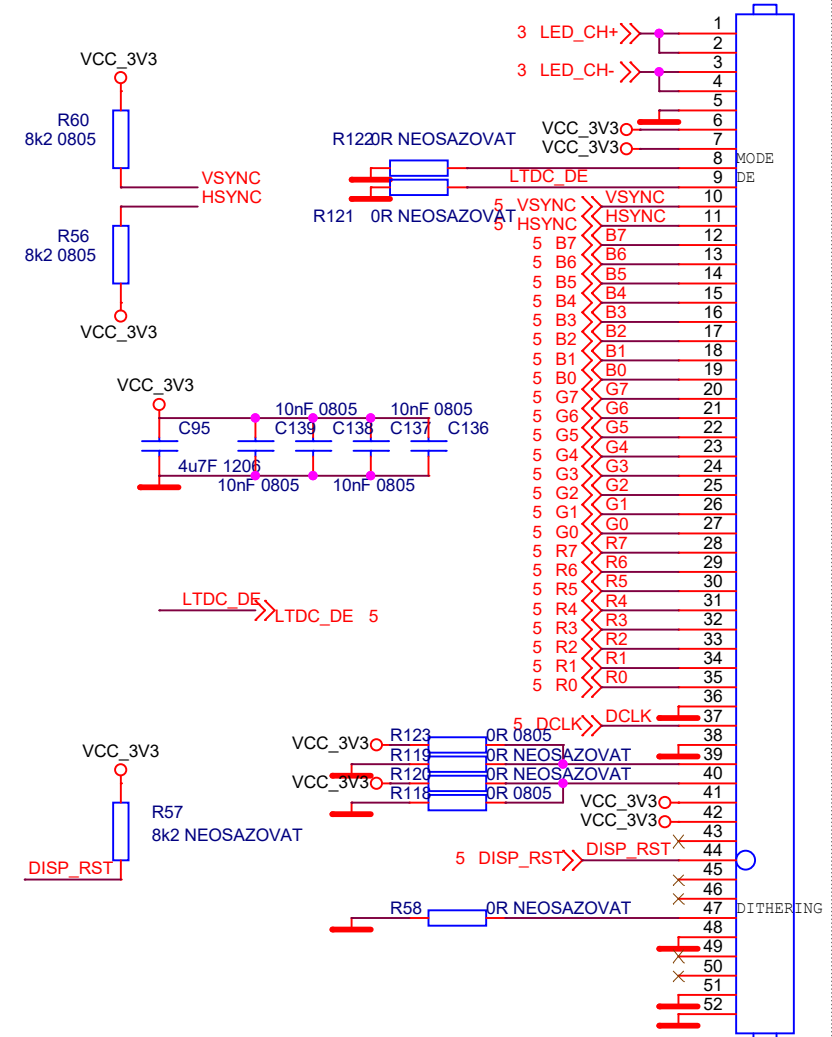


Title		
Ethernet connction and isolation transformer		
Size	Document Number	Rev
A4	datalogger_stoljaku.dsn	1.1
Date:	Thursday, January 07, 2016	Sheet 6 of 8

