

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Prototyp multikamerového detekčního zařízení v infraspéktru

Autor: Vít Skolil

Vedoucí práce: Ing. Jan Novák, Ph.D

Praha, 2019

Název práce: Prototyp multikamerového detekčního zařízení v infraskpektru

Autor: Vít Skolil

Katedra (ústav): Katedra mikroelektroniky

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Novák, Ph.D

e-mail vedoucího: novak@fel.cvut.cz

Abstrakt Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací prototypu multikamerového zařízení, které využívá dvě kamery pro infraskpektrum a dvě kamery pro viditelné spektrum. Jejím hlavním cílem je návrh centrální nosné desky plošných spojů. Softwarové řešení není součástí této práce. Jako řídicí jednotka prototypu slouží mobilní platforma v podobě SoM. Navrhovaná centrální nosná deska zajišťuje napájení systému pomocí PoE, převod na ostatní napěťové úrovně a připojení komunikačních periférií. Pro přenos obrazových dat slouží rozhraní Ethernet. V prvních kapitolách jsou podávány informace o základech bezdotykového měření teploty a principu technologie PoE. V druhé části tato práce popisuje návrh schématu a vysvětluje důvody zapojení jednotlivých obvodů.

Klíčová slova: Kamera, Termografie, SoM, PoE, DPS

Title: Multiple camera device for detection in infrared spectrum

Author: Vít Skolil

Department: The Department of Microelectronics

Supervisor: Ing. Jan Novák, Ph.D

Supervisor's e-mail address: novak@fel.cvut.cz

Abstract This Master Thesis is focused on the electrical design of the multicamera device which integrates two thermocameras and two cameras for visible spectrum. The main objective of this paper is PCB design of the central carrier board, the software solution is not included in the topic. A mobile platform in form of System on Module is used as a control unit of the system. The designed carrier board secures the power supply using the PoE technology and voltage level conversions. It also provides the connection with communication peripherals such as Ethernet interface used for the video transmission. The basic principles of thermography and PoE technology are introduced in the first chapters of this thesis. The following study is focused on the schematics design and on the explanation of used circuits.

Keywords: Camera, Thermography, SoM, PoE, PCB

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Janu Novákovi, Ph.D., za poskytnutá doporučení během zpracování této závěrečné práce. Chtěl bych také poděkovat společnosti Workswell s.r.o., která mi poskytla zázemí pro realizaci a osazení prototypu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 23. května 2019

Vít Skolil

Podpis:

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Skolil** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **406068**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Prototyp multikamerového detekčního zařízení v infraspéktru

Název diplomové práce anglicky:

Multiple camera device for detection in infrared spectrum

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s dostupnými SOM (System on module) umožňující enkodování video s rozlišením 4K a termovizním jádrem 384px OEM společnosti Workswell s USB komunikací [1-2].
- 2) Nalezte vhodnou OEM kameru pro viditelné spektrum s rozhraním MIPI, rozlišením alespoň 5 Mpx a autofokusem.
- 3) Navrhněte obvodové schéma a prototyp centrální DPS s obslužnými perifériemi. DPS bude napájena pomocí POE [3]. Centrální deska umožní propojení mezi vybraným SOM, dvěma termokamerami s USB, dvěma kamerami pro viditelné spektrum a rozhraními Ethernet, sériová linka RS485, SD karta a UART. Softwarové řešení není součástí této práce.
- 4) Ověřte funkčnost zařízení. Zhodnoťte dosažené výsledky. Diskutujte možnosti dalšího využití navrženého hardware.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Gelke H.J., Kammacher T., Rosenthal M., Mazlounian A. Using mobile processors for general purpose industrial signal processing. Embedded World, 2016
- [2] Loyd J.M. Thermal Imaging Systems. Springer, 2013
- [3] Mendelson G. All You Need To Know About Power over Ethernet (PoE) and the IEEE 802.3af Standard. PowerDsine Ltd., 2004

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Novák, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Jan Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Obsah

Abstrakt	ii
1. Úvod	1
2. Mobilní procesory pro průmyslové zpracování signálu	1
3. Bezkontaktní měření teploty	2
3.1. Parametry měření	2
3.2. Konstrukce termokamery	5
4. Power over Ethernet (PoE)	7
4.1. Komunikace mezi PoE zařízeními	7
4.2. Varianty propojení	9
5. Návrh multikamerového systému	11
5.1. Zvolený hardware	11
5.2. Napájení	15
5.3. Převodník PCIe-Ethernet	21
5.4. Připojení kamer	23
5.5. GSM modul	24
5.6. SD karta	26
5.7. RS-485	27
5.8. Digitální výstupy	28
5.9. Řízení relé	29
5.10. Galvanické oddělení	30
5.11. Nastavení bootovacího média	32
5.12. Zapojení ventilátoru	33
6. Návrh DPS	33
6.1. Rozmístění součástek	33
6.2. Návrh diferenciálních párů	36
6.3. Vedení napájení plochami	37
6.4. Připojení kamer	37
7. Závěr	40
Literatura	43
Seznam obrázků	44
Přílohy	45
A. Návrh DPS v KiCAD	45

1. Úvod

Termografie v současné době začíná hrát důležitou roli v oblasti požární prevence. Elektrická a mechnická zařízení se před svým selháním často zahřívají. Jelikož i malá porucha zařízení může v některých případech vést až k nebezpečí požáru, jsou některá riziková zařízení nepřetržitě monitorována termokamerami [1].

Vysoké nároky na požární bezpečnost jsou také kladeny na skladové oblasti, kde se uchovávají materiály, u kterých hrozí zvýšené nebezpečí vznícení. Mezi takové materiály lze řadit výbušniny, munici, některé baterie, odpad, uhlí a další. Při použití kouřových senzorů nemusí být dostatečné množství času pro zásah. Proto se v některých případech používají termokamery, jež neustále monitorují teplotu povrchu uloženého materiálu. Při nebezpečném zvýšení teploty je tak možné vyvolat poplach ještě dříve, než dojde ke generaci kouře [2].

Cílem této práce je navrhnout hardware prototypu multikamerového řešení, které využívá dvou termokamer a dvou kamer pro viditelné spektrum. Dvojice kamer budou ve výsledném produktu umístěny vedle sebe a natočeny tak, aby systém pokryl širší zorné pole. Kamery pro viditelné spektrum jsou zde proto, aby měl operátor vizuální přehled o situaci hlídáné oblasti.

Systém může přenášet obrazová data pomocí rozhraní Ethernet, nebo bezdrátově s využitím Wi-Fi. K signalizaci nebezpečí lze kromě těchto rozhraní použít také upozornění prostřednictvím GSM sítě, digitálních výstupů, nebo sběrnice RS-485. Prototyp bude vybaven obvody pro připojení záložního zdroje, který napájí systém při výpadku elektrické energie.

Jako řídicí jednotka navrženého prototypu bude použit mobilní procesor. O tomto typu procesorů pojednává následující sekce. V další části se práce zaměřuje na základy v oblasti bezkontaktního měření teploty a konstrukci termokamer. Vzhledem k tomu, že důležitou částí návrhu je napájení pomocí PoE, věnovali jsme této technologii také jednu sekci. V druhé části práce se zaměřuji na popis schématu zapojení, výběr součástek a návrh desky plošných spojů.

2. Mobilní procesory pro průmyslové zpracování signálu

S rostoucím počtem mobilních zařízení, jako například smartphony a tablety, se na trhu objevuje mnoho výkonných procesorů za poměrně příznivou cenu. Tyto procesory lze s výhodou použít i v průmyslu pro zpracování signálu, počítačové vidění nebo enkódování videa. Díky optimalizaci pro zpracování obrazu začaly v těchto aplikacích mobilní procesory konkurovat FPGA a ASIC platformám [3].

Dnešní mobilní procesory mají často čtyři a více výpočetních jader a fungují na frekvenci v řádu jednotek GHz. Některé architektury využívají dva oddělené procesory. „Větší“ procesor se používá jen pokud je potřeba vysoký výkon a „menší“ při jednodušších operacích pro nižší spotřebu energie. Příkladem je společné použití čtyřjádrových procesorů ARM-A57 a ARM-A53 [3].

Kamery se k mobilním procesorům většinou připojují pomocí rozhraní MIPI (Mobile Industry Processor Interface) CSI (Camera Serial Interface). MIPI CSI při použití fyzické vrstvy D-PHY přenáší obraz prostřednictvím čtyř datových diferenciálních párů vodičů. Komunikace je synchronní a jednosměrná. Novější verze MIPI CSI-2 poskytuje celkovou rychlost až 18 Gbit/s [4].

SoM - System on Module

Vzhledem k tomu, že propojení procesoru s kritickými komponentami klade vysoké nároky na kvalitu provedení, prodávají se SoM - systémy na modulu. Díky SoM nemusíme navrhovat propojení procesoru s RAM, vnitřní pamětí nebo Wi-Fi rozhraním. Jde vlastně o počítač v podobě malého modulu, který můžeme připojit na nosnou desku, propojující systém s perifériemi a napájecími obvody. Výhodou použití SoM je to, že nosnou desku si můžeme navrhnout sami a přizpůsobit svým požadavkům [5].

3. Bezkontaktní měření teploty

Povrchová teplota lze bezdotykově měřit za použití infračervené termografie. Tento obor je založený na skutečnosti, že každé těleso s teplotou nad 0 K vyzařuje elektromagnetické záření. K tepelnému záření dochází v důsledku tepelného pohybu částic hmoty.

Při bezdotykovém měření teploty měříme elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4-15 μm . Tyto vlnové délky spadají do infračerveného spektra a částečně přesahují do viditelné oblasti. Díky detekci záření na těchto vlnových délkách jsme schopni měřit teploty v rozmezí od -60 °C do 6000 °C [6].

3.1. Parametry měření

Teplota měřeného povrchu se vypočítává z rovnice termografie. V této rovnici figurují následující parametry [6]:

- Emisivita měřeného povrchu
- Odražená zdánlivá teplota
- Atmosférická teplota
- Relativní atmosférická vlhkost
- Vzdálenost mezi přístrojem a měřeným povrchem

Termokamery musí vždy umožňovat nastavení emisivity a odražené zdánlivé teploty. U lépe vybavených termokamer lze pak nastavit i parametry atmosféry a vzdálenost měření. Platí zde, že vliv parametrů atmosféry roste s rostoucí vzdáleností od měřeného povrchu. Při vzdálenostech v řádu jednotek metrů je možné vliv atmosféry často zanedbat [7].

Emisivita

Emisivita je bezrozměrný parametr vyjadřující schopnost měřeného povrchu vyzařovat tepelné záření. Hodnota emisivity se pohybuje mezi 0 (zcela nevyzařující povrch) a 1 (povrch absolutně černého tělesa). Čím je emisivita vyšší, tím více tepelného záření povrch při své teplotě vyzáří. Emisivita není pro daný povrch konstantní, ale je závislá na teplotě, vlnové délce záření a úhlu měření [8].

Na obrázku 1 můžeme vidět termogram zatepleného panelového domu, na kterém je sprejem namalovaný nápis. Na snímku se zdá, že místa s nápisem jsou výrazně chladnější než okolní povrch. Tato chyba měření je dána rozdílnou emisivitou barev nápisu oproti barvám omítky.



Obrázek 1: Chyba měření teploty způsobena rozdílnou emisivitou povrchů [7]

Odražená zdánlivá teplota

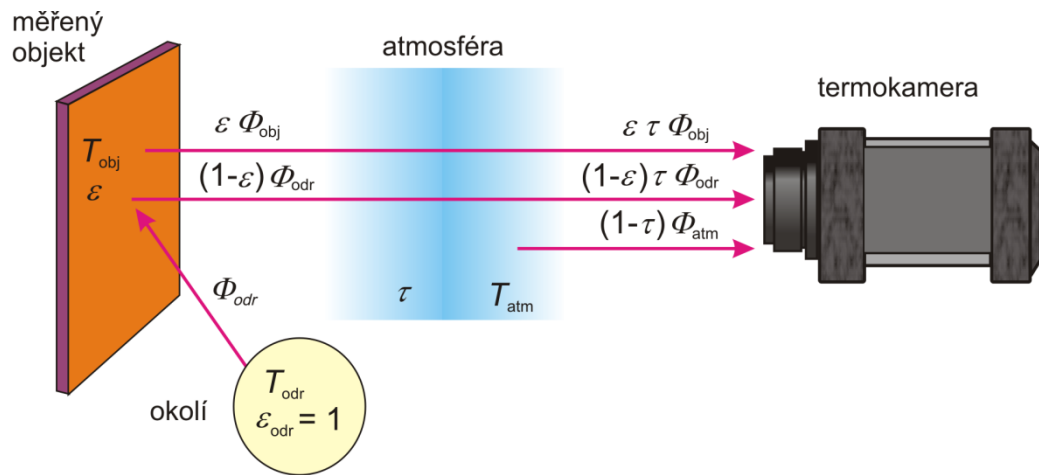
Parametr úzce souvisí s emisivitou a odrazivostí povrchu. U dokonale nepropustného povrchu platí vztah 1, kde ρ je odrazivost a ε je emisivita povrchu. Ze vztahu vyplývá, že vliv odražené zdánlivé teploty na měření se zvyšuje s klesající emisivitou povrchu. Při měření teploty povrchu s nízkou emisivitou tak může nastat problém, že odražený zářivý tok je až řádově vyšší, než vlastní zářivý tok měřeného povrchu. Díky tomu není v praxi možné měřit teplotu povrchů s vysokou odrazivostí. Jedinou alternativou je modifikace povrchu nanesením pásy, nebo nátěru s dostatečně vysokou emisivitou [6].

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (1)$$

Vliv atmosféry na měření

Čím je vyšší relativní vlhkost atmosféry a vzdálenost měření, tím více atmosféra utlumuje tepelné záření. Atmosféra je také sama zdrojem tepelného záření, které je závislé především na teplotě a složení atmosféry [8].

Při stanovení parametrů atmosféry se většinou uvažuje homogenní teplota, normální atmosférický tlak a běžné chemické složení bez přítomnosti dalších příměsí. Výjimkou může být měření v prostorách, kde se ve vzduchu nachází mnoho prachových částic, které způsobují útlum procházejícího záření a navíc samy generují tepelný tok [6].



Obrázek 2: Celková intenzita tepelného záření zaznamenaná termokamerou [7]

- T_{obj} - teplota měřeného objektu
- ε - emisivita měřeného objektu
- $(1 - \varepsilon)$ - odrazivost měřeného objektu
- Φ_{obj} - zářivý tok z měřeného objektu
- Φ_{odr} - odražený zářivý tok z okolních zdrojů
- T_{odr} - teplota okolních zdrojů záření
- ε_{odr} - emisivita okolních zdrojů záření
- Φ_{atm} - zářivý tok emitovaný atmosférou
- T_{atm} - teplota atmosféry
- τ - propustnost atmosféry

Rovnice termografie

Na základě parametrů popsaných v této kapitole můžeme vypočítat výslednou intenzitu tepelného záření, jež je zaznamenáno termokamerou. Situaci popisuje obrázek 2. Jednotlivé složky výsledné intenzity jsou: [6]:

- Zářivý tok z měřeného objektu zeslabený průchodem atmosférou: $\varepsilon\tau\Phi_{obj}$
- Odražený zářivý tok z okolních zdrojů: $(1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr}$
- Zářivý tok emitovaný atmosférou: $(1 - \tau)\Phi_{atm}$

Pokud sečteme tyto složky, dostaneme výslednou rovnici číslo 2, kterou označujeme jako rovnici měření termokamerou. Zářivý tok můžeme vyjádřit jako součin intenzity vyzařování M a vyzařovací plochy S (rov. 3). Intenzita vyzařování je pak podle Stefanova-Boltzmannova zákona úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty povrchu, což popisuje vztah 4. Po dosazení vyjádřené intenzity vyzařování za zářivý tok dostaneme rovnici termografie (rov. 5).

$$\Phi_{celk} = \varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau\Phi_{odr} + (1 - \tau)\Phi_{atm} \quad (2)$$

$$\Phi = MS \quad (3)$$

$$M = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (4)$$

$$M_{celk} = \varepsilon\tau\sigma T_{obj}^4 + (1 - \varepsilon)\tau\sigma T_{odr}^4 + (1 - \tau)\sigma T_{atm}^4 \quad (5)$$

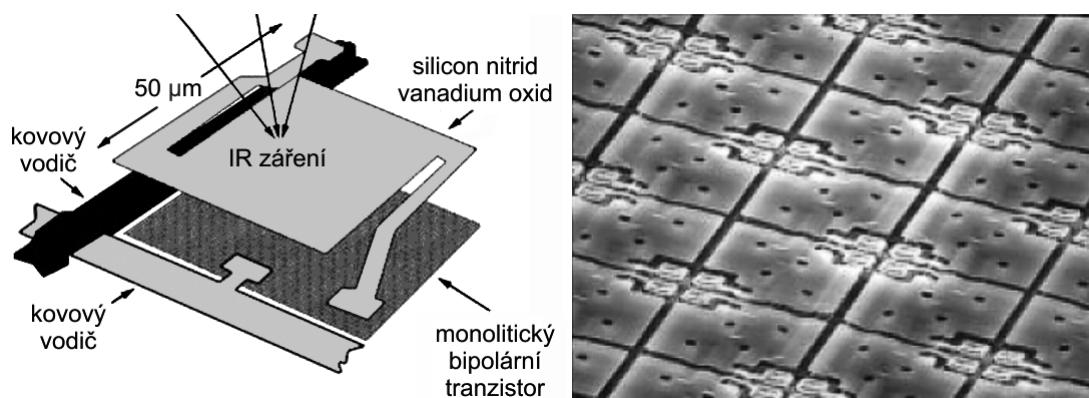
3.2. Konstrukce termokamery

Uspořádání termokamery se podobá uspořádání klasické kamery, nebo fotoaparátu. Tepelné záření je pomocí objektivu směřováno na detektor, který informaci o detekovaném záření digitalizuje a převede na tzv. termogram. Optika termokamery funguje často jako filtr, jenž propouští pouze záření požadovaných vlnových délek. U termokamer snímajících vlnové délky mezi 8-14 μm se proto objektivy vyrábí z germánia a jsou opatřeny tenkou antireflexní vrstvou, zabráňující odrazu infračerveného záření. Dopadající paprsky se soustřeďují na detektor, který je potřeba udržovat při stejné teplotě například Peltierovým článkem. Podle principu fungování můžeme detektory rozdělit na tepelné a fotonové [6].

Tepelné detektory

Zástupcem tepelných detektorů je mikrobolometr znázorněný na obrázku 3. Tyto senzory fungují jako miniaturní teploměry, měnící svůj elektrický odpor v závislosti na velikosti intenzity elektromagnetického záření. Abychom zajistili, že teplota mikrobolometru bude úměrná pouze absorbovanému záření, musíme detektor tepelně izolovat od svého okolí. K tomu se využívají například vakuovaná pouzdra [9].

Mikrobolometrické pole se skládá z malých bolometrických detektorů uspořádaných do matice, které jsou citlivé na tepelné záření v širokém spektru vlnových délek. Dopad infračerveného



Obrázek 3: Vlevo konstrukce jedné mikrobolometrické buňky a vpravo snímek mikrobolometrického pole pořízený elektronovým mikroskopem [9]

záření na bolometr způsobí změnu elektrického odporu, jež je vyhodnocována výstupní elektronikou. Závislost elektrického odporu na teplotě $R(T)$ je dána teplotním koeficientem β , který je vyjádřený vzorcem 6 [10].

$$\beta = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \quad (6)$$

Mikrobolometrická pole bývají dnes vyrobena na monolitických křemíkových substrátech, což umožňuje použití podobných výrobních technologií jako při výrobě integrovaných obvodů. Struktura detektoru se většinou vyrábí z amorfního křemíku, nebo oxidu vanadičného. Snímač má můstkovou strukturu pro zajištění dobré tepelné izolace mezi vlastním mikrobolometrem a křemíkovým substrátem. Můstky jsou pokryté teplotně citlivým odporovým materiálem. Kvůli zlepšení účinnosti snímače se na substrát nanáší reflexní vrstva, která odráží neabsorbované záření zpět k bolometru. Kromě snímače se na čipu vyskytuje také čtecí elektronika a pomocné obvody. Vzhledem k jejich relativně nízké ceně jsou mikrobolometrické senzory u termokamer v současné době nejrozšířenější [9].

Fotonové detektory

Fotonové detektory jsou založeny na ovlivňování nosičů elektrického náboje dopadajícími fotony infračerveného záření. Tyto detektory jsou citlivější, ale většinou potřebují chlazení a fungují jen v úzkém spektru vlnových délek [10].

