



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

IMPLEMENTACE TECHNOLOGIE POWER OVER ETHERNET

POWER OVER ETHERNET IMPLEMENTATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Šturala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Martin Šturala

ID: 186212

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Implementace technologie Power over Ethernet

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhňte a realizujte kompaktní modul pro napájení pomocí Power over Ethernet (PoE) technologie. Uvažujte jak pasivní, tak aktivní PoE. Výstupní napětí modulu bude volitelné, 3,3V nebo 5V.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] IEEE Standard for Ethernet Amendment 2: Physical Layer and Management Parameters for Power over Ethernet over 4 pairs. New York, USA: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8632920.

[2] BILLINGS, Keith H. Switchmode power supply handbook. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, 1999, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 0-07-006719-8.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Krajsa, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je navrhnout a realizovat napájecí modul pro koncové síťové zařízení s volitelným výstupem 5 V nebo 3,3 V, který podporuje technologii power over ethernet, a to jak pro aktivní, tak pro pasivní metodu této technologie. Práce je zaměřena na návrh hardwarového řešení tohoto problému. Pro realizaci části s aktivním POE byl zvolen čip od firmy Texas Instruments TPS2373, který podporuje nejnovější technologii podle specifikace IEEE802.3bt. Pro implementaci pasivního POE byl zvolen lineární regulátor LM317.

Klíčová slova

Power over ethernet, LAN, EAGLE, POE PD, aktivní POE, pasivní POE, DC-DC měnič, IEEE802.3af, IEEE802.3at, IEEE802.3bt Texas Instruments, POE pro vysoký výkon

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to design and implement a power supply module for an end station network device with an optional 5 V or 3.3 V output, which supports power over ethernet technology, both for active and passive method of this technology. The work is focused on the design of a hardware solution to this problem. A Texas Instruments TPS2373 chip supporting the latest technology according to the IEEE802.3bt specification was chosen to implement active POE. The LM317 linear stabilizer was chosen to implement the passive POE.

Keywords

Power over ethernet, LAN, Eagle software, POE PD, active POE, passive POE DC-DC converter, IEEE802.3af, IEEE802.3at, IEEE802.3bt Texas Instruments, high power POE

Bibliografická citace:

Citace tištěné práce:

ŠTURALA, Martin. Implementace technologie Power over Ethernet. Brno, 2020.

Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125944>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Krajsa.

Citace elektronického zdroje:

ŠTURALA, Martin. Implementace technologie Power over Ethernet [online].

Brno, 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125944>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Krajsa.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Krajsovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Obsah

| | | |
|---------|--|----|
| 1. | Úvod..... | 13 |
| 2. | Teoretický rozbor | 14 |
| 2.1 | Pasivní POE | 14 |
| 2.2 | Aktivní POE..... | 16 |
| 2.2.1 | Standardy a výkonové třídy | 17 |
| 2.2.1.1 | IEEE 802.3af POE..... | 17 |
| 2.2.1.2 | IEEE802.3at POE+ | 18 |
| 2.2.1.3 | IEEE802.3bt 4PPOE..... | 18 |
| 2.3 | Zařízení POE PD..... | 19 |
| 2.4 | Zařízení POE PSE | 19 |
| 2.4.1 | Volba výkonové třídy a módy zařízení PD..... | 19 |
| 3. | Zařízení na trhu | 21 |
| 4. | Použité součástky | 22 |
| 4.1 | POE PD interface TPS2373-4..... | 22 |
| 4.2 | PWM DC/DC kontrolér UCC2897 | 22 |
| 4.3 | Pasivní součástky | 22 |
| 5. | ZPRACOVÁNÍ..... | 23 |
| 5.1 | Parametry navrženého zařízení POE PD..... | 23 |
| 5.2 | Vstupní část..... | 24 |
| 5.3 | Pasivní POE | 25 |
| 5.4 | Aktivní POE..... | 25 |
| 5.4.1 | POE PD interface..... | 25 |
| 5.4.2 | DC/DC měnič | 26 |
| 5.4.3 | Výstupní část..... | 28 |
| 5.4.4 | Výběr součástek..... | 28 |
| 5.5 | Návrh desky plošných spojů | 29 |
| 5.6 | Výroba a testování..... | 31 |
| 5.6.1 | Výroba a osazování DPS | 31 |
| 5.6.2 | Zprovoznění DPS..... | 32 |
| 5.6.3 | Testování výrobku POE PD..... | 32 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.6.3.1 | Spouštění a počáteční komunikace..... | 32 |
| 5.6.3.2 | Transientní odezva DC/DC měniče..... | 34 |
| 5.6.3.3 | Zatěžovací charakteristika POE PD | 35 |
| 6. | Stručný návod k obsluze poE PD..... | 37 |
| 6.1 | Pasivní POE | 37 |
| 6.2 | Aktivní POE | 37 |
| 7. | ZÁVĚR | 38 |