Touch connector



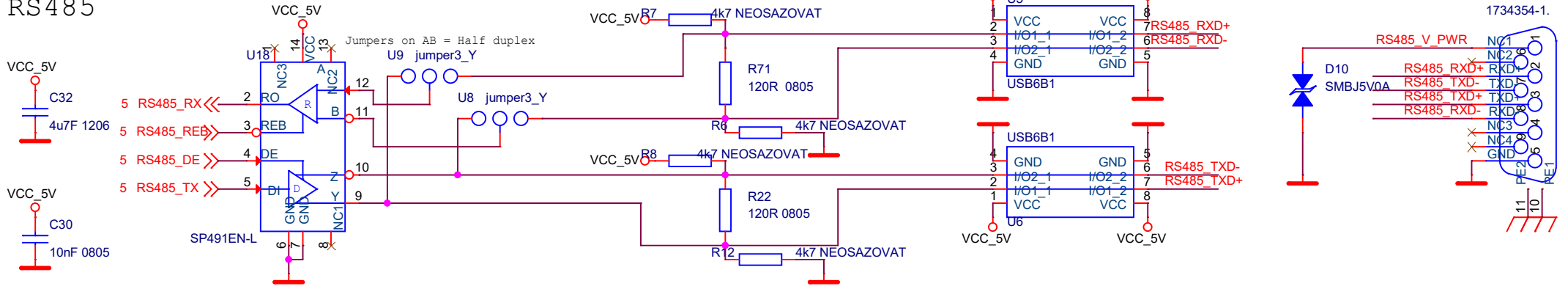
Display connector



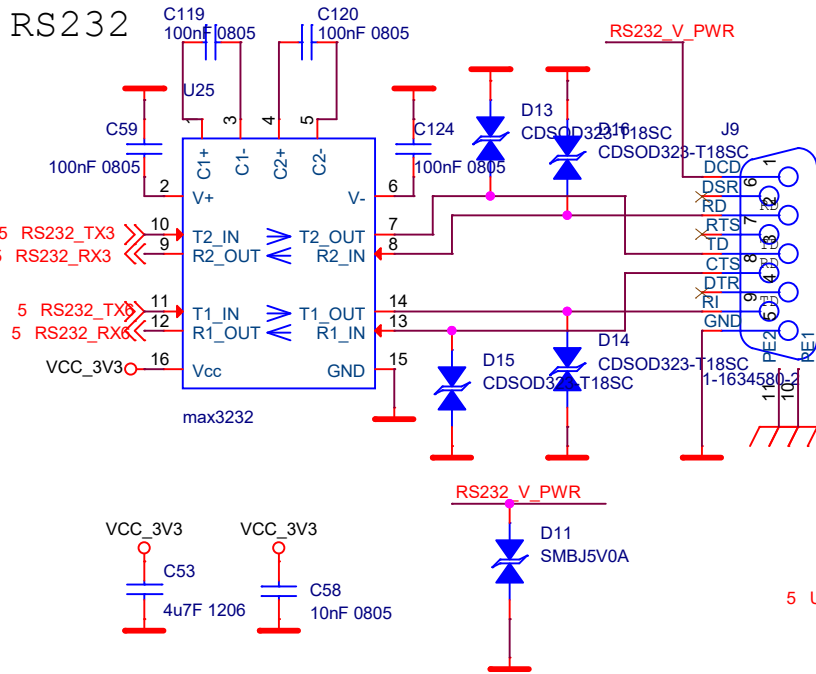
MOLEX 54104-5033

Title		
Display and touch controller connector		
Size	Document Number	Rev
A4	datalogger_stoljaku.dsn	1.0
Date:	Thursday, January 07, 2016	Sheet 7 of 8