Mezi fotonové detektory řadíme fotodiody a fotoodpory. Narozdíl od tepelných detektorů nefungují na principu přeměny záření na teplo, ale na principu vnitřního fotoelektrického jevu. Fotony s dostatečnou energií generují volné nosiče elektrického náboje, jež lze detekovat jako elektrický proud. Tyto nosiče elektrického náboje se generují pouze v případě, kdy je energie dopadajících fotonů vyšší než excitační energie přechodu mezi valenčním a vodivostním pásem. Protože energie fotonů je závislá na vlnové délce záření, je spektrální citlivost fotonových detektorů omezena kritickou vlnovou délkou λ_k [10]. Vzorec 7 popisuje závislost excitační energie detektoru na vlnové délce. Kritická vlnová délka je pak vyjádřena vzorcem 8. c představuje rychlost světla ve vakuu a h Planckovu konstantu.

Vzhledem k vysokému vlastnímu tepelnému šumu polovodiče by byl signál fotodetektoru za pokojové teploty velmi malý. Fotonové detektory musí proto pracovat při kryogenních teplotách, aby se šum minimalizoval [9].

$$\Delta E = hf_k = \frac{hc}{\lambda_k} \quad (7)$$

$$\lambda_k = \frac{hc}{\Delta E} \quad (8)$$

4. Power over Ethernet (PoE)

Pod zkratkou PoE se skrývá technologie, umožňující napájení zařízení pomocí CAT-5 Ethernetové infrastruktury. Zařízení, která komunikují pomocí rozhraní Ethernet, tak nemusí být v dosahu napájecí sítě. Technologie přenáší stejnosměrné napětí pomocí nestíněné kroucené dvoulinky. PoE se hojně využívá u síťových prvků jako LAN přístupové body, IP telefony, nebo bezpečnostní kamery. Power over Ethernet odpovídá specifikacím IEEE 802.3af, IEEE 802.3at a IEEE 802.3bt. Tyto druhy se liší především velikostí výkonu, jenž je PoE schopný přenést [11].

4.1. Komunikace mezi PoE zařízeními

Rozlišujeme dva typy PoE zařízení. První typ tvoří řídicí prvek PoE a funguje jako napájecí zdroj, neboli PSE (Power Sourcing Equipment). Druhým typem je zdroj napájeného spotřebiče, neboli PD (Powered Device). Tyto dvě části spolu musí komunikovat, aby byl zajištěn dostatečný přísun proudu a ochrana obou zařízení [12].

PSE a PD

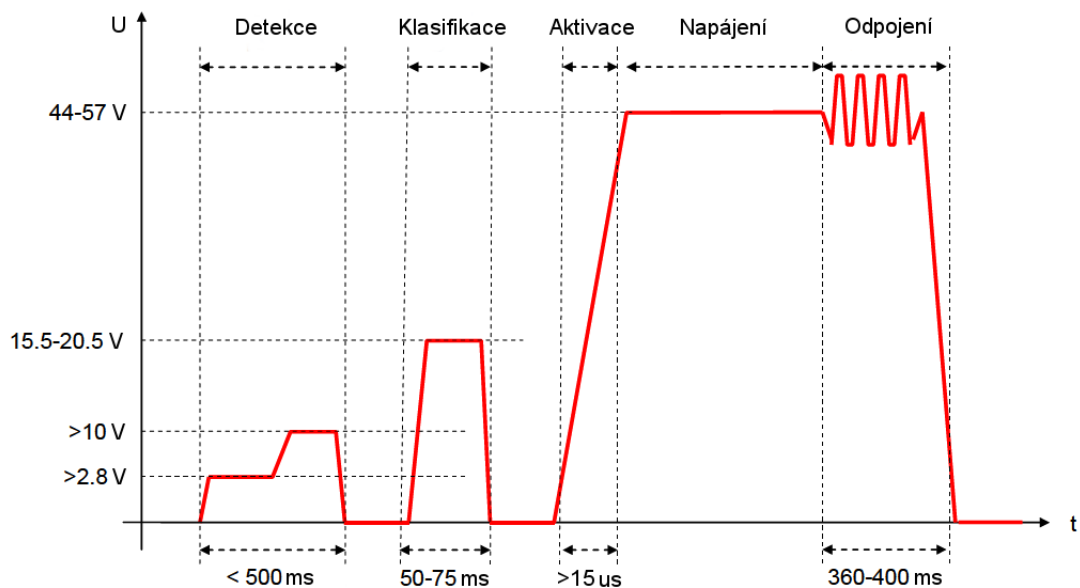
PSE jsou zařízení fungující jako zdroje napájení. Jejich úkolem je také řízení komunikace s PD a podle toho přidělování dostatečného výkonu. Rozdělujeme je podle umístění v síti:

- Endspan PSE je většinou síťový přepínač (switch) podporující PoE
- Midspan PSE bývají PoE injektory, které je možné umístit za přepínače nepodporující PoE

Mezi PD řadíme zařízení, která odebírají výkon, nebo žádají napájení z PSE. Úkolem PD je identifikace na základě požadavků PSE a také zapínání a vypínání spotřebiče [11].

PSE a PD spolu komunikují v analogové rovině. Komunikace probíhá v následující sekvenci. Na obrázku 4 můžeme vidět, že jednotlivé kroky se liší rozsahem napětí na vstupu PD:

1. Detekce zařízení
2. Určení výkonové třídy
3. Aktivace napájecího zdroje
4. Provozní režim



Obrázek 4: Sekvence při startu PoE napájení[11]

Detekce zařízení

PSE použít do obvodu napětí 2,8-10 V a testuje přítomnost rezistoru s odporem 25 k Ω mezi vstupními signály PD. Rezistor se zapojuje hned za usměrňovací můstek, nebo může být součástí integrovaného obvodu, který řeší veškeré funkce PD. Zatěžovací kapacita musí být nižší než 120 nF a délka měření nesmí překročit 500 ms [12].

Určení výkonové třídy

PSE měří proud, který teče ze zdroje při napětí 15,5-20 V. Na základě naměřeného proudu zařadí PD do jedné z tříd, jež se liší maximálním dodávaným výkonem. Při proudu pod 4 mA je zařízení považováno za neznámé a při proudu nad 44 mA je považováno za nepovolené a proces spouštění se vrací do bodu detekce zařízení [11].

Aktivace PD

Po zjištění výkonové třídy se zvýší napětí na hodnotu 30-44 V. Tato hodnota je signálem pro PD, aby uvolnil výstup napájecího napětí dále do obvodu. Během aktivace se může nabít překlenovací kondenzátor umístěný mezi PD a DC-DC konverterem[12].

Provozní režim

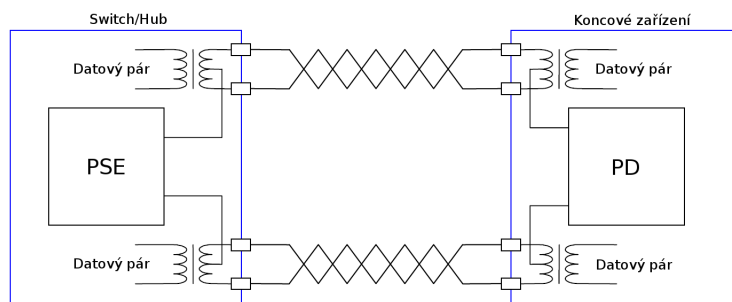
Po ukončení aktivační fáze poskytne PSE plné napájecí napětí 44-57 V. Pokud odběr zařízení přesáhne proudovou mez na delší dobu než 50 ms, PSE odpojí napájení na 3-5 s. Druhou možností, kdy PSE přeruší napájení je při poklesu odebíraného proudu pod 10 mA, protože PSE vyhodnotí tento stav jako odpojení spotřebiče [11].

4.2. Varianty propojení

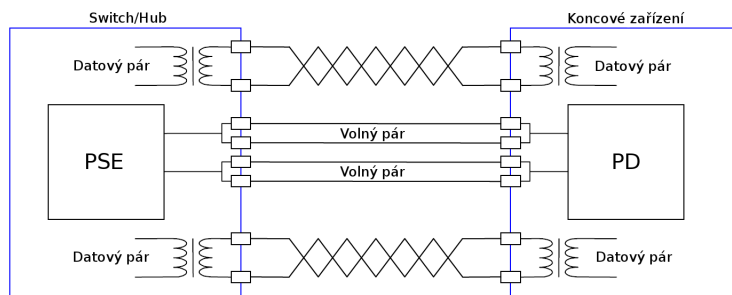
Gigabitový Ethernet přenáší signály pomocí čtyř kroucených párů, které jsou připojeny na signálové transformátory na obou koncích vodičů. U těchto transformátorů je vždy vyvedený střed vinutí, jenž je podle specifikace ethernetu propojený se zemí zařízení. Pokud však na jedné straně vedení přivedeme na střed vinutí stejnosměrné napětí, znamená to, že to samé napětí se objeví i na středu vinutí na druhém konci vedení. Další výhodou je to, že pro datový přenos je vždy potřeba dvou párů vodičů, takže máme vždy k dispozici dva oddělené středy vinutí, které můžeme použít pro obě polaridy napájení [13].

První možnost jak přenášet napětí je tedy po datových signálech, kdy vyvedeme středy vinutí u PSE a PD. Zapojení můžeme vidět na obrázku 5. Druhá možnost představuje využití dvou volných párů vodičů, kde se vodiče v každém páru propojí (obrázek 6). Nevýhodou této varianty je, že se nedá použít u gigabitových sítí, kde se využívají všechny datové páry.

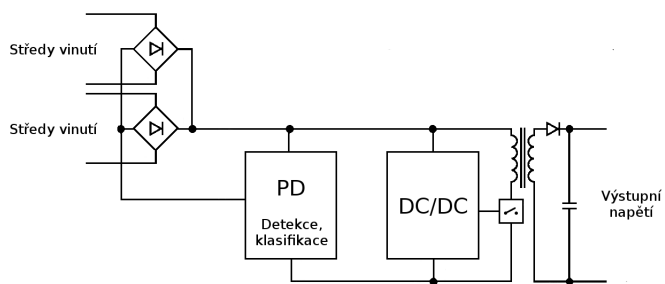
Vzhledem k tomu, že napájecí napětí PoE kolísá kolem 48 V, používá se většinou DC/DC regulátor za PD obvodem. Některé PD čipy v sobě regulátor dokonce obsahují. Blokové schéma zapojení PoE na straně spotřebiče můžeme vidět na obrázku 7.



Obrázek 5: Přenos napětí po datových párech [11]



Obrázek 6: Přenos napětí po volných párech [11]



Obrázek 7: Blokové schéma zapojení napájecího obvodu spotřebiče

5. Návrh multikamerového systému

V následující části je popsán návrh schématu zapojení centrální nosné desky, jež propojuje SoM, všechny kamery a použité periférie.

5.1. Zvolený hardware

Na základě výkonu, velikosti, ceny a dostupných rozhraní jsme se rozhodli pro SoM od společnosti Inforce Computing s názvem 6601 μ SOM. Platforma je založena na mobilním procesoru Qualcomm Snapdragon 820 (APQ8096). Tento mobilní procesor jsme si vybrali pro jeho schopnost enkódovat 4K video a možnost připojení kamer pomocí rozhraní MIPI CSI. Fotografie SoM můžeme vidět na obrázcích 8 a 9.

Parametry SoM

Snapdragon 820

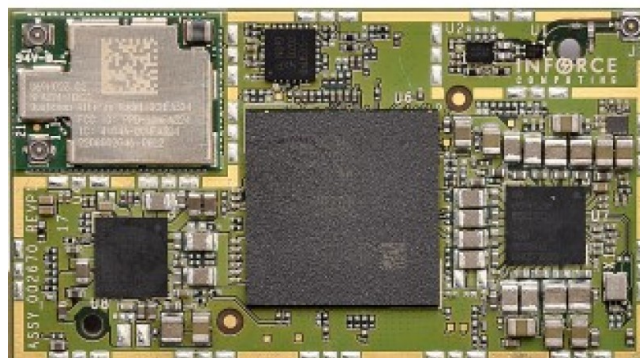
- Čtyřjádrový 64 bitový CPU ARMv8 složený ze dvou duálních částí - Gold na frekvenci 2,2 GHz a Silver na frekvenci 1,6 GHz
- GPU Adreno 530 s 64 bitovou adresací a podporou OpenGL ES 3.2, OpenCL 2.0 a Vulkan
- DSP Hexagon 680 s procesorem HVX-512 na frekvenci 825 MHz
- Duální 14 bitový ISP Spectra s propustností 1,2 Gpix/s
- 4 GB RAM
- Interní paměť UFS 2.0 s kapacitou 64 GB

Video podpora

- H.264 a H.265 dekodování videa 4K 60 fps
- H.264 a H.265 enkodování videa 4K 30 fps
- 2x MIPI DSI (4 linky) s podporou dotykového displeje
- HDMI 2.0
- 2x MIPI CSI (4 linky)

Audio podpora

- 4 výstupy a 3 vstupy
- Podpora MP3, AAC + eAAC, WMA 9/Pro, Dolby AC-3, eAC-3, DTS
- SLIMbus



Obrázek 8: Vrchní strana 6601 μ SOM [14]

Vysokorychlostní rozhraní

- USB 3.0
- USB 2.0 s podporou OTG
- PCIe

Bezdrátová rozhraní

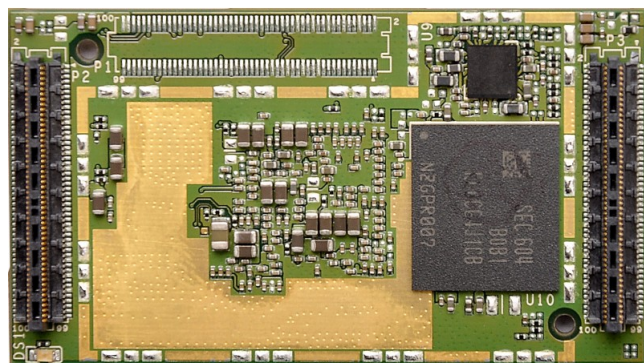
- WiFi 2,4 GHz/5 GHz
- Bluetooth 4.2LE
- GPS/GNSS

Ostatní rozhraní

- 12x BLSP pro UART/IIC/SPI
- 8x GPIO

Podpora OS

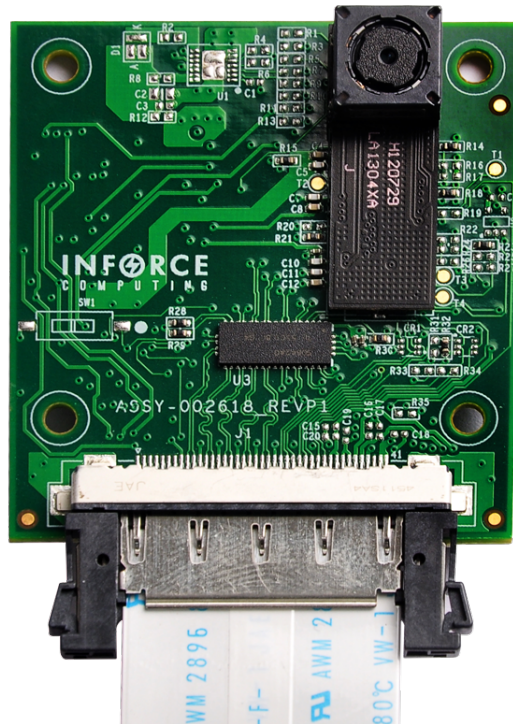
- Android Nougat
- Linux Debian



Obrázek 9: Spodní strana 6601 μ SOM [14]



Obrázek 10: Fotografie rozebrané termokamery



Obrázek 11: Snímač OV5640 s rozlišením 5 Mpx a autofokusem [15]

OEM kamery

Pro snímání obrazu v infraspéktru jsme použili OEM termovizní jádra společnosti Workswell. Jde o malé termokamery, umožňující připojení ke smartphonu pomocí USB konektoru typu C. Fotografie rozebrané kamery je na obrázku 10.

Zde je výčet důležitých parametrů:

- Rozlišení snímače 384x288 px
- Velikost pixelu 17 μm
- Spektrální rozsah 8-14 μm
- Frekvence snímání 25 Hz
- Bezkontaktní měření teplot v rozsahu -20 °C až 120 °C
- Přesnost měření teploty ± 2 °C, nebo ± 2 % z měřicího rozsahu
- Spotřeba nižší než 500 mW

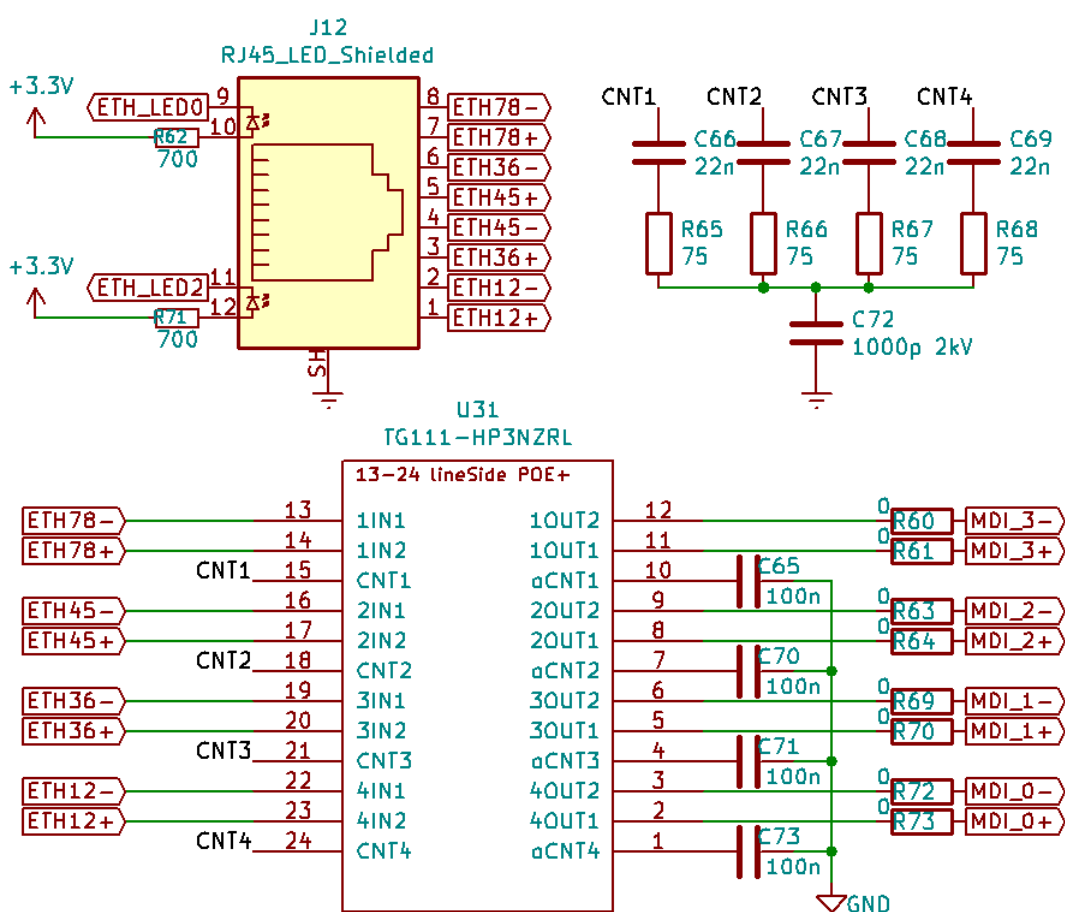
Kamery pro viditelné spektrum jsme volili se snímačem OV5640, protože pro tento senzor poskytuje výrobce SoM linuxové ovladače. Jde o 5 Mpx snímač s automatickým zaostřováním a velikostí pixelu 1,4 μm . Maximální přenosová rychlost činí při rozlišení 1080p 30 snímků za sekundu a při rozlišení 720p 60 snímků za sekundu [16]. Kamera s podpůrnými obvody od společnosti Inforce Computing je na obrázku 11.

5.2. Napájení

PoE

Kamerový systém je napájený pomocí aktivního PoE podle normy IEEE 802.3at, což umožňuje dodat maximální příkon 25.5 W. Navrhovaný kamerový systém podporuje gigabitový ethernet, takže počítáme s vedením napájení po datových párech. Jako PD čip jsme použili MP8008, který se stará o detekci a klasifikaci PoE a obsahuje také OLP¹, OVP² a ochrany proti zkratu. Zároveň funguje jako jádro flyback regulátoru, snižující napětí z 47 V na 5 V.

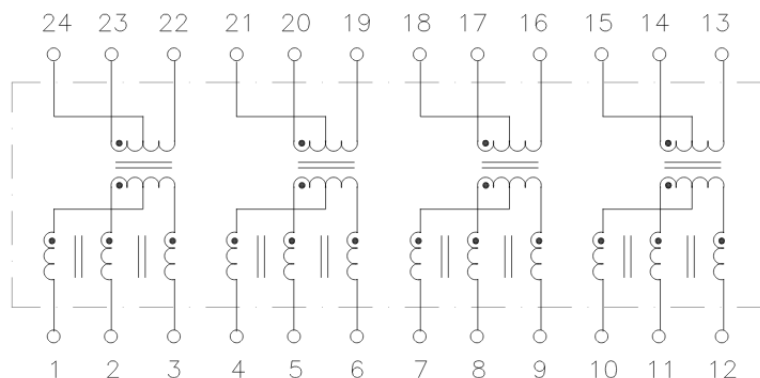
8 kontaktů ETH1 až ETH8 z RJ45 konektoru je připojeno do PoE transformátoru, který má vyvedené středy vinutí označené CNT1 až CNT4 (obr. 12). Vnitřní zapojení transformátoru můžeme vidět na obrázku 13. Středy vinutí jsem přivedl do můstkových usměrňovačů a dále do obvodu PD. Ethernetové signály pokračují dále do převodníku Ethernet-PCIe.



Obrázek 12: Zapojení PoE transformátoru

¹OLP je zkratka pro OverLoad Protection. Tyto obvody chrání elektroniku proti zvýšenému protékajícímu proudu, který by mohl způsobit přehřátí.

²OVP je zkratka pro OverVoltage Protection. Tato ochrana chrání elektroniku před přivedením vyššího napájecího napětí, než pro které je obvod navržen.



Obrázek 13: Vnitřní uspořádání PoE transformátoru

Schéma zapojení MP8008 a flyback regulátoru ukazuje obrázek 14. Vnější a vnitřní obvod jsme oddělili izolační bariérou a zpětná vazba napěťového regulátoru je propojena přes optočlen. Při návrhu schématu jsme vycházeli z doporučeného zapojení z katalogového listu MP8008, které jsme přizpůsobili naší aplikaci.

V první řadě jsme museli zvolit správný flyback transformátor. Poměr vinutí transformátoru by měl být takový, aby střída regulátoru (D) vycházela maximálně 45 % [17]. Střída lze vypočítat pomocí vztahu 9 kde N představuje poměr vinutí, U_1 vstupní napětí a U_2 výstupní napětí. Použili jsme transformátor s poměrem 1:0,14. Vstupní napětí dosahuje průměrně 47 V a výstupní napětí je regulováno na 5 V. Po dosazení do vzorce dostaneme střídu 43 %, což je vyhovující. Vybraný transformátor má kromě primárního a sekundárního vinutí také přidružené vinutí, jež přispívá k napájení čipu MP8008.

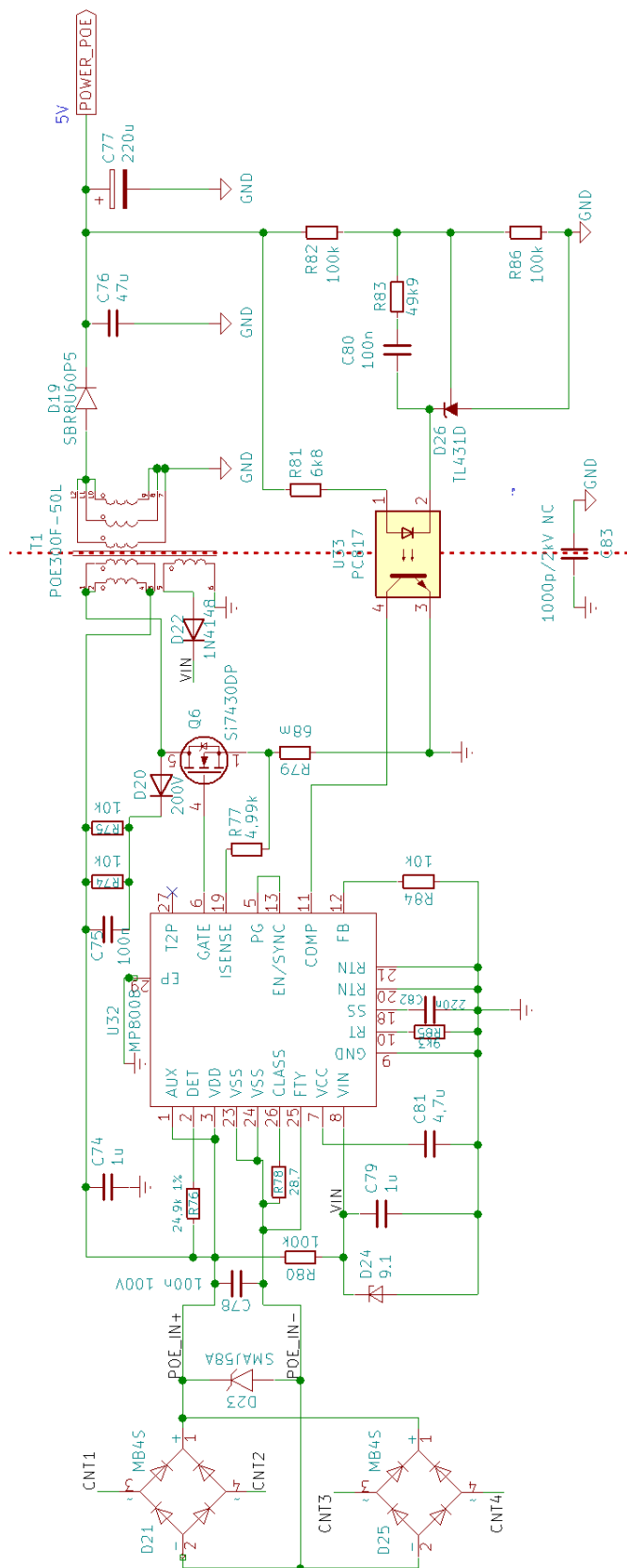
$$D = \frac{NU_2}{NU_2 + U_1} \quad (9)$$

$$D = \frac{\frac{1}{0,14}5}{\frac{1}{0,14}5 + 47} \approx 0,43 \quad (10)$$

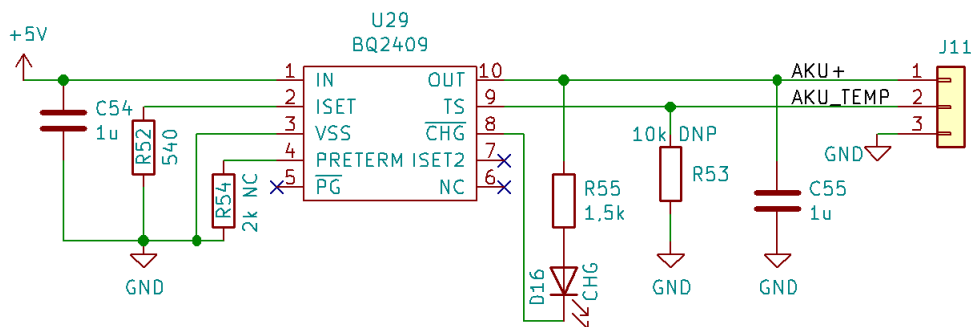
Výstupní napětí je kromě transformátoru ovlivněno také zpětnou vazbou, která využívá externího bočnickového regulátoru TL431. Pomocí dvou rezistorů lze nastavit výstupní napětí TL431 v intervalu od 2,5 V (referenční napětí) do 36 V. Toto napětí se vypočítá pomocí vzorce 11. V našem případě nastavíme rezistory tak, aby napětí na výstupu TL431 bylo 5 V. Obvod je navržen tak, že intenzita záření diody v optočlenu je přímo úměrná rozdílu výstupního napětí PoE od 5 V.

$$U = \left(1 + \frac{R_{82}}{R_{86}}\right) U_{ref} \quad (11)$$

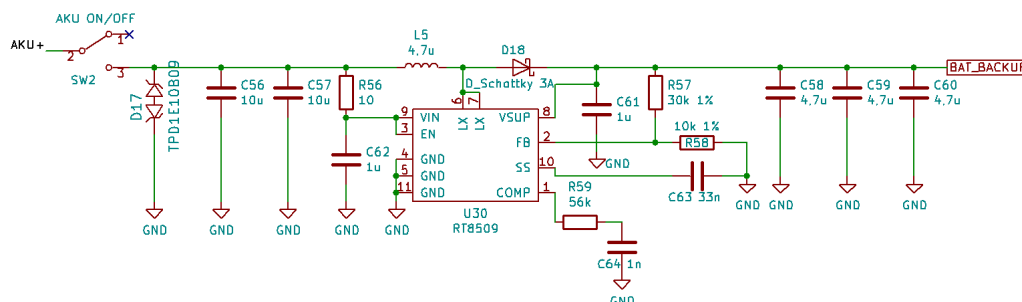
$$U = \left(1 + \frac{100\text{k}\Omega}{100\text{k}\Omega}\right) 2,5\text{ V} = 5\text{ V} \quad (12)$$



Obrázek 14: Zapojení MP8008 s flyback regulátorem



Obrázek 16: Nabíjecí obvod akumulátoru



Obrázek 17: Zapojení zvyšujícího regulátoru na 5 V

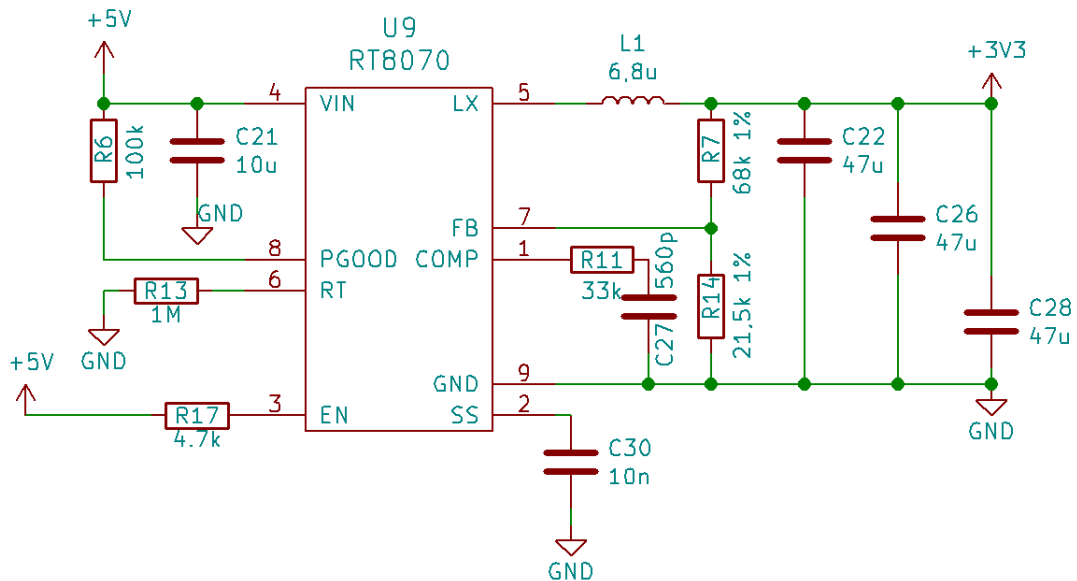
$$U_{out} = U_{ref} \left(1 + \frac{R_{57}}{R_{58}} \right) \quad (13)$$

Převod na ostatní napěťové úrovně

Pro správnou činnost navrhovaného systému je potřeba několik napěťových úrovní:

- 5 V - USB, digitální výstupy, řízení relé, RS485, ventilátor
- 3,8 V - napájení GSM modulu
- 3,3 V - napájení SoM, převodníku PCIe-Ethernet, EEPROM, kamery pro viditelné spektrum
- 2,85 V + 2,7 V + 1,05 V - kamery pro viditelné spektrum
- 1,8 V - napěťová úroveň GPIO pinů SoM a I/O pinů kamer pro viditelné spektrum

Pro převod napětí na 3,8 V a 3,3 V jsme použili spínaný regulátor RT8070 s maximálním výstupním proudem 4 A. Integrovaný obvod v sobě zahrnuje synchronní výkonové spínače, takže není potřeba výstupní Schottkyho dioda. Zapojení obvodu můžeme vidět na obr. 18. Výstupní napětí se vypočítá stejným způsobem jako u obvodu RT8509, pomocí vztahu 13.



Obrázek 18: Zapojení RT8070 pro výstupní napětí 3,3 V

RT8070 umožňuje nastavit svoji pracovní frekvenci. Zvolení pracovní frekvence je kompromisem mezi účinností a velikostí součástek. Použití nižších frekvencí zlepšuje účinnost snížením spínacích ztrát tranzistorů. Pro udržení malého zvlnění výstupního napětí je však nutné použít větší externí kapacitory a indukty [20]. Pracovní frekvence integrovaného obvodu se nastává hodnotou rezistoru, který je zapojený mezi pinem RT a zemí. V našem návrhu jsme použili hodnotu 1 M Ω , takže pracovní frekvence odpovídá přibližně 380 kHz.

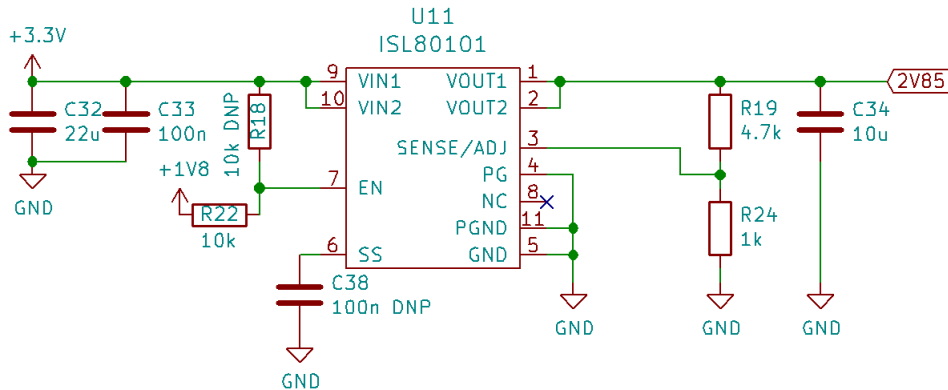
Hodnotu indukčnosti cívky jsme volili tak, aby se maximální zvlnění výstupního proudu pohybovalo v rozmezí 10-20 %. Potřebná indukčnost lze vypočítat podle vzorce 14, kde $\Delta I_{L(max)}$ představuje maximální zvlnění proudu protékajícího cívku a f je pracovní frekvence [20]. Po dosažení zvlnění 10 % dostaneme hodnotu 7,4 μH . Vzhledem k tomu, že cívka s takovou indukčností se obtížně shání, zvolili jsme hodnotu 6,8 μH , pro kterou vychází maximální zvlnění asi 11 %.

$$L = \frac{U_{out}}{f \cdot \Delta I_{L(max)}} \left(1 - \frac{U_{out}}{U_{in(max)}} \right) \quad (14)$$

$$L = \frac{3,3}{380 \cdot 10^3 \cdot 0,4} \left(1 - \frac{3,3}{5} \right) \quad (15)$$

$$L = 7,4 \mu\text{H} \quad (16)$$

Napěťové úrovně 2,85 V, 2,7 V a 1,05 V zajišťují lineární regulátory ISL80101, které jsou schopny dodat maximální proud 1 A. Obvody pro jednotlivá výstupní napětí se liší pouze hodnotami rezistorů ve zpětné vazbě obvodu. Zapojení ISL80101 popisuje obrázek 19. Enable pin integrovaných obvodů ISL80101 jsme připojili k napětí 1,8 V, které je poskytováno SoM. Máme tak zaručeno, že kamery pro viditelné spektrum se nezapnou dříve, než SoM.



Obrázek 19: Zapojení ISL80101 pro výstupní napětí 2,8 V

5.3. Převodník PCIe-Ethernet

Pro přenos dat z navrhovaného multikamerového systému můžeme použít buď rozhraní WiFi, nebo Ethernet. Protože byla však mobilní platforma Snapdragon 820 zamýšlena především pro mobilní telefony, nepočítalo se s použitím Ethernetu. Naštěstí disponuje použitý SoM vysokorychlostním rozhraním PCI Express, jež lze použít k připojení gigabitového Ethernetového kontroleru.

PCIe je sériová sběrnice, která využívá diferenciálních párů vodičů o vzájemné impedanci 100 Ω . Diferenciální přenos je použit pro jeho vyšší odolnost proti elektromagnetickému rušení. Pomocí dvou vodičů se přenáší stejný signál s opačnou polaritou. Obvody přijímače pak nevyhodnocují napětí mezi signálem a zemí, ale napětí mezi vodiči diferenciálního páru. Pokud působí vnější rušení na oba vodiče stejným způsobem, neovlivní to výsledný signál, jenž je dán rozdílem napětí datového páru.

Pro převod mezi PCIe a rozhraním Ethernet jsme použili kontroler 82574 od společnosti Intel. Tento integrovaný obvod jsme zvolili především pro jeho dostupnost a rozšířené ovladače. Na obrázku 20 můžeme vidět část zapojení kontroleru.

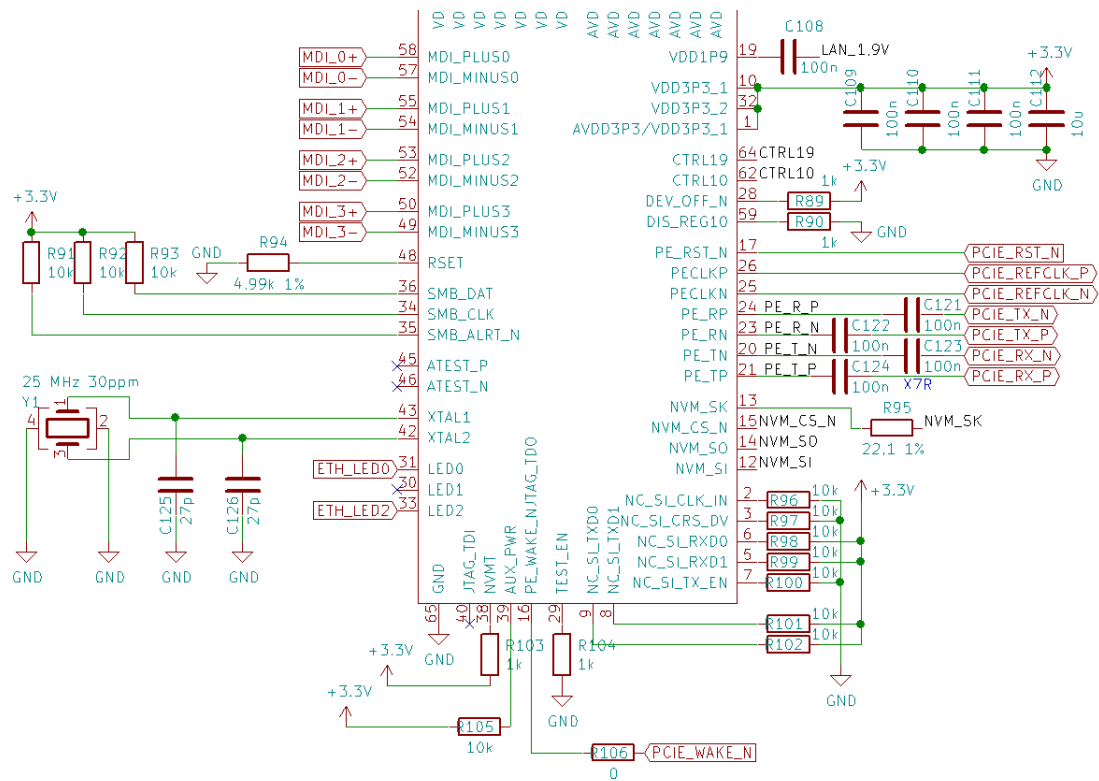
PCIe sběrnice v našem případě využívá 3 diferenciální páry - vysílací, přijímací a hodinový. V každém směru se data přenáší rychlostí 2,5 Gb/s. Diferenciální signál prochází kondenzátory s kapacitou 100 nF pro potlačení souhlasné složky signálu.

K SoM jsou kromě diferenciálních párů připojeny také signály PE_RST_N a PE_WAKE_N. PE_RST_N indikuje dostupnost napájení a hodinového signálu. Signál PE_WAKE_N se používá pro práci s uspávacím režimem a pro funkci WoL³ [21].