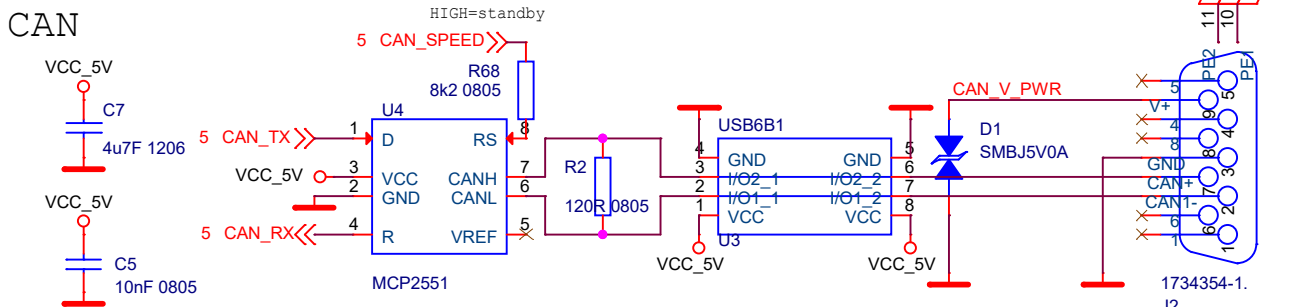
RS485



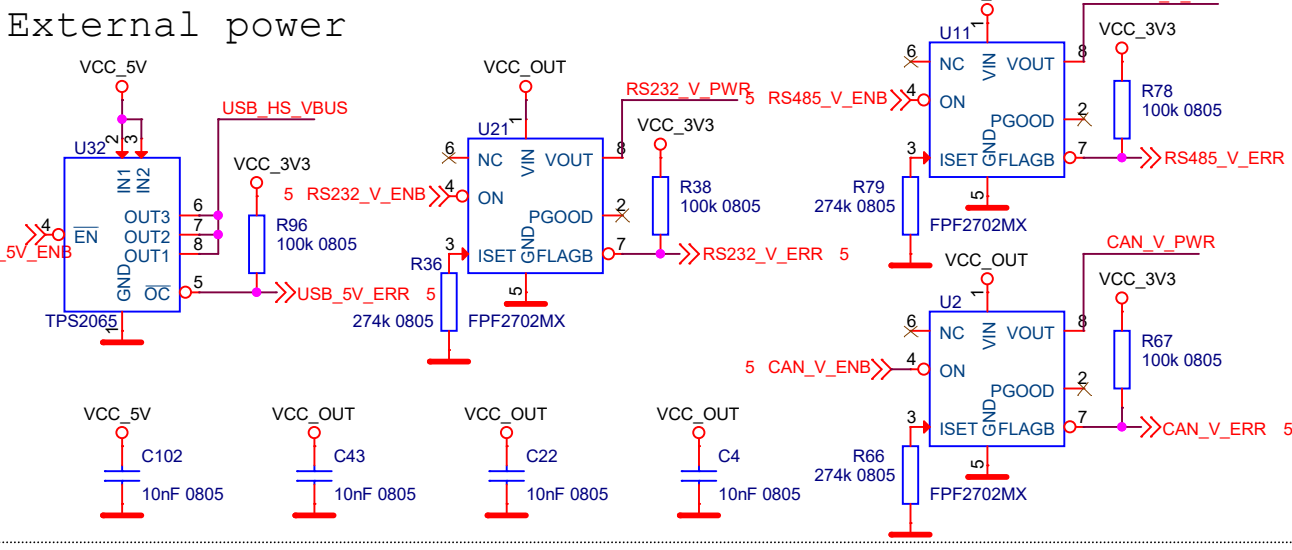
RS232



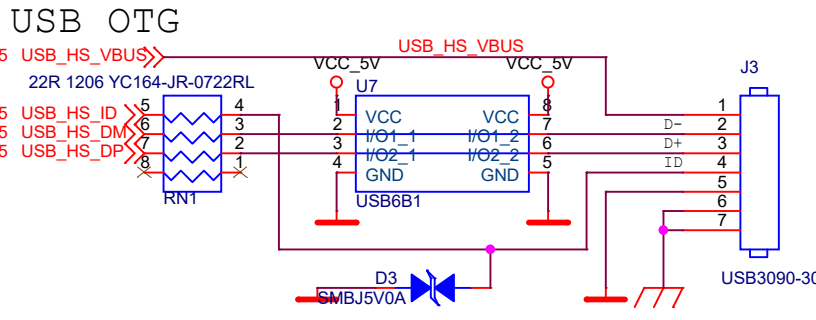
CAN



External power