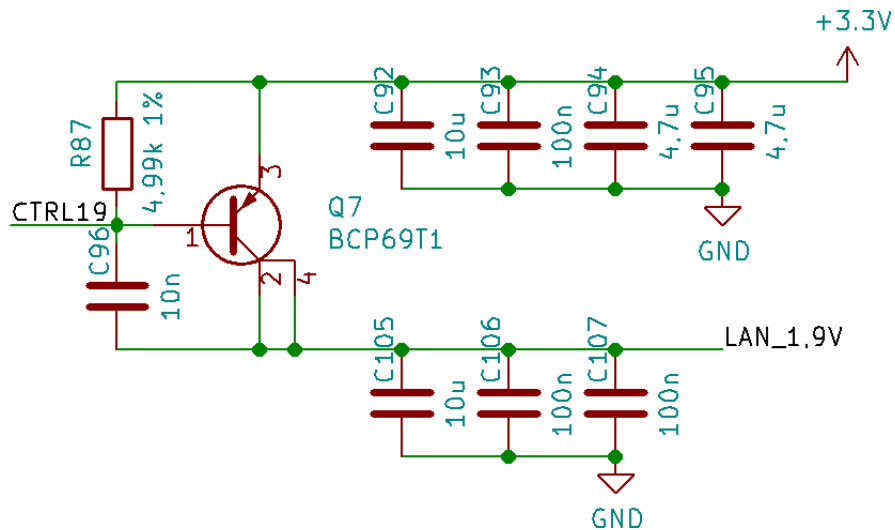
Signály NVM_SI, NVM_SO, NVM_SK a NVM_CS_N slouží k připojení externí nevolatilní paměti pomocí sběrnice SPI. Kontroler umožňuje připojení FLASH, nebo EEPROM paměti s napájením 3,3 V. Vzhledem k tomu, že nám stačí kapacita v řádu desítek kilobitů, zvolili jsme paměť typu EEPROM. Tyto paměti umožňují typicky milion přepisů dat, což je o řád více než paměti FLASH. Jako paměť jsme použili EEPROM AT25320B s kapacitou 32 kb.

Kontroler 82574 potřebuje ke své správné funkci kromě napájecího napětí 3,3 V také napěťové

³WoL je anglická zkratka pro Wake on LAN. Pomocí této funkce lze zařízení vzdáleně probudit vysláním speciálního paketu.



Obrázek 20: Část zapojení kontroleru Intel 82574



Obrázek 21: Zapojení externího tranzistoru pro napájení napětím 1,9 V

5.5. GSM modul

Navrhovaný systém je schopný poslat upozornění prostřednictvím GSM sítě, pokud dojde k nějaké události. Touto událostí může být například nebezpečné zvýšení teploty v určité snímané oblasti, nebo výpadek elektrické energie a přechod na záložní zdroj.

Jako obvod jsme vybrali integrovaný obvod SIM800C, jehož zapojení je na obrázku 23. K jeho konfiguraci se používají AT příkazy, které lze zadat prostřednictvím rozhraní UART. To je vyvedené jak do SoM, tak do 3 pinového konektoru. GSM modul podporuje pásma GSM 850, EGSM 900, DCS 1800 a PCS 1900 a prohledává je automaticky [22].

Napájení a provozní režimy

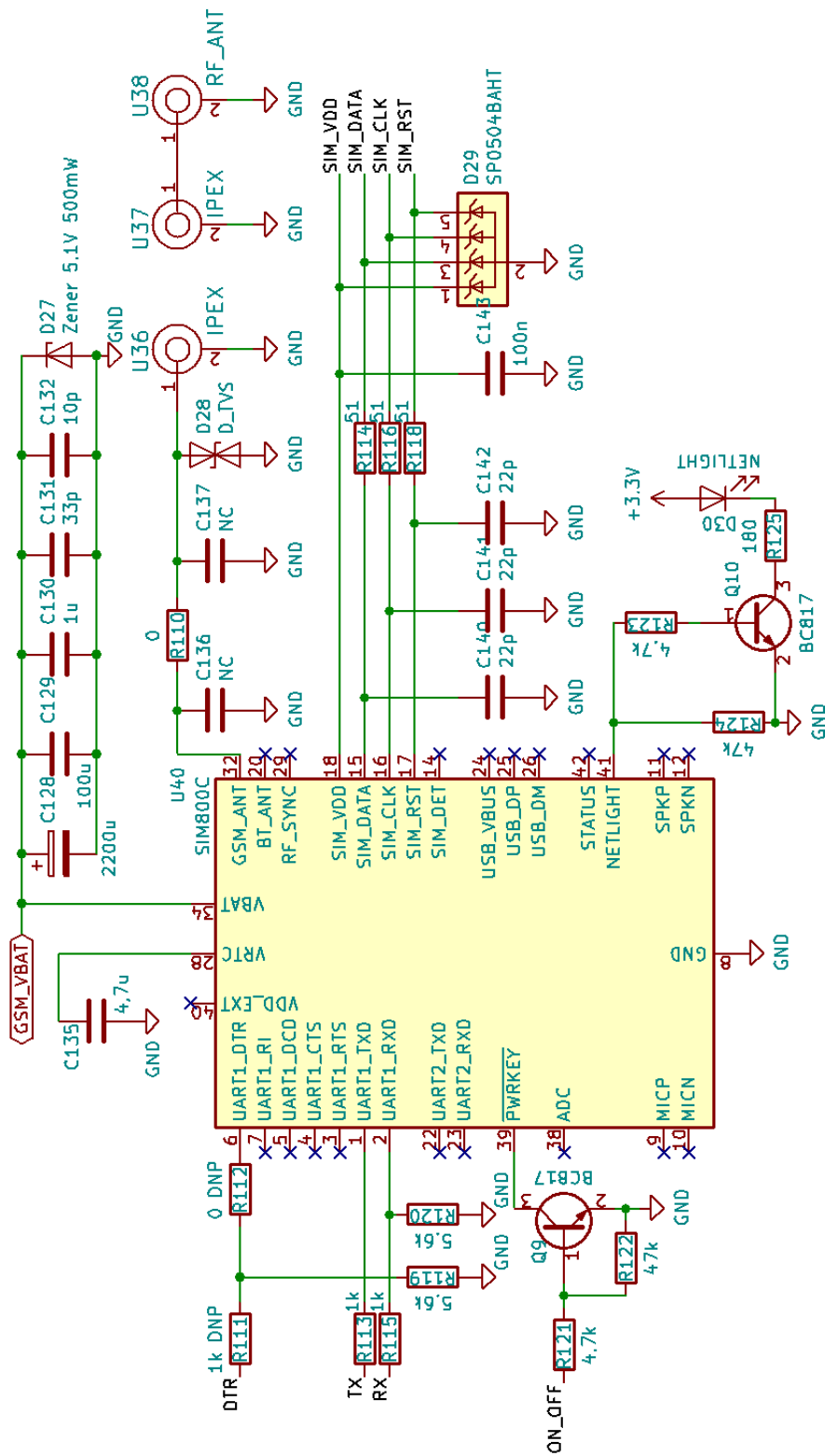
Napájecí napětí modulu je 3,4-4,4 V. V navrhovaném systému jsme zvolili napětí 3,8 V. GSM modul při přihlašování do sítě a posílání SMS vyžaduje špičkový proud 2 A, což by mohlo způsobovat výrazný pokles napětí [22]. Proto jsme použili velký kondenzátor s kapacitou 2200 μF . Malé kondenzátory 33 pF a 10 pF jsou zde pro potlačení vysokofrekvenční interference a Zenerova dioda proti poškození čipu případnou napěťovou špičkou.

SIM800C lze vypnout impulsem na PWRKEY pinu, nebo posláním příslušného příkazu po UART pro šetření energie. Další možností je použití módu minimální funkcionality a Sleep módu. Při stavu minimální funkcionality je proudový odběr modulu nejnižší. V tomto módu je deaktivovaná rádiová komunikace a funkce SIM karty. Ve Sleep módu může SIM800C stále přijímat zprávy z GSM sítě. Modul přechází do Sleep módu automaticky po delší neaktivitě a zpět do normálního módu při změně signálu DTR, nebo příchozí zprávě z GSM sítě [22].

Připojení antény

Navržená deska umožňuje připojení externí GSM antény pomocí IPEX konektoru, případně SMA konektoru při použití prodlužovacího IPEX koaxiálního kabelu. Mezi konektorem a modulem je ESD ochrana a místo pro RC člen, kterým lze vedení impedančně přizpůsobit. Šířka cesty na DPS je 0,44 mm, což při vzdálenosti referenční plochy 145,6 μm zajišťuje impedanci 50 Ω . Vzorce pro výpočet šířky cesty jsou poměrně komplikované, takže jsme k výpočtu raději použili software Saturn PCB Design.

Jako externí anténu jsme pro účely testování zvolili ECHO1A/0.1M/IPEX/S/S/11 od společnosti Siretta. Jde o čtvrtvlnný dipól se ziskem 3,66 dB vyrobený na malé DPS. Anténa je navržena pro frekvence v intervalu od 850 MHz do 2,1 GHz a lze jí připojit pomocí koaxiálního kabelu s IPEX konektorem.



Obrázek 23: Zapojení GSM modulu SIM800C

	Min	Max
U_{IL}	-0,3 V	0,7 V
U_{IH}	2,1 V	3,0 V
U_{OL}	-	0,4 V
U_{OH}	2,4 V	-

Tabulka 1: Napěťové úrovně UART u GSM modulu [22]

Délka blikání	Stav GSM modulu
Nesvítí	Vypnuto
64 ms svítí, 800 ms nesvítí	Neregistrováno v GSM síti
64 ms svítí, 3000 ms nesvítí	Registrováno v GSM síti
64 ms svítí, 300 ms nesvítí	Probíhá GPRS komunikace

Tabulka 2: Rozlišení stavů GSM modulu pomocí indikační LED

Sériový port

Sériové rozhraní slouží ke konfiguraci SIM800C. Napěťové úrovně UART jsou v tabulce 1, kde U_{IL} a U_{IH} vymezují povolené napětí pro signál RX a U_{OL} s U_{OH} představují úrovně signálu TX [22]. Vzhledem k tomu, že UART rozhraní na SoM používá napětí 1,8 V, použili jsme napěťový převodník TXS0102 na 3,3 V následovaný napěťovým děličem. Dělič snižuje napětí na 2,8 V, což je doporučená hodnota z katalogového listu [22]. Hodnoty rezistorů napěťového děliče jsme vypočítali pomocí vzorce 17. Kromě signálů RX a TX jsme využili ještě signál DTR (Data Terminal Ready). Pokud SoM pošle logickou jedničku na DTR, znamená to, že je připravený ke komunikaci a modul přejde ze Sleep módu do pohotovostního režimu.

$$2,8 = 3,3 \frac{R_{120}}{R_{120} + R_{115}} \quad (17)$$

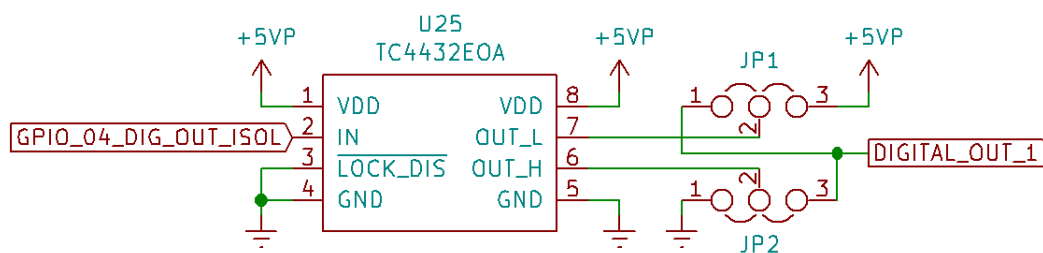
$$R_{120} = 5,6 \cdot R_{115} \quad (18)$$

Indikační LED

Pin s názvem NETLIGHT slouží ke spínání LED. Tato LED indikuje stav modulu různou rychlostí blikání. Tabulka 2 ukazuje stavy, které LED umí indikovat. LED v našem návrhu spínáme pomocí bipolárního NPN tranzistoru BC817.

5.6. SD karta

Přestože SoM má k dispozici 64 GB vnitřní FLASH paměti, přidali jsme možnost přenosného úložiště v podobě microSD karty. Toto úložiště lze použít k bootování systému, nebo k ukládání snímků a videa z kamer. Bootování z SD karty využijeme především během vývoje a testování, kdy bude jednodušší připravit SD kartu se systémem, než vždy přepisovat vnitřní paměť SoM. SD karta v našem případě používá k připojení hodinový, příkazový, detekční a 4 obousměrné datové signály. Schéma zapojení obvodu SD karty je znázorněno na obrázku 24.



Obrázek 25: Zapojení budiče digitálních výstupů TC4432

Rozhraní RS-485 jsme do tohoto projektu implementovali ze dvou hlavních důvodů. Prvním je možné propojení s elektronickým pan & tilt systémem pro natáčení kamer. Takový polohovací systém není součástí prototypu, ale v budoucnosti by se pan & tilt jednotka dala řídit právě pomocí sběrnice RS485. Druhá možnost využití RS485 je propojení s průmyslovou, nebo domácí sběrnicí jako BACnet, nebo Modbus.

Jako transceiver pro RS-485 jsme použili integrovaný obvod MAX485E. Jde o obvod, který je napájen napětím 5 V a obsahuje interní ESD ochranu proti výbojům o napětí 15 kV. MAX485 podporuje half duplex⁴ komunikaci a podporuje datový přenos s maximální rychlostí 2,5 Mb/s.

Zvolený transceiver využívá 4 UART kontakty, 2 RS-485 kontakty a 2 napájecí kontakty. Vstupní signály se označují jako RO (Receiver Output), \overline{RE} (Receiver Enable), DE (Driver Enable) a DI (Driver Input). K pinům RO a DI jsme připojili RX a TX signály UART. Signály \overline{RE} a DE slouží k aktivaci výstupu přijímače a výstupu vysílače. Celé zapojení MAX485E včetně UART signálů je galvanicky odděleno od zbytku desky.

5.8. Digitální výstupy

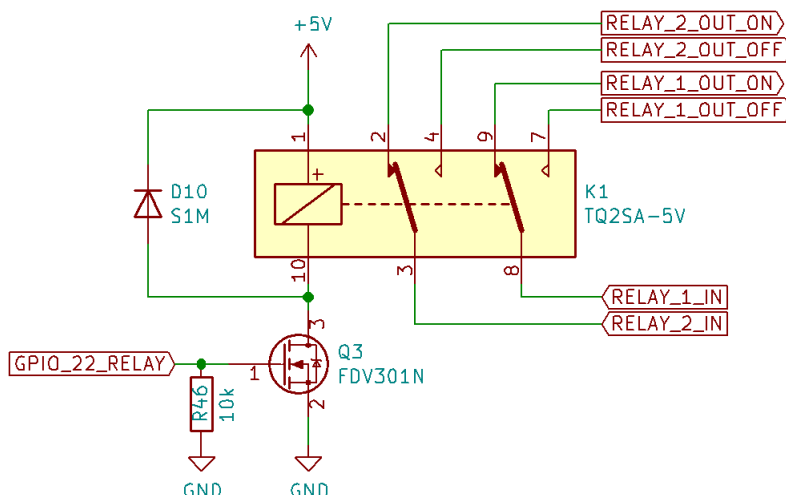
Navržený systém umožňuje spínat logickou jedničku nebo logickou nulu na svých dvou digitálních výstupech. Výstupní napětí jsme v našem případě zvolili 5 V, protože vyšší napěťová hladina se v našem prototypu nevyskytuje. Digitální výstupy mohou sloužit k řízení externích zařízení pomocí malého napětí a proudu na výstupu ze SoM. Pro zajištění robustní funkcionality se k takovým účelům často používají MOSFET budiče [26].

Budiče digitálních výstupů mají za úkol přivést na svůj výstup určitou logickou úroveň, která je závislá na logické úrovni vstupu. Podstatná vlastnost těchto budičů je, že výstupní proud může dosahovat mnohem vyšších hodnot, než proud vstupní. Přidanou hodnotou budičů bývají také zabudované ochrany proti přetížení, přehřátí, nebo ESD výbojům [26].

Na trhu je mnoho typů budičů, které se liší maximálním výstupním proudem, frekvencí spínání, počtem výstupů a dalšími parametry. Některé budiče s více výstupy umožňují řízení pomocí sběrnice SPI. To však pro naši aplikaci není výhodné, protože potřebujeme pouze 2 digitální výstupy a museli bychom tak použít 4 vodiče místo 2.

Pro naši aplikaci jsme hledali budič, který je schopný spínat jak logickou 0, tak logickou 1. Dalším nutným parametrem bylo napájení 5 V. Po porovnání s ostatními budiči jsme vybrali obvod TC4432 od společnosti Microchip. Zapojení TC4432 je na obrázku 25. Pin OUT_H funguje jako výstup proudu do kapacitní zátěže, do které je schopný dodat maximální proud 3 A. Oproti

⁴Při tzv. half duplex komunikaci se přenáší data vždy jen jedním směrem v daný časový okamžik.



Obrázek 26: Schéma zapojení relé

tomu pin OUT_L funguje jako vstup proudu od kapacitní zátěže a je schopný přijmout maximální proud 1,5 A. Časová prodleva průchodu signálu budičem podle datového listu nepřesahuje 74 ns a vstupní proud potřebný pro vyhodnocení logické 1 je 2,5 mA [27].

Propojky JP1 a JP2 jsou ve skutečnosti tvořeny nulovými odpory, jež můžeme osadit buď do polohy 1-2, nebo 2-3 podle požadované funkce. V případě spojení pinů 1-2 teče proud ze zátěže do budiče a spíná se tak logická 0. Pro spínání logické 1 naopak musíme propojit piny 2-3 a proud teče směrem do zátěže. Předpokládáme, že připojené zařízení bude sdílet svoji zem s izolovanou zemí našeho prototypu.

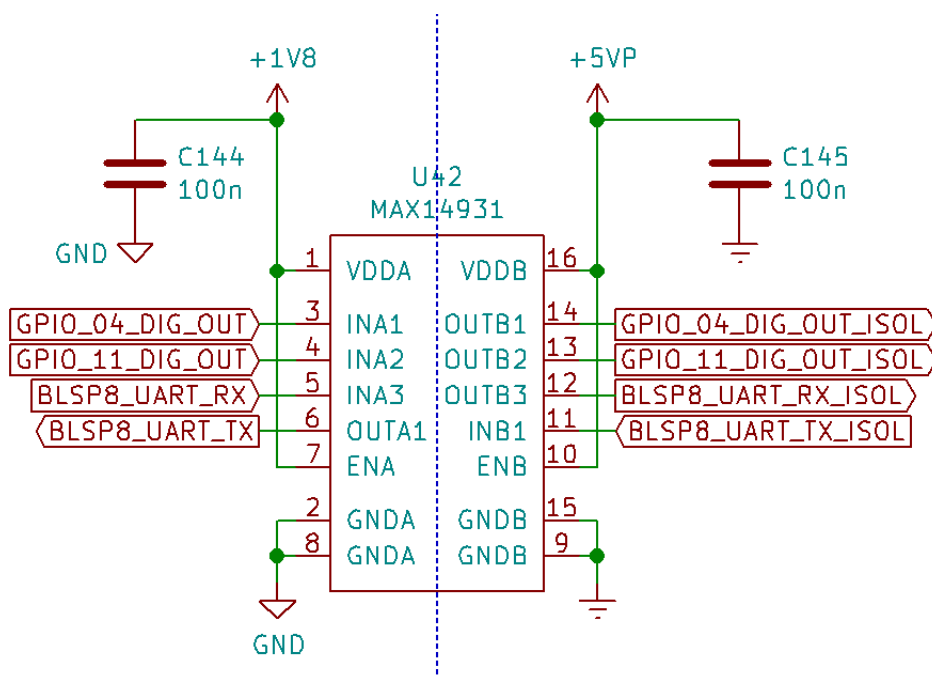
5.9. Řízení relé

Aby bylo možné připojit prototyp například do systémů elektrické požární signalizace (EPS), navrhl jsem také obvod řízení relé. Jak můžeme vidět na obrázku 26, pomocí jednoho digitálního výstupu SoM lze spínat a rozepínat dvě smyčky najednou. V praxi to může vypadat tak, že při hrozícím nebezpečí požáru se rozpojí proudová smyčka a tím se aktivuje poplach.

Pro naši aplikaci jsme vybrali relé TQ2SA od společnosti Panasonic. Zvolené relé je tzv. neblokovací. To znamená, že sepnutý stav nastává pouze v okamžiku, kdy interní cívkou protéká proud. Cívka je dimenzována na jmenovitý spínací proud 28 mA při napětí 5 V. Sepnutí a rozeznutí kontaktů trvá 3 ms [28].

Díky indukčnosti cívky dochází při rozepnutí obvodu ke generování napěťových špiček, které by mohly poškodit spínací NMOS tranzistor. Paralelně k cívce jsme proto zapojili diodu S1M, která při rozepnutí obvodu uzavírá obvod kolem cívky a omezuje tak vysokonapěťové špičky.

Při výběru spínacího tranzistoru jsme vycházeli z požadavku na minimální výstupní proud 28 mA, napětí U_{DS} 5 V a skutečnosti, že napěťová úroveň výstupních pinů SoM je 1,8 V. Zvolený NMOS FDV301N má napětí U_{GS} typicky 0,85 V a lze s ním spínat maximální proud 220 mA při maximálním napětí 25 V [29]. Ke gate kontaktu je připojený pull-down rezistor, zajišťující rozepnutý stav tranzistoru v klidovém stavu.



Obrázek 27: Zapojení galvanického oddělení UART signálů a digitálních výstupů

5.10. Galvanické oddělení

Při návrhu tohoto prototypu jsme vycházeli z toho, že jakékoliv zařízení, které se bude připojovat k navrhované desce, může používat zem s jiným potenciálem. Proto jsme galvanicky oddělili všechna rozhraní spojující kamerový systém s okolím. Mezi tato rozhraní konkrétně patří:

- Ethernet
- RS485
- Digitální výstupy
- Vstupy a výstupy relé
- UART

Všechna tato rozhraní sdílejí jednu izolovanou zem, která slouží současně jako stínění Ethernetového konektoru.

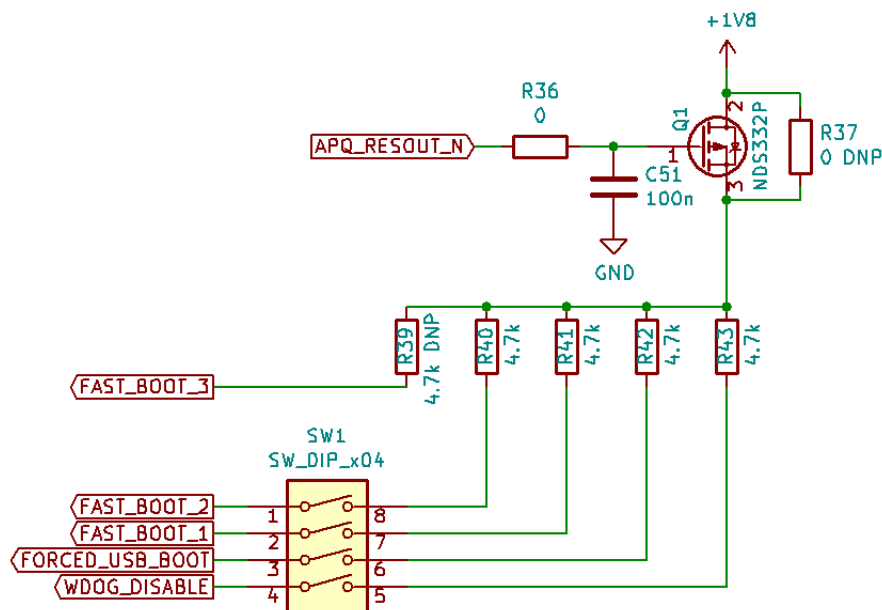
Ethernetová zásuvka je společně s PoE obvody galvanicky oddělena od zbytku nosné desky pomocí dvou transformátorů. První transformátor je umístěný těsně u zásuvky a odděluje signálové diferenciální páry. Střední vinutí tohoto transformátoru jsou vyvedeny dále do PoE obvodu. Napájení PoE je odděleno pomocí druhého transformátoru a zpětnou vazbu flyback regulátoru jsme s kontrolerem propojili přes optočlen.

Sběrnice RS485, digitální výstupy a rozhraní UART vyžadují kromě izolované země také izolované napájení 5 V. K tomu je použit izolovaný DC-DC konverter IL0505S, který je schopný dodat výkon 2 W. Kromě napájení je nutné izolovat také vstupní a výstupní signály. Pro tento účel jsme hledali digitální izolátory se třemi výstupy a jedním vstupem.

Digitální izolátor	Izolační napětí [kV _{RMS}]	Napájecí napětí [V]	Max. přenosová rychlost [Mb/s]	Cena [Kč]
ADUM241E0BRWZ	5	1,7-5,5	150	154
MAX14931EASE+	2,75	1,71-5,5	25	53
MAX14931FASE+	2,75	1,71-5,5	150	122
MAX14435FAWE+	5	1,71-5,5	200	98
SI8641AB-B-IS	5	2,5-5,5	150	81

Tabulka 3: Porovnání parametrů digitálních izolátorů

Mezi důležité parametry digitálních izolátorů patří především maximální izolační napětí, vstupní a výstupní signálové napětí a přenosová rychlost. Tabulka 3 porovnává několik digitálních izolátorů, mezi kterými jsme se rozhodovali. Díky nízké ceně a rozsahu napájecího napětí jsme se rozhodli pro obvod MAX14931EASE+. Jeho maximální přenosová rychlost 25 Mb/s nám bude stačit, protože UART budeme používat s rychlostí maximálně 115200 b/s, transceiver RS485 umožňuje maximální rychlost 2,5 Mb/s a digitální výstupy nebudeme přepínat s vysokou frekvencí. Rozsah napájecího napětí 1,71-5,5 V je pro nás vhodný, protože napětí na straně SoM je 1,8 V a izolované napětí má hodnotu 5 V. Nemusíme tak v tomto případě používat žádné napěťové překladače.



Obrázek 28: Nastavení bootovacího média pomocí přepínačů

FAST_BOOT_2	FAST_BOOT_1	FORCED_USB_BOOT	Priorita bootování
ON	OFF	OFF	1 - UFS 2 - SD 3 - USB
ON	ON	OFF	1 - SD 2 - UFS
OFF	ON	OFF	SD
X	X	ON	USB

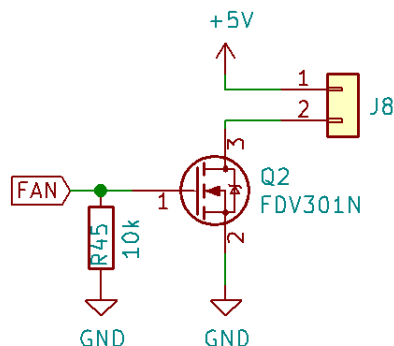
Tabulka 4: Možnosti nastavení bootování SoM pomocí přepínačů [30]

5.11. Nastavení bootovacího média

SoM 6601 od společnosti Inforce Computing umožňuje bootování systému z vnitřní UFS paměti, externí microSD karty, nebo USB [30]. Priorita bootování lze nastavit pomocí sady přepínačů, které jsou zapojeny podle schématu na obrázku 28.

SoM při spuštění, nebo po resetu bootuje v závislosti na logických úrovních svých čtyř pinů FAST_BOOT_1, FAST_BOOT_2, FORCED_USB_BOOT a WDOG_DISABLE. Při spuštění, nebo po resetu klesne úroveň signálu APQ_RESOUT_N na logickou 0, což otevře PMOS, jenž přivádí napětí logické 1 na přepínače [30]. V závislosti na nastavení přepínačů se pak logická 1 přivede na příslušný bootovací signál. Jednotlivé možnosti nastavení přepínačů jsou v tabulce 4. „X“ v tabulce značí, že funkce není závislá na nastavení přepínače.

Pro zapnutí nebo reset zařízení slouží dvě tlačítka PWR a RST. Při resetu zařízení zhasne LED D9, která je přes invertující buffer připojená k signálu APQ_RESOUT_N.



Obrázek 29: Zapojení ventilátoru

5.12. Zapojení ventilátoru

Vzhledem k tomu, že tento multikamerový systém bude v praxi umístěný u stropu, může zde docházet k hromadění ohřátého vzduchu a nežádoucímu zahřívání zařízení. Nutnost použití ventilátoru zjistíme až postupným testováním a zatěžováním kamerového systému.

V návrhu zařízení jsme počítali s možností připojení ventilátoru, pracujícího při napájecím napětí 5 V. Jeho zapojení znázorňuje schéma na obrázku 29. Ke spínání ventilátoru jsme použili tranzistor FDV301N, který se v našem návrhu vyskytuje vícekrát. Maximální výkon ventilátoru je omezen maximálním proudem, který je NMOS schopen spínat, což je 220 mA [29].

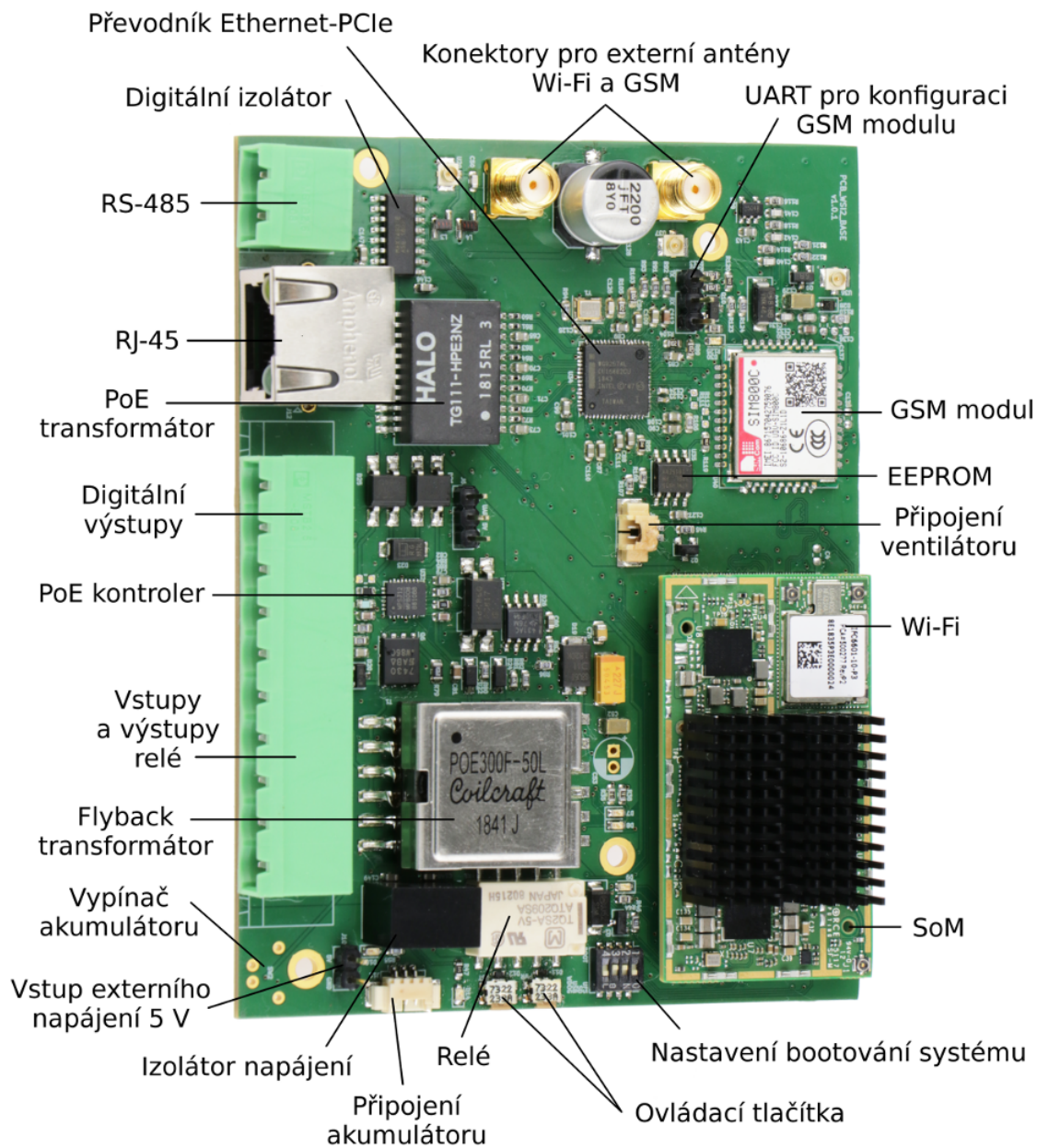
6. Návrh DPS

DPS jsem navrhoval pomocí software KiCAD. Výsledná DPS je čtyřvrstvá a byla vyrobena společností Pragoboard s.r.o. Součástky jsou osazeny na obou stranách DPS. V jedné vnitřní vrstvě je velká plocha země a v druhé vnitřní vrstvě vedou napájecí plochy. Protože součástek, vyžadujících napájecí napětí 3,3 V je na DPS nejvíce, převládá v této vrstvě plocha s tímto napětím.

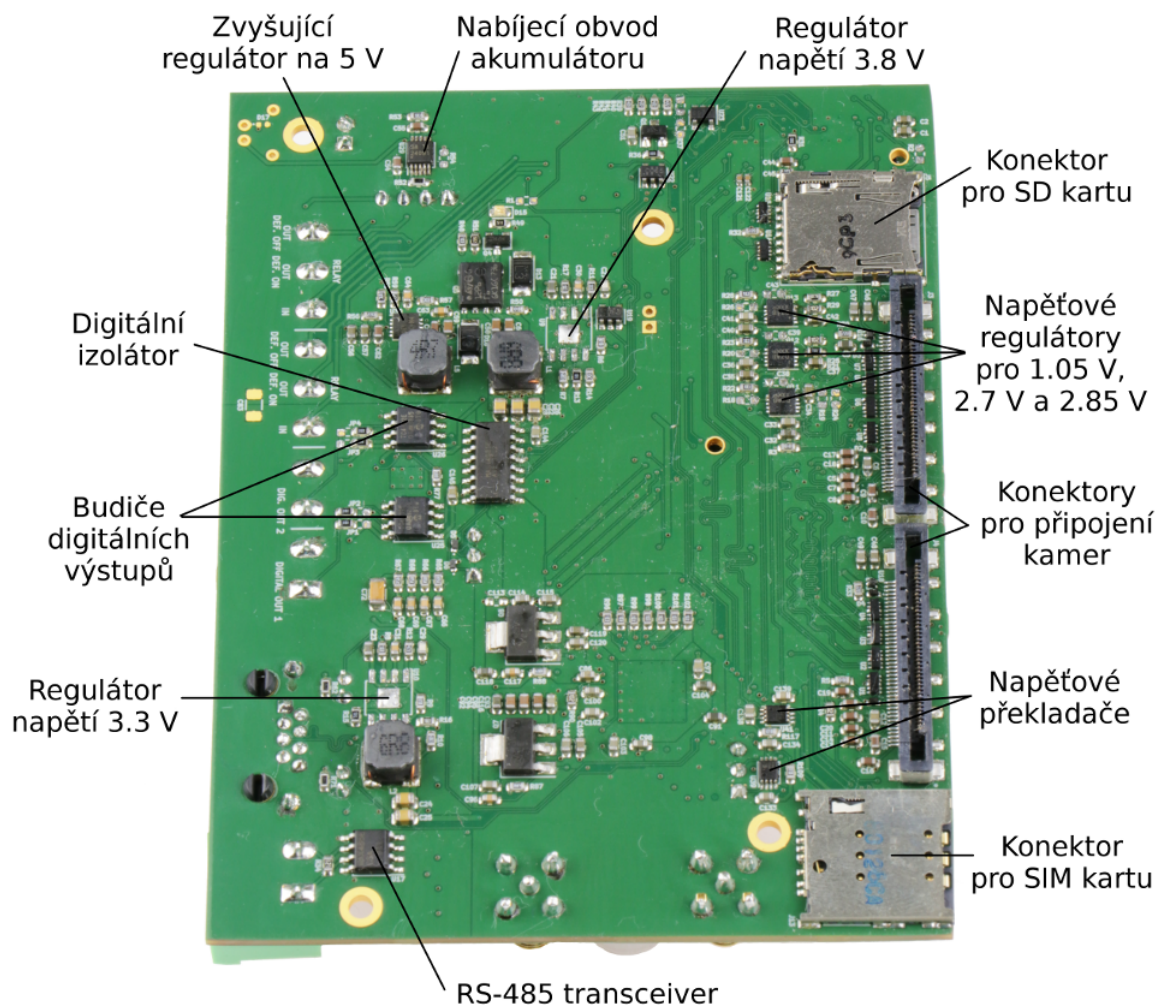
6.1. Rozmístění součástek

Popsané fotografie osazené DPS můžeme vidět na obrázcích 30 a 31. Na vrchní stranu DPS jsme umístili konektory na připojení SoM a především vysoké součástky. Na spodní straně jsou osazeny pouze nižší součástky, protože zde v budoucnu bude potřeba místo pro mechanické natáčení kamer. Na DPS jsou 4 montážní otvory pro přichycení desky ke konstrukci krytu pomocí šroubů o velikosti M 2,5. Pro pevné přichycení SoM k centrální nosné desce se používají další dva malé otvory.

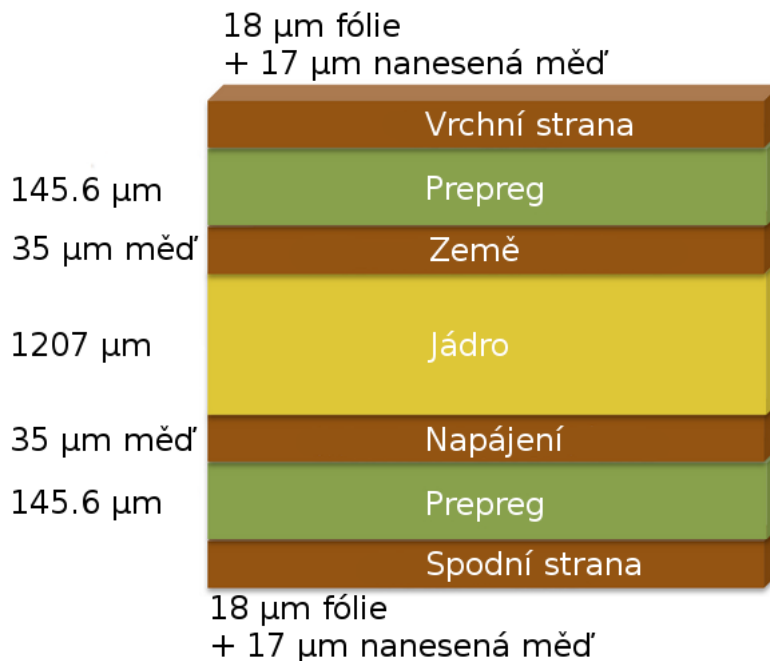
Všechna rozhraní, která budou přístupná uživateli po uzavření do krytu jsou vyvedena na jedné straně desky. Na druhé straně jsou umístěny zásuvky pro SIM kartu a SD kartu. Tyto konektory budou po vložení karet zaslepeny krytem. Koaxiální konektory SMA pro připojení externích antén jsou na jedné boční straně. Protilehlá strana má na svém boku reset tlačítko, které bude přístupné zvenčí pouze při použití jehly, nebo jiného úzkého předmětu.



Obrázek 30: Snímek vrchní strany prototypu



Obrázek 31: Snímek spodní strany prototypu



Obrázek 32: Uspořádání vrstev DPS

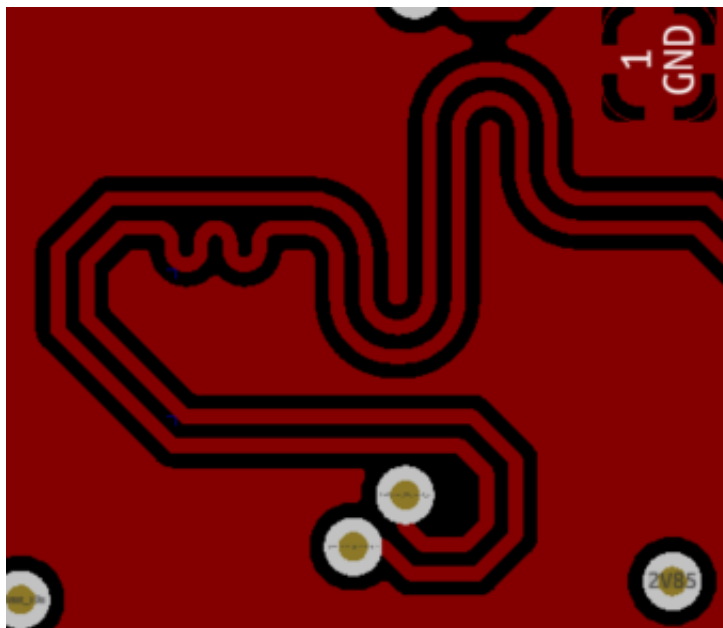
6.2. Návrh diferenciálních párů

Diferenciální vedení používají u tohoto prototypu vysokorychlostní rozhraní Ethernet, PCIe, MIPI a USB. První tři z nich vyžadují vzájemnou impedanci vodičů 100 Ω. USB podle specifikace používá impedanci 90 Ω.