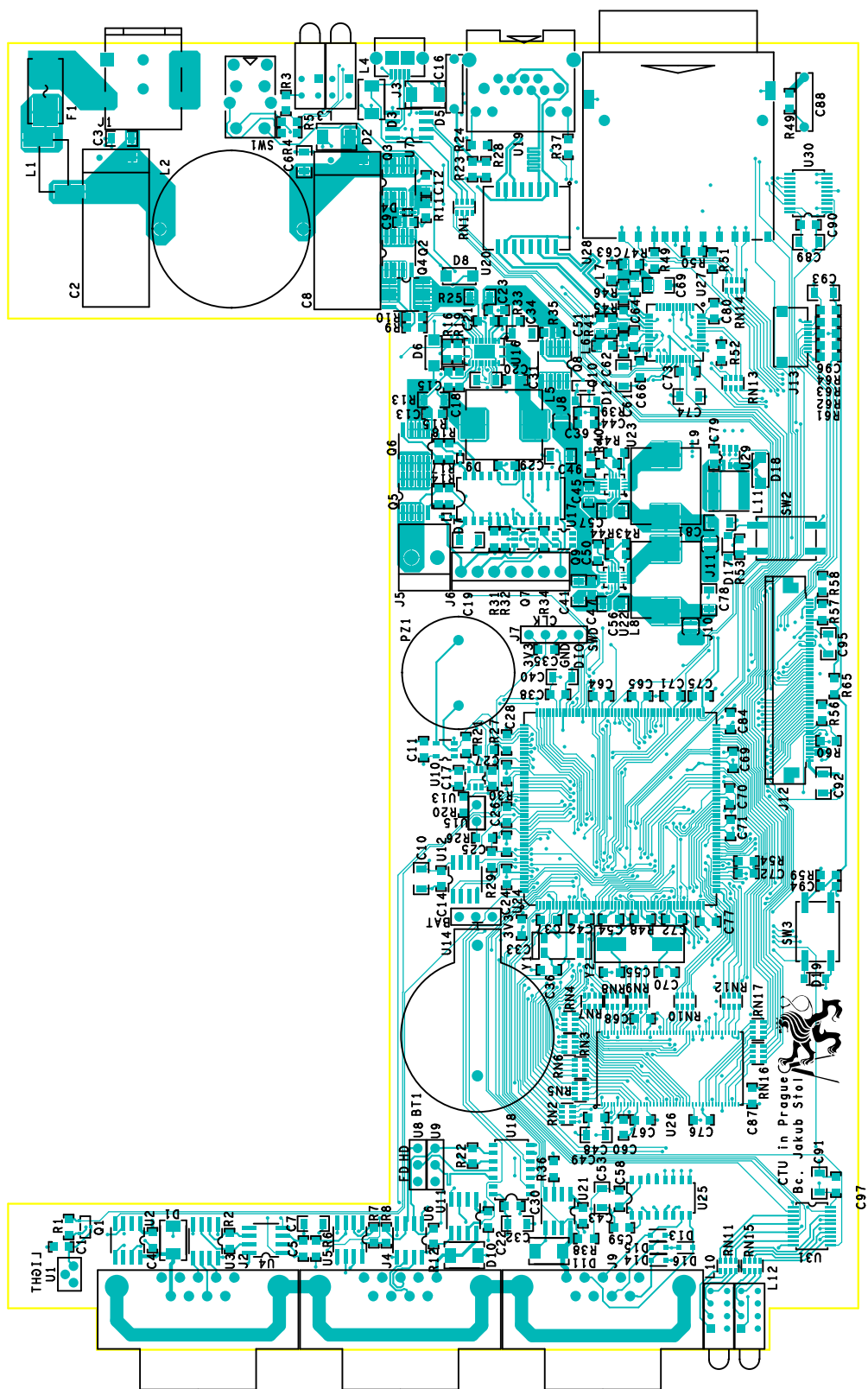


USB OTG



Title		
RS232, RS485, CAN and USB peripherals		
Size	Document Number	Rev
A4	datalogger_stoljaku.dsn	1.3
Date:	Saturday, January 09, 2016	Sheet 8 of 8

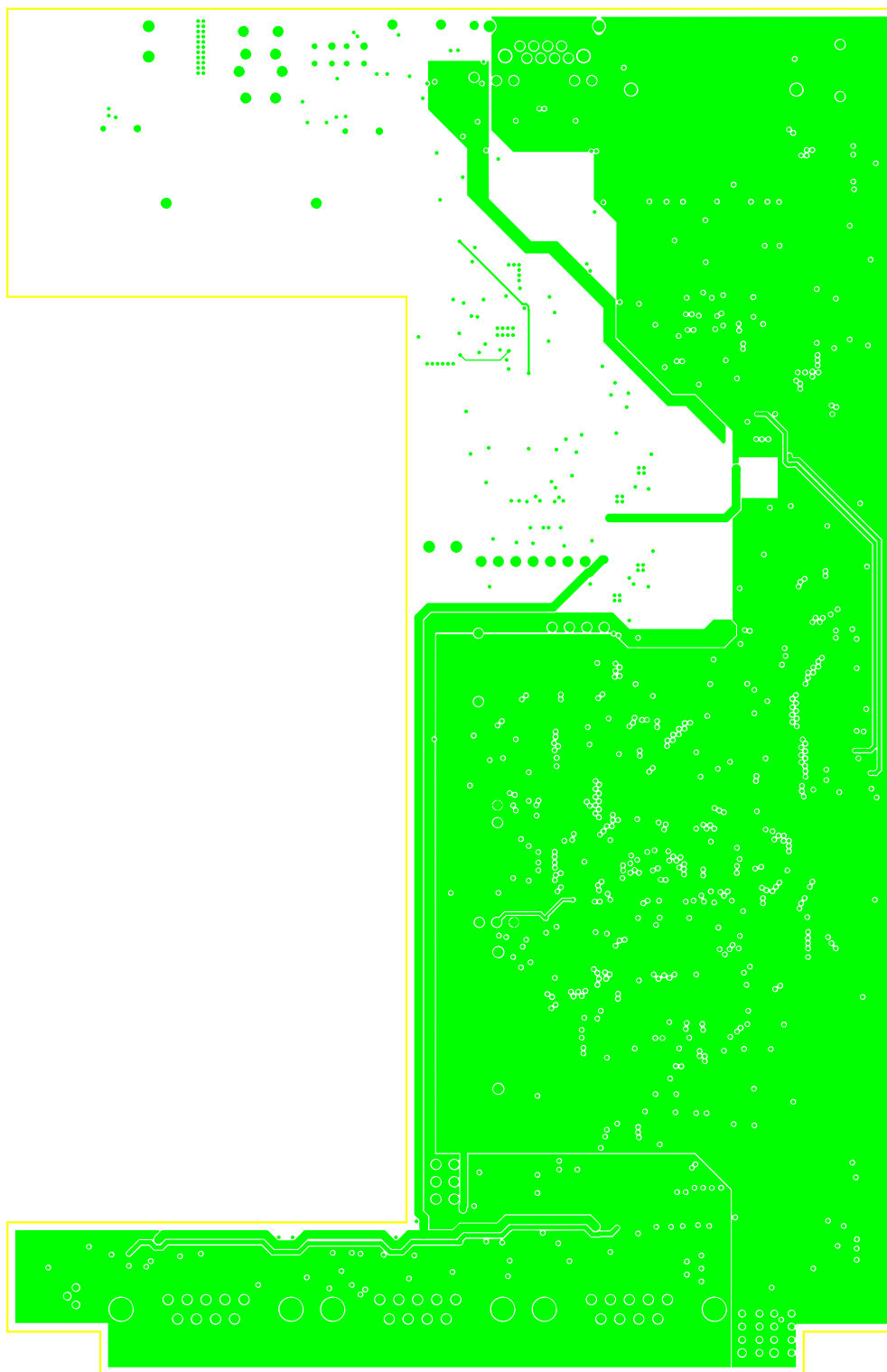
C Deska plošných spojů



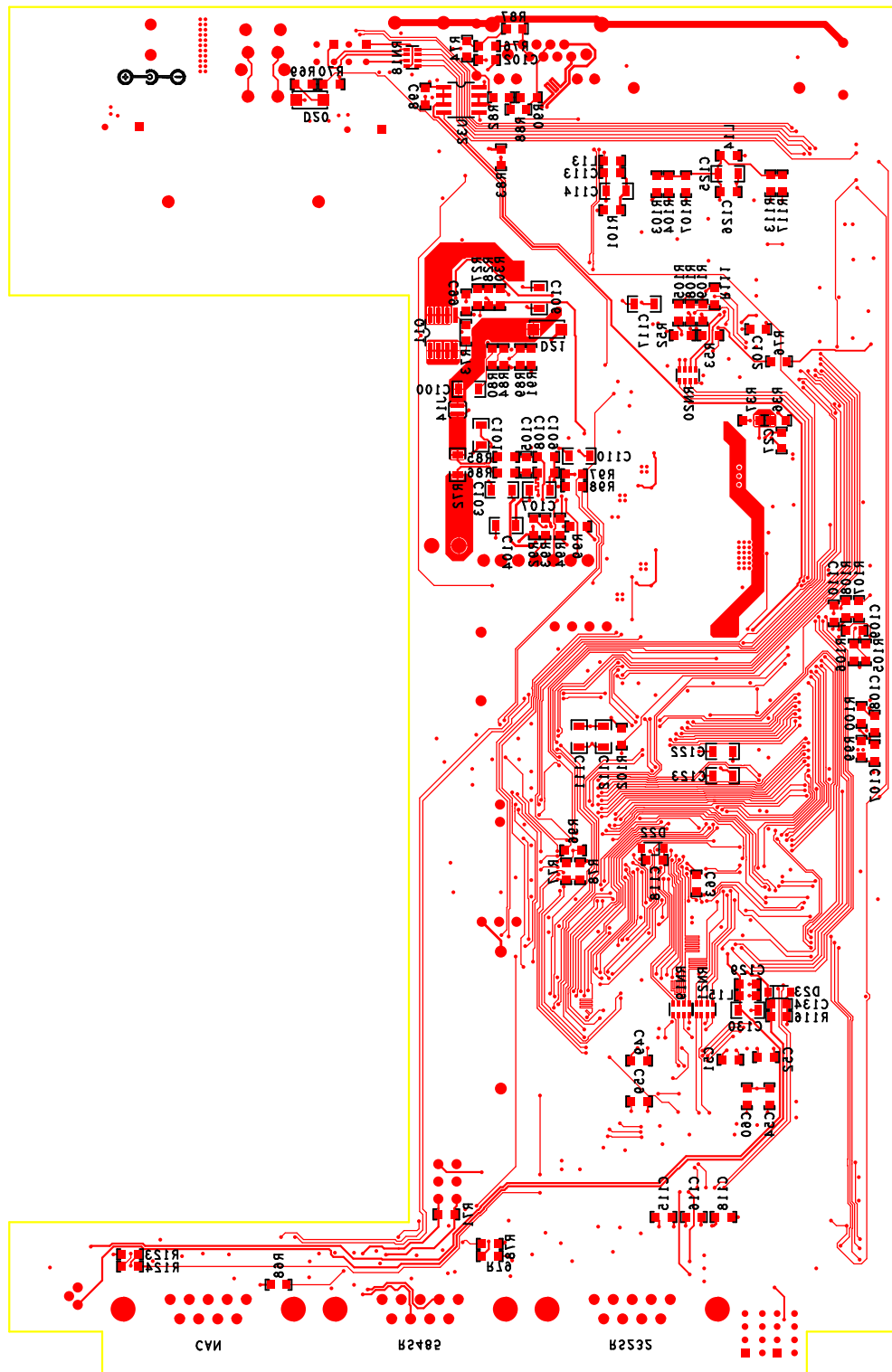
Obrázek C.1: Vrstva top a potisk vrchní vrstvy