Pro výpočet potřebné šířky spojů a izolační mezery jsme použili software Saturn PCB Design. Nezbytnými parametry pro tento výpočet jsou vzdálenost nejbližší vodivé plochy pod diferenciálním párem a výsledná tloušťka mědi na desce. Tyto hodnoty jsme se dozvěděli na stránkách společnosti Pragoboard s.r.o. Uspořádání vrstev DPS popisuje obrázek 32. Pro vzájemnou impedanci 100 Ω nám vyšla šířka spoje 0,15 mm a izolační mezera také 0,15 mm. Diferenciální páry USB mají šířku spojů 0,18 mm a izolační mezera 0,15 mm.

Při návrhu diferenciálních párů je nutné vyhnout se větvení spojů a omezit počet prokovů na minimum. Využívá-li vysokorychlostní rozhraní více párů najednou, je potřeba, aby všechny páry byly stejně dlouhé. V opačném případě by se signál šířil každým párem jinou dobu a mohl by nastat problém s časováním. Každý signál v páru by měl být také stejně dlouhý. Pro vyrovnání délek párů se proto často používají meandry, které kompenzují rozdílný poloměr ohybu obou signálů [31].

Meandry jsme se snažili navrhovat s většími poloměry ohybu, ideálně tak, aby se do ohybu vešla vodivá plocha kvůli stínění signálu. Ukázku meandrů, vytvořených na naší DPS, můžeme vidět na obrázku 33. Velké zákruty jsou zde pro dorovnání délek s druhým diferenciálním párem a dva malé meandry vlevo zajišťují stejnou délku obou vodičů v jednom páru.



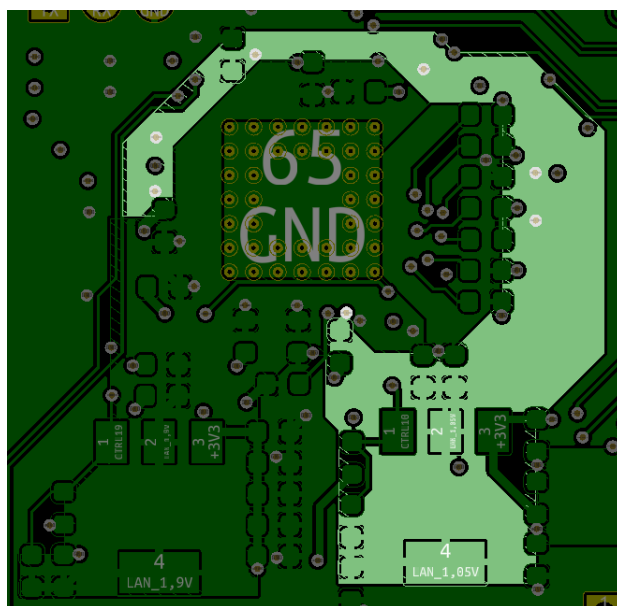
Obrázek 33: Příklad meandrů v návrhu DPS

6.3. Vedení napájení plochami

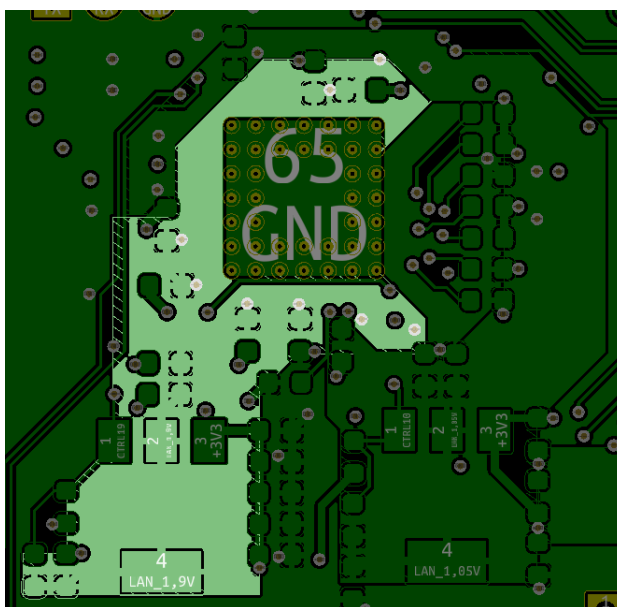
Pro dosažení nižšího odporu vodivých cest, a tím i nižších napěťových ztrát, se doporučuje vést napájecí spoje plochami. Příklad napájení plochou mohu ukázat na uspořádání návrhu převodníku PCIe-Ethernet. Tento obvod je napájen napětím 3,3 V, které je přivedeno plochou vnitřní vrstvy DPS. Pro svoji správnou funkci však obvod vyžaduje také napěťové úrovně 1,05 V a 1,9 V. Tato napětí dostáváme na kolektorech externích tranzistorů, jež jsou řízeny proudem báze, tekoucím z převodníku. Oba následující obrázky ukazují stejný pohled na tento obvod. Na obrázku 34 je zvýrazněna napájecí plocha pro napětí 1,05 V a na obrázku 35 jsem zvýraznil napájení 1,9 V.

6.4. Připojení kamer

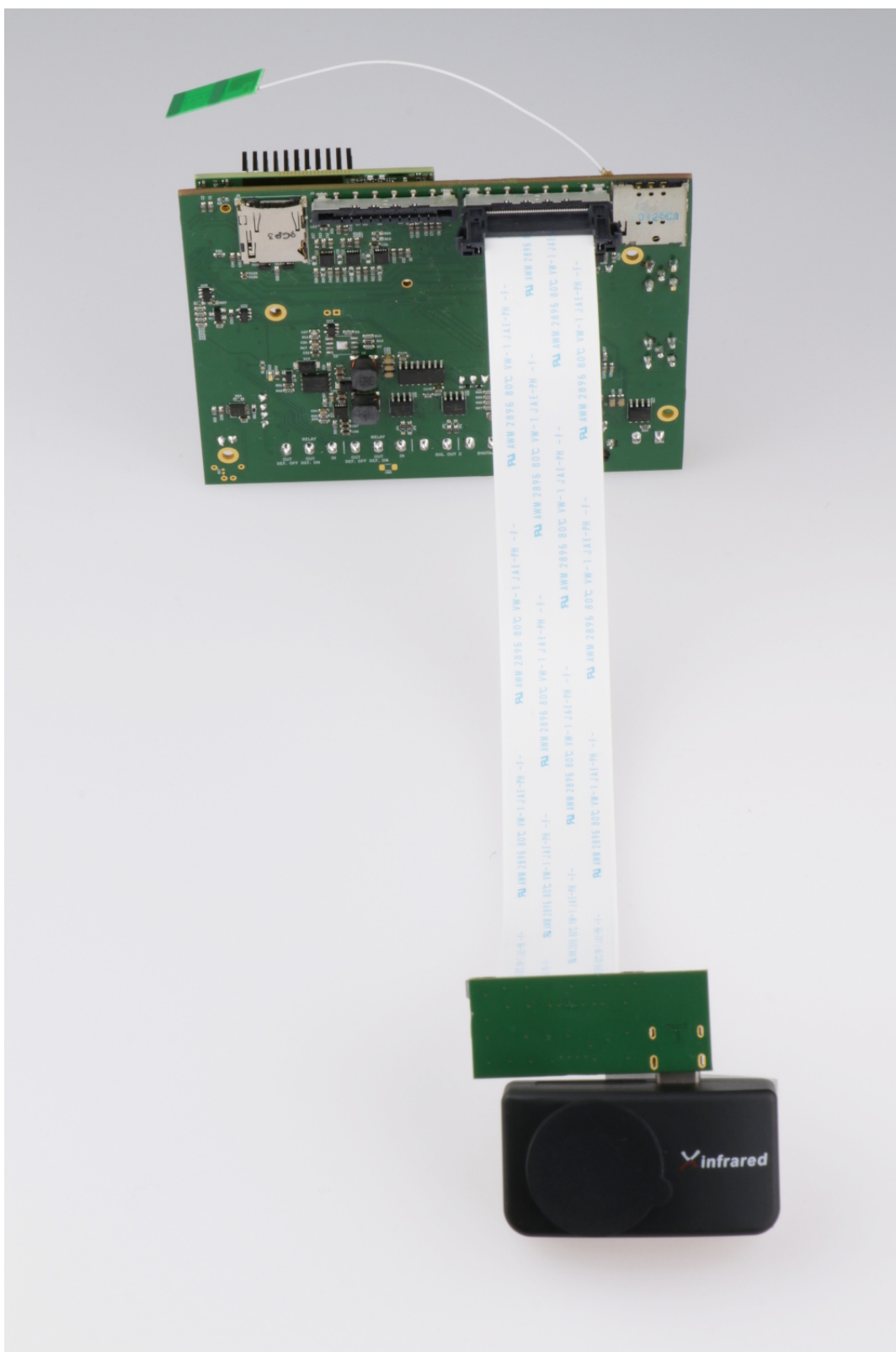
DPS má vyvedené 2 konektory pro připojení plochých kabelů. Pro účely tohoto prototypu jsme navrhli jednoduchou DPS, která propojuje rozhraní USB termokamery s konektorem pro plochý kabel. Fotografie s připojenou kamerou je na obrázku 36.



Obrázek 34: Napájecí plocha s napětím 1,05 V



Obrázek 35: Napájecí plocha s napětím 1,9 V



Obrázek 36: Propojení nosné desky s termokamerou

7. Závěr

V rámci této diplomové práce jsem navrhl, osadil a částečně otestoval centrální nosnou desku prototypu multikamerového systému. Navržená DPS má čtyři vrstvy - dvě signálové, jednu s referenční zemí a jednu s napájecími plochami. Její finální rozměry jsou 107x82 mm. DPS byla spolu s nerezovými šablonami pro nanášení pájecí pasty vyrobena společností Pragoboard s.r.o. Osazení desky jsem provedl přetavením v osazovací peci společnosti Workswell s.r.o.

Jádrům systému je mobilní procesor Qualcomm Snapdragon 820, integrovaný v systému na modulu s názvem 6601 μ SOM od společnosti Inforce Computing. Tato platforma je schopná najednou enkódovat obraz ze dvou termokamer s rozlišením 384x288 pixelů a dvou kamer pro viditelné spektrum s rozlišením full HD. OEM termokamery přenášejí obraz pomocí rozhraní USB a kamery pro viditelné spektrum lze připojit pomocí vysokorychlostního rozhraní MIPI CSI. Pro snímání obrazu viditelného spektra jsem zvolil senzor OV5640, kvůli podpoře ovladačů ze strany výrobce SoM. Snímač používá automatické zaostřování a dosahuje maximálního rozlišení 5 Mpx.

Zařízení je napájeno pomocí PoE+, odpovídající standardu 802.3at. V případě výpadku napájení z PoE je systém vybavený záložním zdrojem v podobě Li-ion akumulátoru. Při detekci nebezpečí, nebo při výpadku napájení může prototyp poslat upozornění prostřednictvím sítě GSM.

Při ručním opravování osazení DPS jsem bohužel poškodil jednu z pájecích plošek PoE kontroleru, sloužící k detekci zařízení. Správný návrh PoE jsem tak nemohl otestovat. Naštěstí jsem v návrhu počítal s možností externího napájení 5 V, takže prototyp lze napájet tímto způsobem. Dále mi chyběly spínané napěťové regulátory RT8070, zajišťující napěťové úrovně 3,3 V a 3,8 V. Důvodem byla náhlá absence skladových zásob v obchodě Farnell. Místo nich jsem pro účely testování prototypu použil lineární napěťový regulátor LM1085IT-3.3, který bylo nutno pomocí drátků připájet k desce. Regulátory na napěťové úrovně 1,05 V, 2,7 V a 2,85 V fungují správně. Nabíjení externího Li-ion akumulátoru proběhlo bez problémů.

GSM modul, vyžadující napájení 3,4-4,2 V, jsem testoval při přímém napájení z akumulátoru. K prototypu byla připojena externí anténa, jak je vidět na obrázku 36 v předchozí sekci. UART komunikace mezi GSM modulem a platformou Arduino funguje správně. Podařilo se mi nastavit modul pomocí AT příkazů a odeslat SMS zprávu na svůj mobilní telefon.

Na zrealizovaném prototypu jsem také otestoval připojení a funkčnost SoM. Po připojení napájení se spustil systém Android. Připojení kamer, stejně jako přenos dat pomocí rozhraní Ethernet jsem netestoval, protože je k tomu potřeba přizpůsobit firmware a příslušné ovladače.

Jak již bylo řečeno, pro plné otestování prototypu bude nyní potřeba zabývat se vývojem a instalací ovladačů pro jednotlivá rozhraní. Dále bude nutné navrhnout a implementovat software, který bude schopen spojit obrazy dvou kamer do jednoho širokoúhlého. Mezi další kroky při návrhu finálního zařízení bude patřit optimalizace obvodů podle výsledků testování. V neposlední řadě je také nutné zamyslet se nad podobou krytu, mechanického uložení a polohování kamer.

Výsledný multikamerový systém může najít využití v oblasti požární prevence, zejména v prostorech se zvýšeným nebezpečím vznícení. Další oblastí možného využití je nepřetržitě monitorování elektrických a mechanických zařízení za účelem detekce přetížení, nebo poruchy. Malé rozměry systému, společně s napájením pomocí PoE, umožňují nenápadné umístění na strop bez nutnosti blízké přítomnosti napájecí sítě. Pomocí Ethernetu, digitálních výstupů, spínání relé a sběrnice RS-485 je možné komunikovat s ostatními systémy, nebo aktivovat protipožární opatření, například vodní děla.

Literatura

- [1] FLIR Systems Inc. [online]. *Thermal Imaging for Machine Vision and Industrial Safety Applications*. 2015. Dostupné z: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/AUT_021/AUT_021_EN.pdf.
- [2] *Workswell SAFETIS Indoor - interiérová termokamera pro brzkou detekci rizika zahorení* [online]. Workswell s.r.o., 2019. Dostupné z: <https://workswell.cz/safetis-indoor-termokamera-pro-brzkou-detekci-zahoreni-pozaru/>.
- [3] GELKE, Hans-Joachim, Matthias ROSENTHAL, Tobias KAMMACHER, Amin MAZLOUMIAN. Using mobile processors for general purpose industrial signal processing. In: *Embedded World Exhibition and Conference* [online]. Nürnberg: NürnbergMesse GmbH, 2016. Dostupné z: <https://pd.zhaw.ch/publikation/upload/210116.pdf>.
- [4] *MIPI Camera Serial Interface 2 (MIPI CSI-2)* [online]. MIPI Alliance, Inc., 2018. Dostupné z: <https://www.mipi.org/specifications/csi-2>.
- [5] Inforce Computing, Inc. [online]. *Enabling next generation high-performance embedded system designs with a Micro System-on-Module*. 2015. Dostupné z: https://www.inforcecomputing.com/public_docs/Inforce6501/White-paper-Design_with_Inforce_6501-micro-SOM.pdf.
- [6] KADLEC, Karel, Jan SOVA. Termokamery a pyrometry - princip měření, vlastnosti a využití. *All for power* [online]. 2014. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/termokamery_1.pdf.
- [7] SOVA, Jan. Bezdotykové měření teplotních polí II. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2017. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php.
- [8] LLOYD, JM. *Thermal Imaging Systems*. 1975 edition, Springer 1975. ISBN 9780306308482.
- [9] SOVA, Jan, Jana POKORNÁ. Bezdotykové měření teplotních polí – senzory. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2018. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_02_cam.php.
- [10] VOLLMER, Michael, Klaus-Peter MÖLMANN. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. 2nd Edition. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2018. ISBN 9783527413515.
- [11] MENDELSON, Galit. *All You Need to Know About Power over Ethernet (PoE) and IEEE 802.3af Standard*. [online]. PowerDsine, 2004. Dostupné z: https://portal.chippc.com/support/downloads/files/PoE_and_IEEE802_3af.pdf.
- [12] MRÁZEK, Oldřich. Princip činnosti Power over Ethernet. In: *vyvoj.hw.cz* [online]. HW server s.r.o., 2004. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/produkty/ethernet/princip-cinnosti-power-over-ethernet.html>.
- [13] MRÁZEK, Oldřich. Power Over Ethernet - napájení ethernetových zařízení po datovém kabelu. In: *vyvoj.hw.cz* [online]. HW server s.r.o., 2004. Dostupné z:

- <https://vyvoj.hw.cz/produkty/ethernet/power-over-ethernet-napajeni-ethernetovych-zarizeni-po-datovem-kabelu.html>.
- [14] *Inforce 6601 Micro System on Modules (SOM)* [online]. Inforce Computing, Inc., 2019. Dostupné z: <https://www.inforcecomputing.com/products/system-on-modules-som/qualcomm-snapdragon-820-inforce-6601-micro-som>.
- [15] Inforce AACC-1H10 5MP MIPI-CSI Camera Adapter Board. In: *Inforce Computing* [online]. Inforce Computing Inc., 2019. Dostupné z: <https://www.inforcecomputing.com/media/catalog/product/cache/1/image/800x800/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/a/c/acc1h10-new.png>.
- [16] OmniVision Technologies, Inc. [online katalogový list]. *OV5640 Product Specification*. 2011. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/OV5640_datasheet.pdf.
- [17] Monolithic Power Systems, Inc. [online katalogový list]. *MP8008*. 2017. Dostupné z: https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/MP8008_r1.0.pdf.
- [18] Texas Instruments Inc. [online katalogový list]. *bq2409x 1A, Single-Input, SingleCell Li-Ion and Li-Pol Battery Charger*. 2019. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24091.pdf>.
- [19] Richtek Technology Corporation [online katalogový list]. *RT8509*. 2012. Dostupné z: https://www.richtek.com/assets/product_file/RT8509/DS8509-01.pdf.
- [20] Richtek Technology Corporation [online katalogový list]. *RT8070*. 2015. Dostupné z: https://www.richtek.com/assets/product_file/RT8070/DS8070-08.pdf.
- [21] Intel Corporation [online katalogový list]. *Intel 82574 GbE Controller Family*. 2014. Dostupné z: <https://www.intel.ca/content/dam/doc/datasheet/825741-gbe-controller-datasheet.pdf>.
- [22] Shanghai SIMCom Wireless Solutions Co., Ltd. [online katalogový list]. *SIM800C Hardware Design V1.05*. 2016. Dostupné z: https://simcom.ee/documents/SIM800C/SIM800C_Hardware_Design_V1.05.pdf.
- [23] Kingston Technology Corporation [online katalogový list]. *microSDHC memory card*. 2016. Dostupné z: <https://www.kingston.com/datasheets/SDCIT-specsheet-8gb-32gb-us.pdf>.
- [24] Semtech Corporation [online katalogový list]. *RClamp0524P Ultra Low Capacitance TVS Arrays*. 2008. Dostupné z: https://www.semtech.com/uploads/documents/rclamp0522p_0524p.pdf.
- [25] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Sběrnice RS-422, RS-423 a RS-485. In: *Root.cz* [online]. internet info, s.r.o., 2008. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/sbernice-rs-422-rs-423-a-rs-485/>.

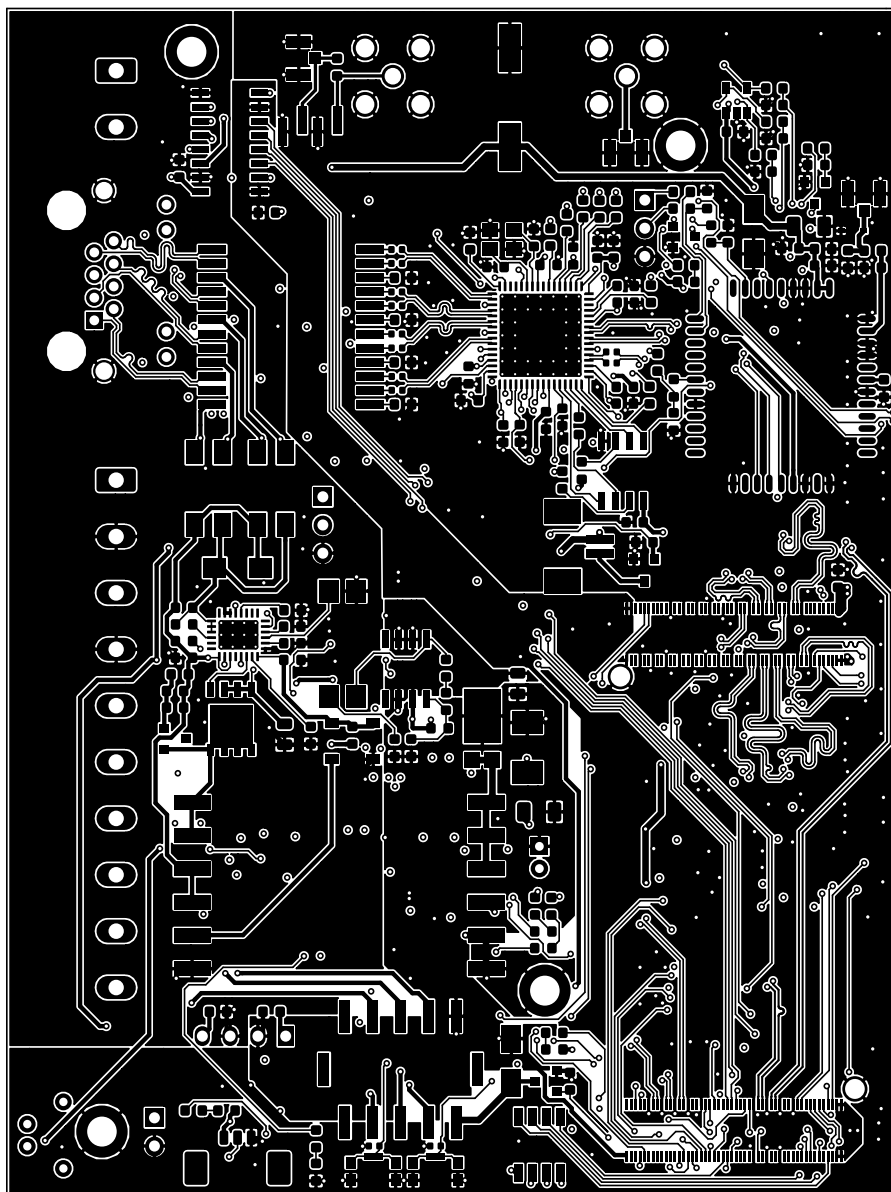
-
- [26] KURTSEVOY, Yuriy. Digital Output Drivers: Understanding Key Features and Challenges. In: <https://www.maximintegrated.com> [online]. Maxim Integrated Products, Inc., 2017. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/6339>.
- [27] Microchip Technology Inc. [online katalogový list]. *TC4431/TC4432 1,5A High-Speed 30V MOSFET Drivers*. 2007. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21424d.pdf>.
- [28] Panasonic Corporation [online katalogový list]. *TQ Relays*. 2012. Dostupné z: https://www.panasonic-electric-works.com/pew/cz/downloads/ds_61020_en_tq.pdf.
- [29] Semiconductor Components Industries, LLC [online katalogový list]. *FDV301N Digital FET, N-Channel*. 2009. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/FDV301N-D.PDF>.
- [30] *Inforce 6601 Development Kit User Guide*. Inforce Computing Inc. 2017. [manuál].
- [31] VRBA, Kamil, Pavel HANÁK. *Vybrané problémy konstrukce elektronických přístrojů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [online]. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, 2014. Dostupné z: <https://vut-vsbs.cz/home/get-file?file=419&>

Seznam obrázků

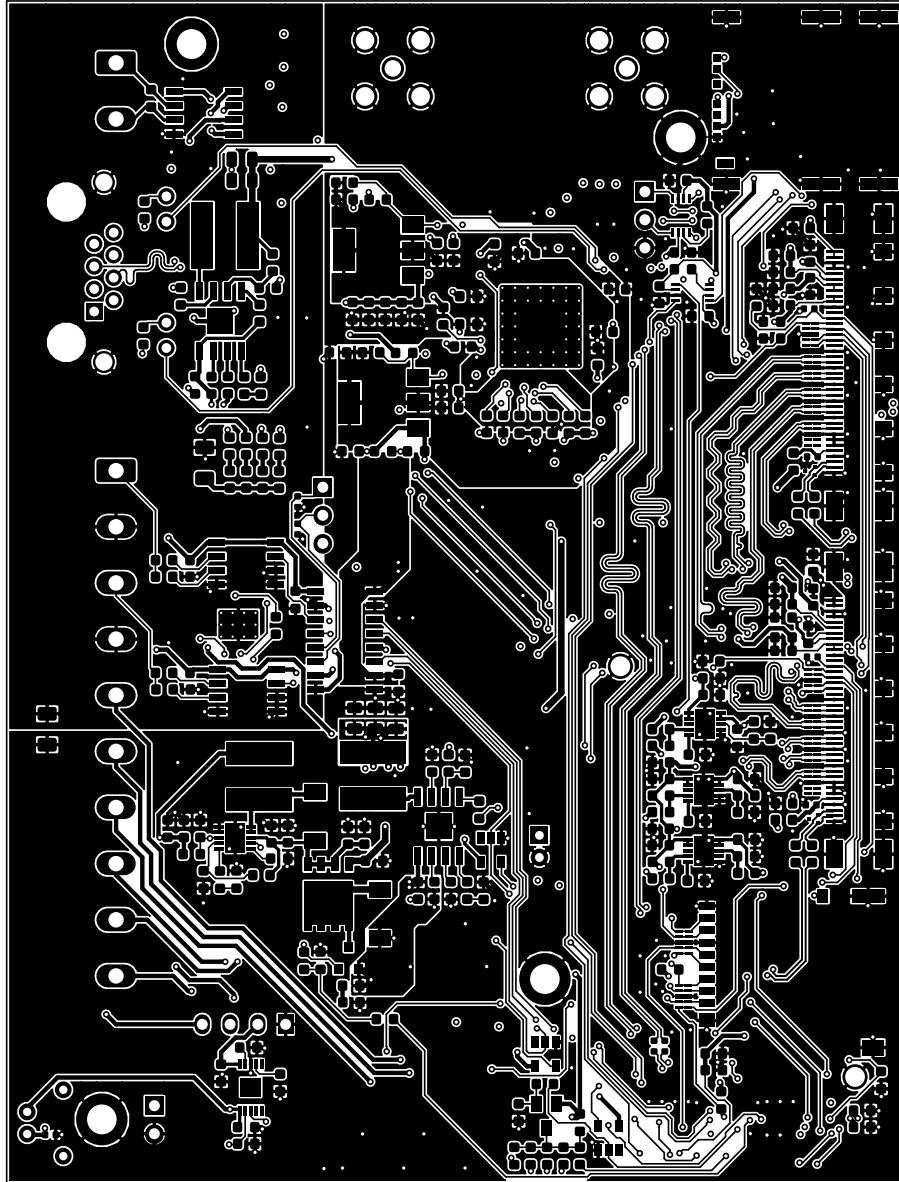
1.	Chyba měření teploty způsobena rozdílnou emisivitou povrchů	3
2.	Celková intenzita tepelného záření zaznamenaná termokamerou	4
3.	Konstrukce mikrobolometru	6
4.	Sekvence při startu PoE napájení	8
5.	Přenos napětí po datových párech	10
6.	Přenos napětí po volných párech	10
7.	Blokové schéma zapojení napájecího obvodu spotřebiče	10
8.	Vrchní strana 6601 μ SOM	12
9.	Spodní strana 6601 μ SOM	13
10.	Fotografie rozebrané termokamery	13
11.	Snímač OV5640 s rozlišením 5 Mpx a autofokusem	14
12.	Zapojení PoE transformátoru	15
13.	Vnitřní uspořádání PoE transformátoru	16
14.	Zapojení MP8008 s flyback regulátorem	17
15.	Přepínání mezi napájením z PoE a záložního akumulátoru	18
16.	Nabíjecí obvod akumulátoru	19
17.	Zapojení zvyšujícího regulátoru na 5 V	19
18.	Zapojení RT8070 pro výstupní napětí 3,3 V	20
19.	Zapojení ISL80101 pro výstupní napětí 2,8 V	21
20.	Část zapojení kontroleru Intel 82574	22
21.	Zapojení externího tranzistoru pro napájení napětím 1,9 V	22
22.	Schéma zapojení USB	23
23.	Zapojení GSM modulu SIM800C	25
24.	Zapojení SD karty	27
25.	Zapojení budiče digitálních výstupů TC4432	28
26.	Schéma zapojení relé	29
27.	Galvanické oddělení UART signálů a digitálních výstupů	30
28.	Nastavení bootovacího média pomocí přepínačů	32
29.	Zapojení ventilátoru	33
30.	Snímek vrchní strany prototypu	34
31.	Snímek spodní strany prototypu	35
32.	Uspořádání vrstev DPS	36
33.	Příklad meandrů v návrhu DPS	37
34.	Napájecí plocha s napětím 1,05 V	38
35.	Napájecí plocha s napětím 1,9 V	38
36.	Propojení nosné desky s termokamerou	39
A.1.	Vrchní strana DPS	45
A.2.	Spodní strana DPS	46
A.3.	Vnitřní napájecí vrstva DPS	47
A.4.	Referenční zem ve vnitřní vrstvě DPS	48