Obrázek C.2: Vrstva IN2

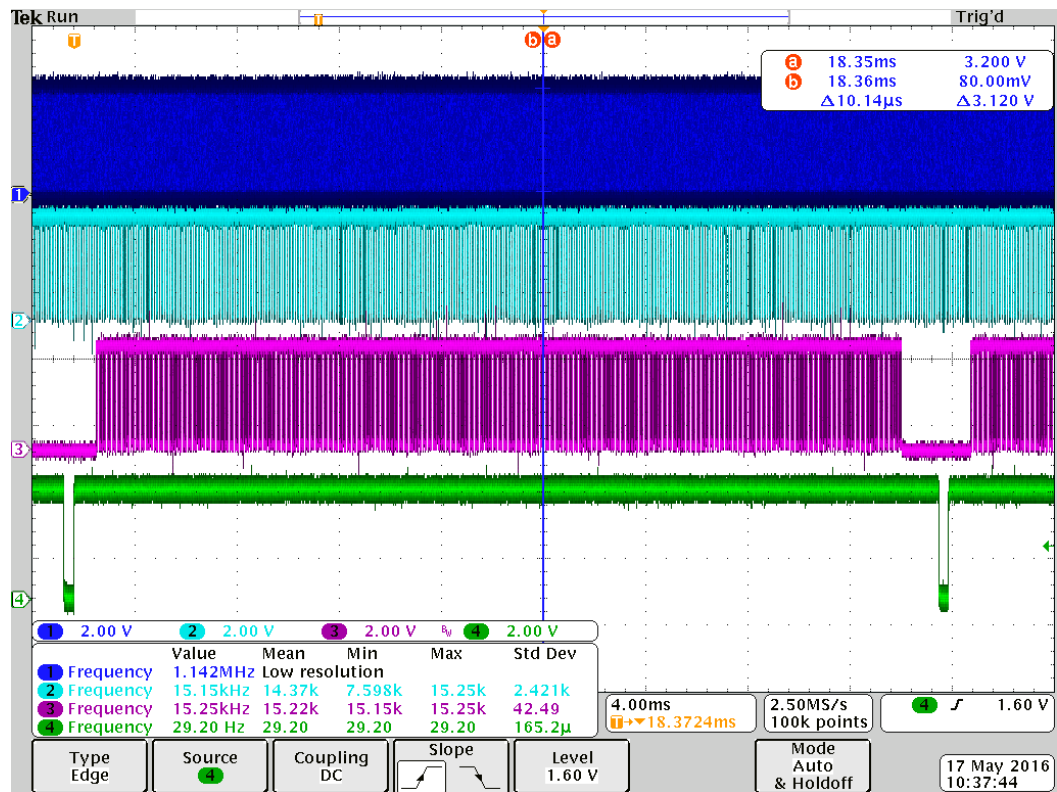


Obrázek C.3: Vrstva IN3



Obrázek C.4: Vrstva bot a potisk spodní vrstvy

D Graf vertikálního synchronizačního pulzu displeje



Obrázek D.5: Graf vertikálního synchronizačního pulzu displeje