Přílohy

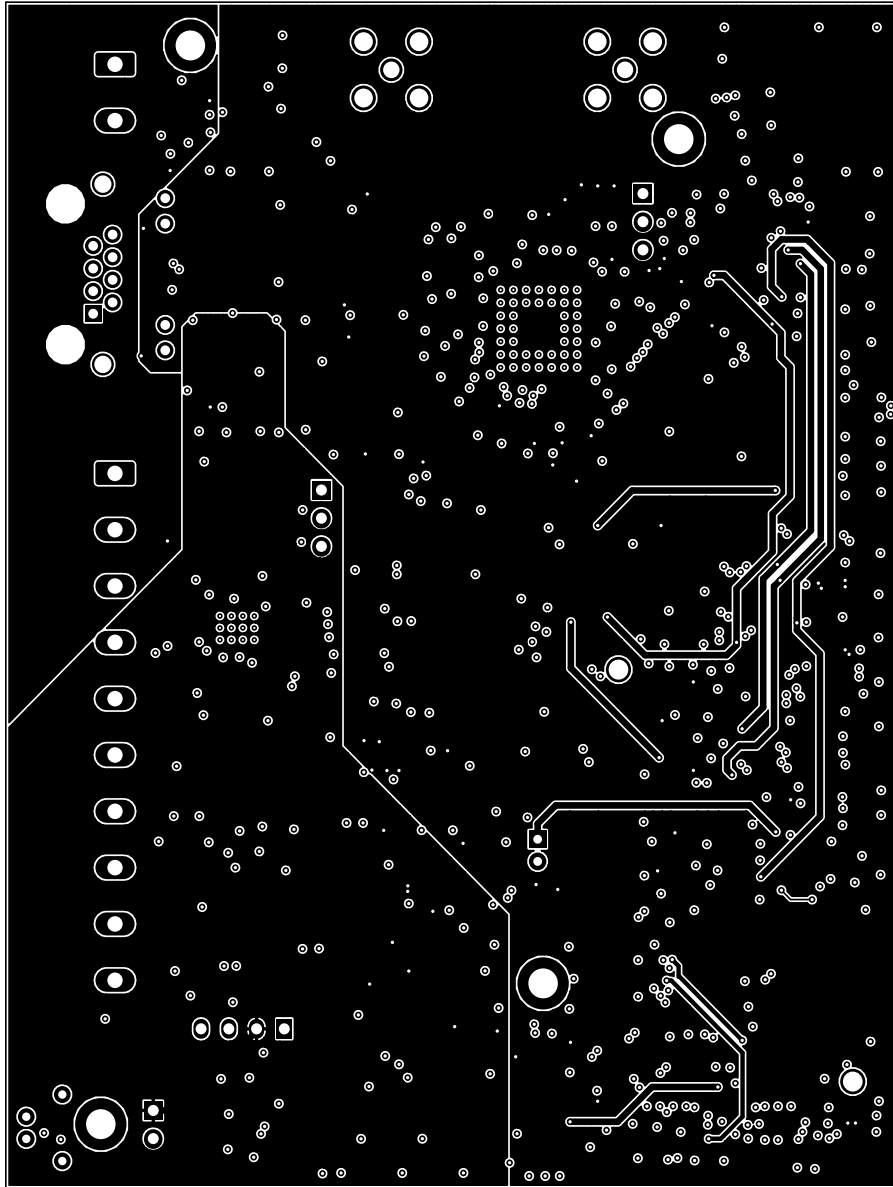
A. Návrh DPS v KiCAD



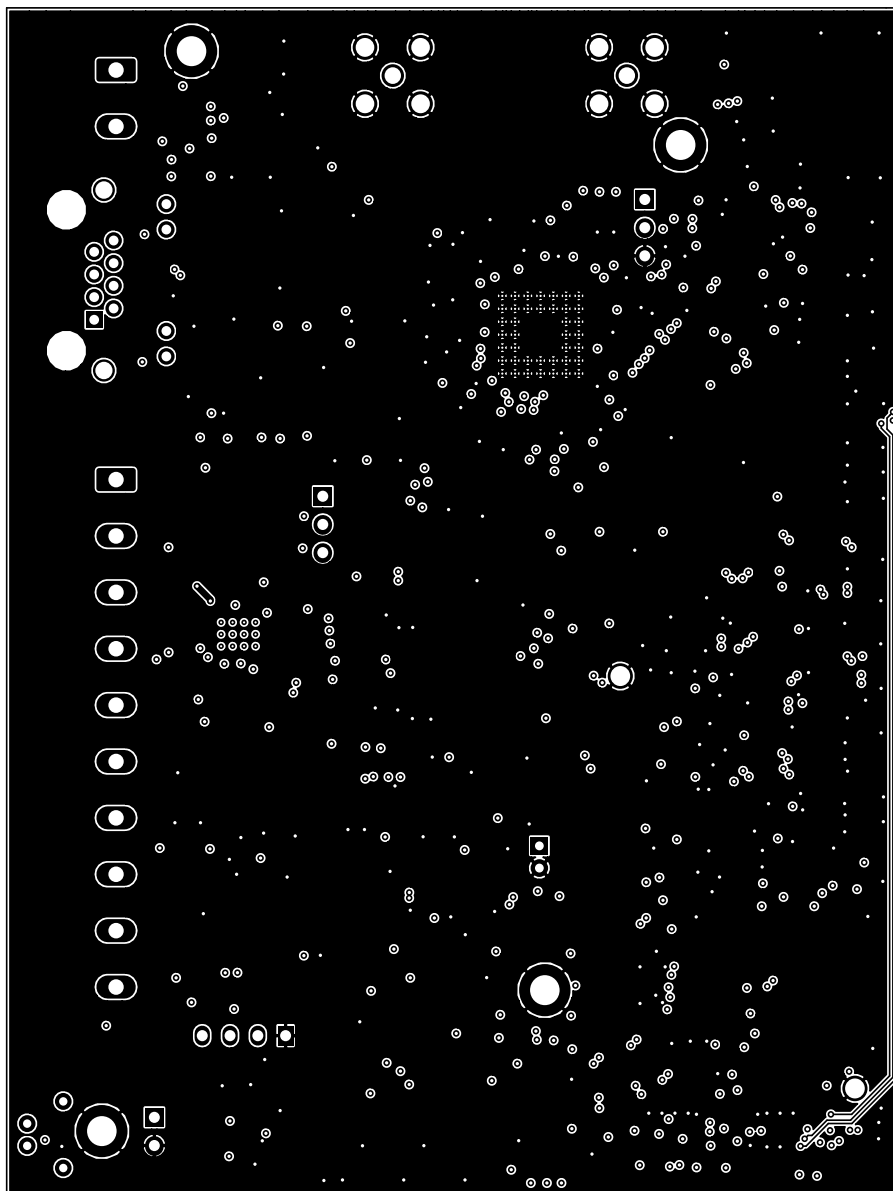
Obrázek A.1: Vrchní strana DPS



Obrázek A.2: Spodní strana DPS

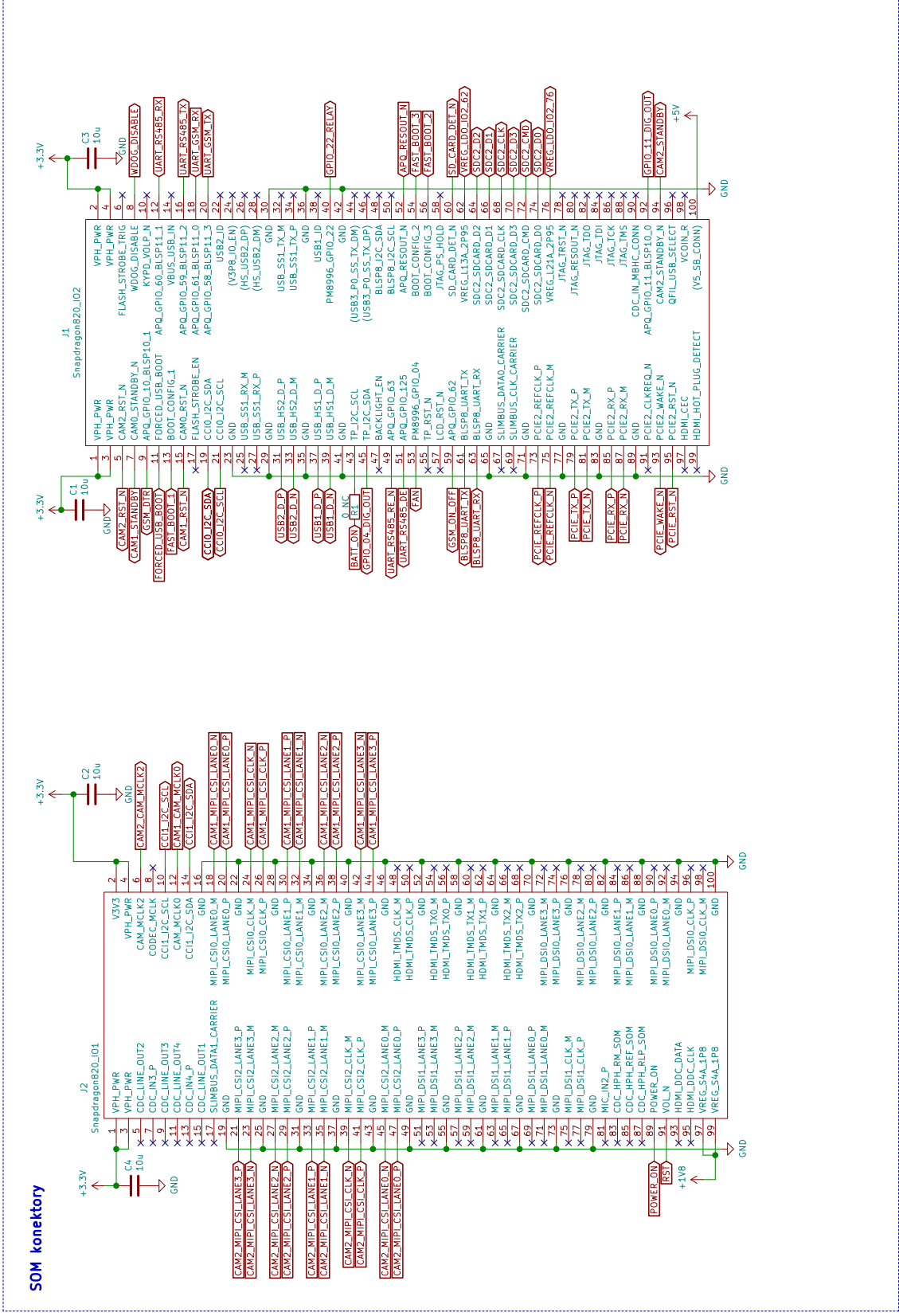


Obrázek A.3: Vnitřní napájecí vrstva DPS

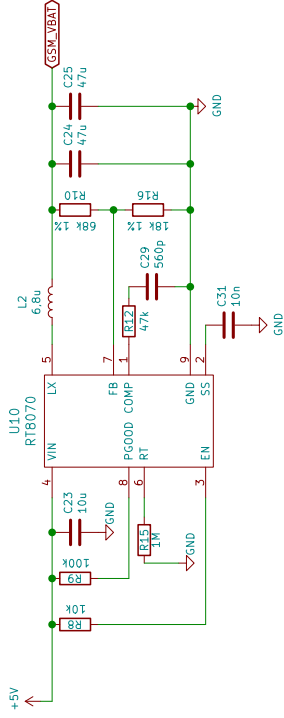


Obrázek A.4: Referenční zem ve vnitřní vrstvě DPS

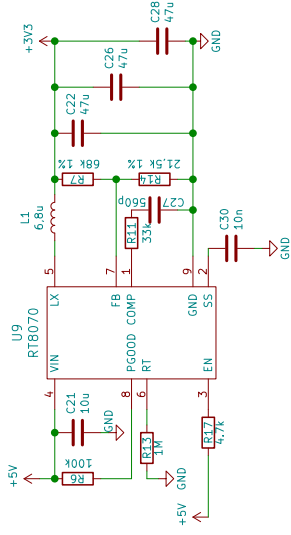
SOM konektory



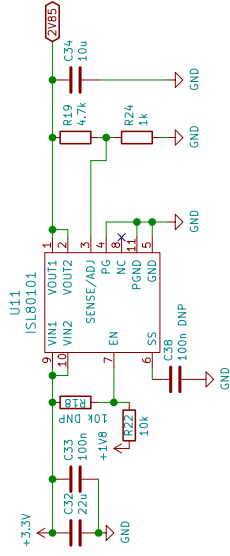
3V8 GSM VBAT



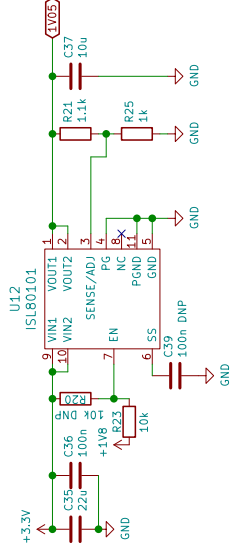
3V3/3A



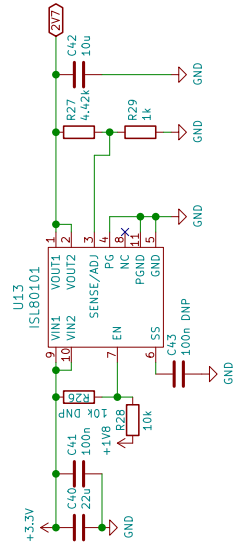
2V85



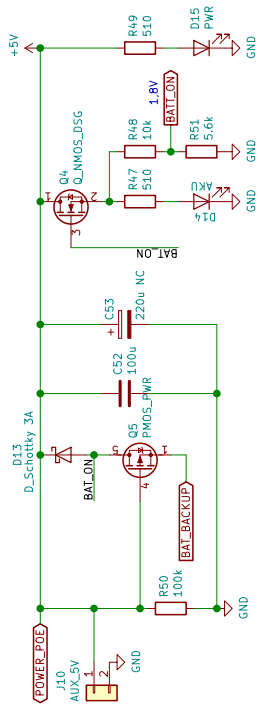
1V05



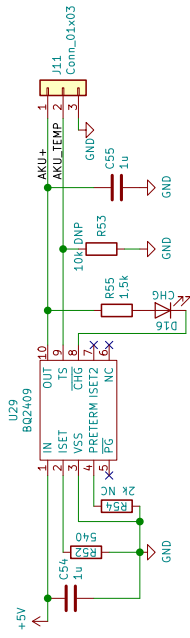
2V7



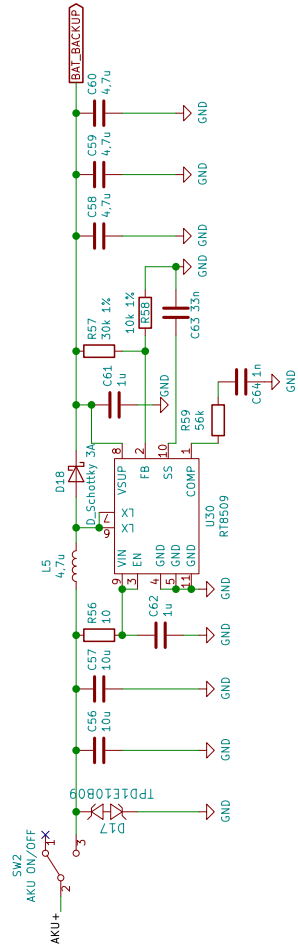
Přepínání POE / AKU



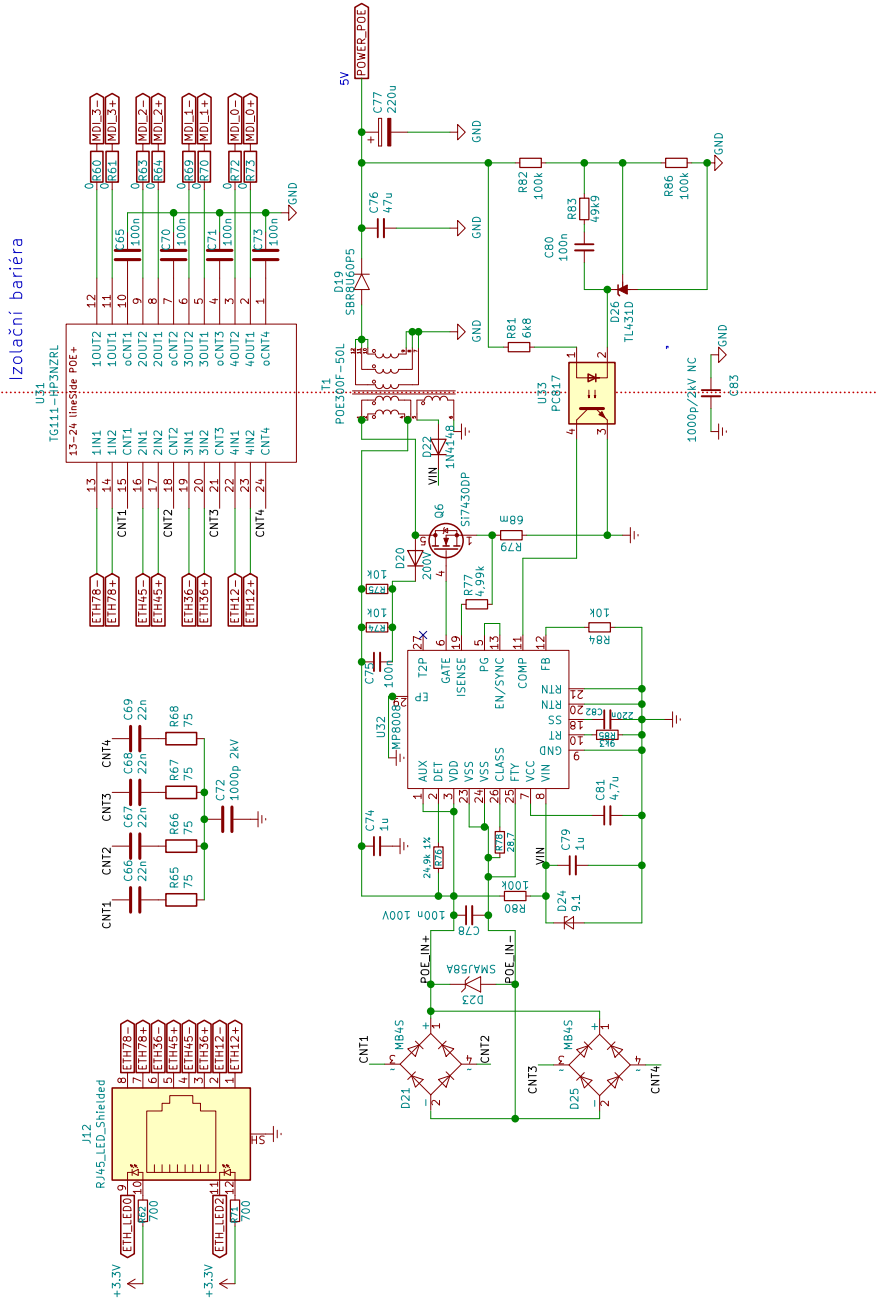
Nabíjení Li-ion



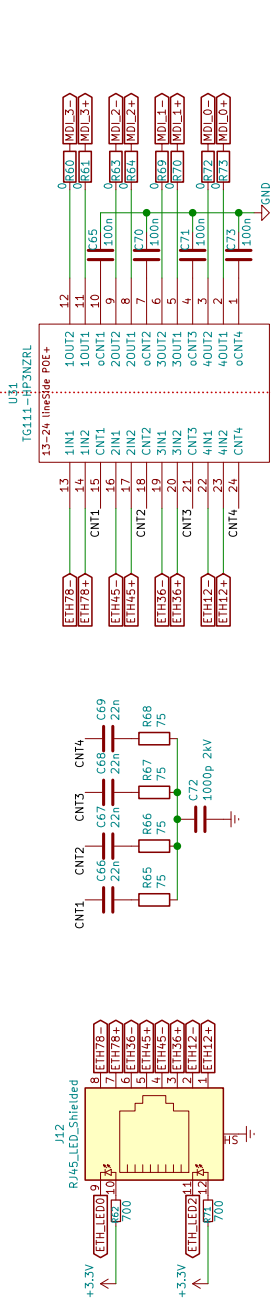
3.7 -> 5V



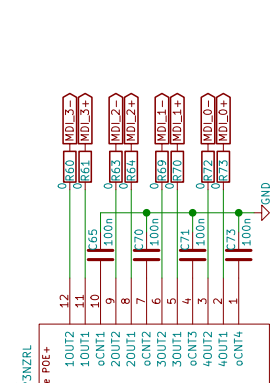
POE



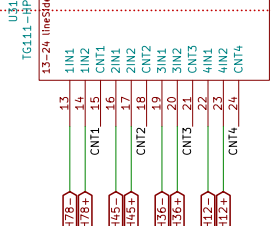
Izolační bariera



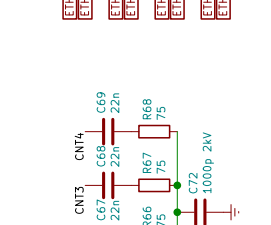
U31



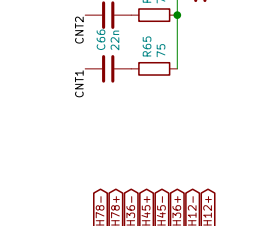
U32



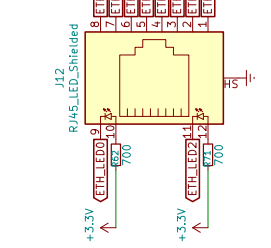
U33



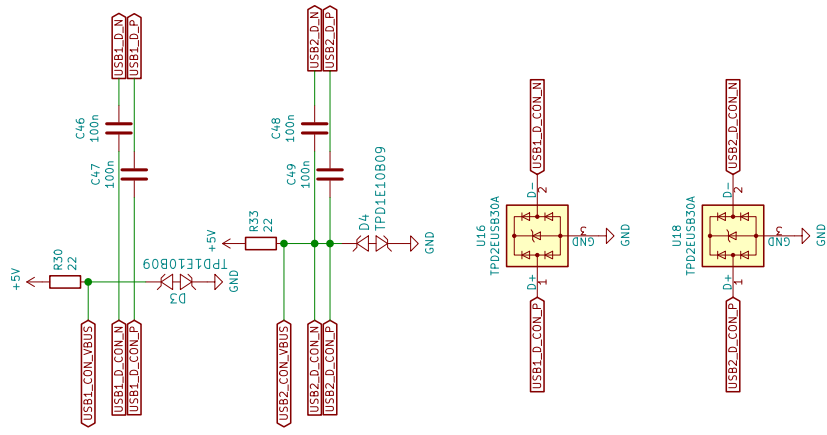
U34



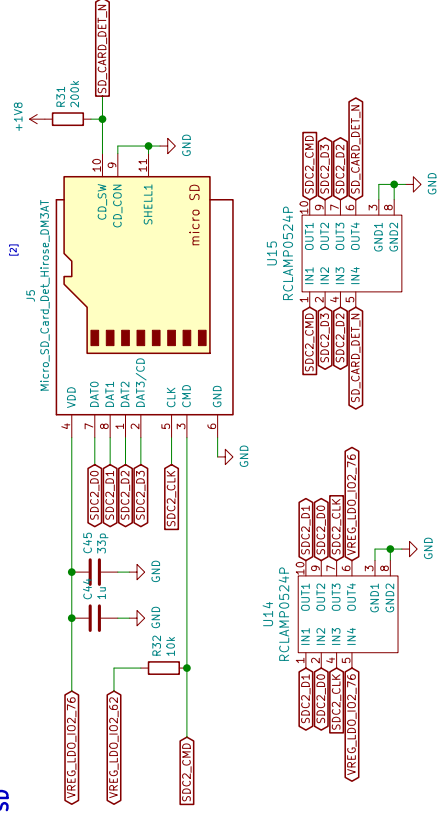
T1



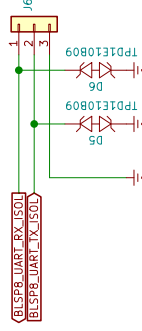
USB



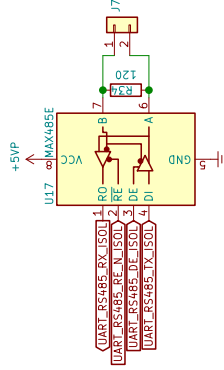
SD



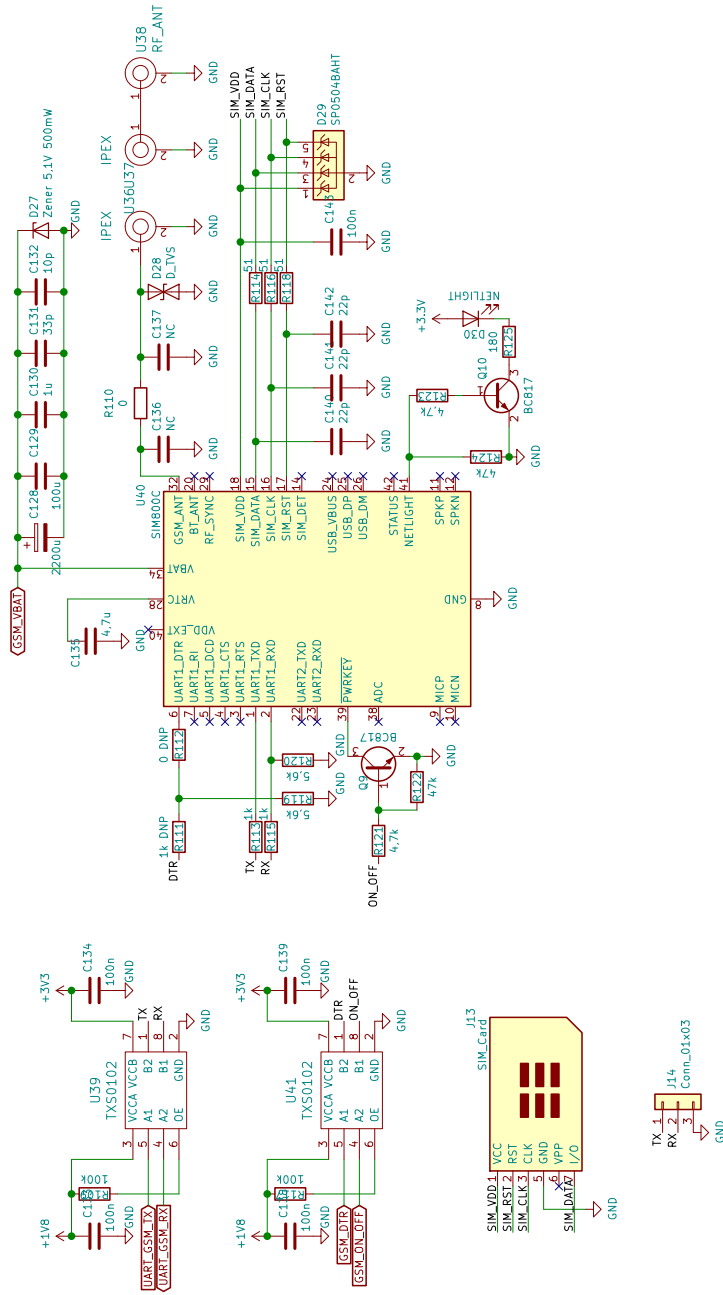
UART 5V



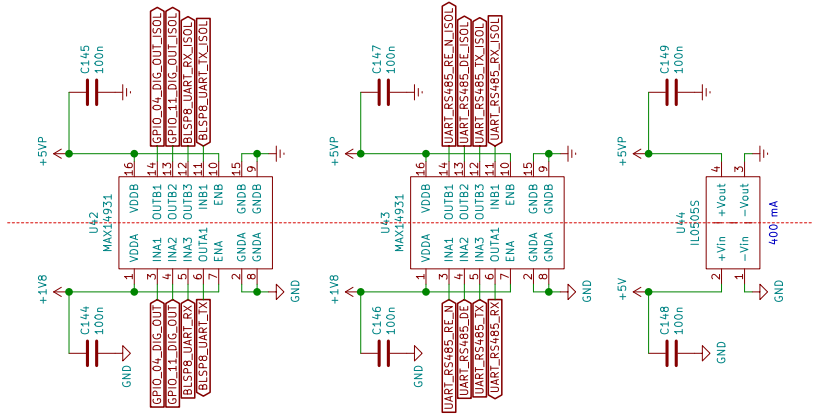
RS485

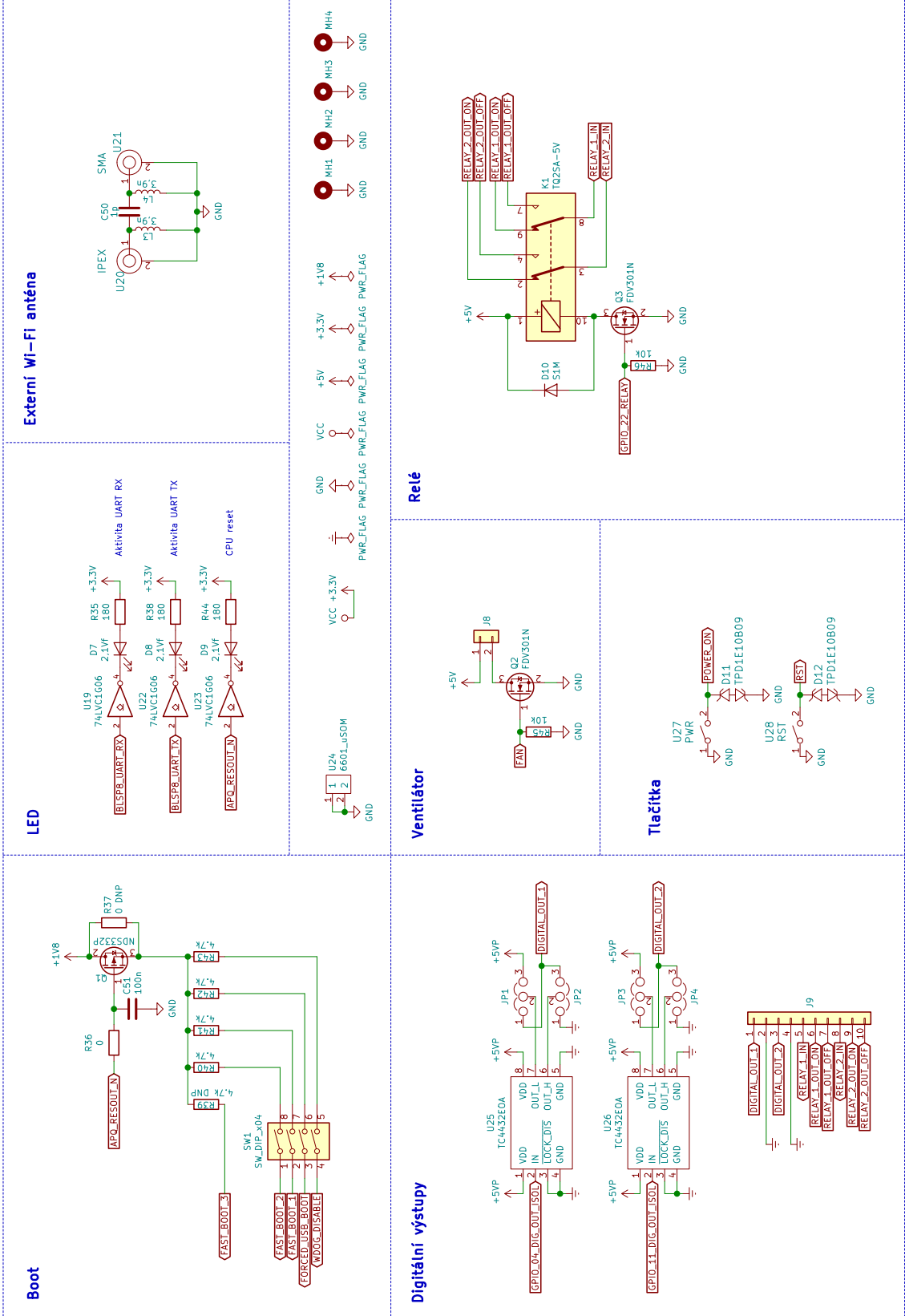


GSM



Galvanické oddělení





Externí Wi-Fi anténa

LED

Boot

Relé

Ventilátor

Digitální výstupy

Tlačítka