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

| | | |
|-------|-----|--|
| FEKT | ... | Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií |
| VUT | ... | Vysoké učení technické v Brně |
| POE | ... | Power over ethernet (napájení přes ethernet) |
| PD | ... | Powered device (napájené zařízení) |
| PSE | ... | Power supply equipment (napájecí zařízení) |
| RJ-45 | ... | Označení konektoru využívaného pro ethernet |
| LAN | ... | Local area network (místní síť) |
| UTP | ... | Unshielded twisted pair (nestíněná kroucená dvoulinka) |
| MPS | ... | Maintain power signature (zachování napájení v POE) |
| LED | ... | Light emitting diode (světelná dioda) |
| DPS | ... | Deska plošných spojů |
| PTZ | ... | Pan, tilt, zoom (používáno u kamer se zoomem a naklápěním) |
| PWM | ... | Pulse width modulation (pulzně šířková modulace) |
| AP | ... | Access point (přístupový bod) |
| IEEE | ... | Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství) |
| IP | ... | Internet protocol (internetový protokol) |
| DC | ... | Direct current (stejnoseměrný proud) |
| IoT | ... | Internet of Things (internet věcí) |

Symboly:

| | | | |
|---|-----|--------|-----|
| U | ... | Napětí | [V] |
| I | ... | Proud | [A] |
| R | ... | Odpor | [Ω] |
| P | ... | Výkon | [W] |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1-1 Zapojení zařízení, které není uzpůsobené pro napájení pomocí POE..... | 15 |
| Obr. 1-2 Zapojení zařízení, které je uzpůsobeno pro napájení pomocí POE..... | 15 |
| Obr. 1-3 Vnitřní zapojení POE injektoru, který řeší přenos výkonu po nevyužitých párech [27] | 16 |
| Obr. 1-4 Vnitřní zapojení POE využívající mód A i mód B [25]..... | 18 |
| Obr. 1-5 vnitřní zapojení využívající přenosu pomocí fantomového napětí [26]..... | 18 |
| Obr. 1-6 Zobrazení jednotlivých kroků od detekce až po spuštění zařízení [5] | 20 |
| Obr. 1-7 Zobrazení jednotlivých módů a napěťových úrovní zařízení [5] | 20 |
| Obr. 4-1 Blokové schéma zařízení POE PD, černá šipka (výkonové cesty), modrá šipka (řídící signály) | 23 |
| Obr. 4-2 Zapojení vstupního a výstupního RJ45 konektoru a lan transformátoru.... | 24 |
| Obr. 4-3 Zapojení filtračních prvků | 24 |
| Obr. 4-4 Zapojení lineárního regulátoru | 25 |
| Obr. 4-5 Výkonové třídy POE PD dle volby rezistorů [5] | 26 |
| Obr. 4-6 Zapojení POE PD interface | 26 |
| Obr. 4-7 Zapojení DC/DC měniče | 27 |
| Obr. 4-8 Zapojení výstupní části..... | 28 |
| Obr. 4-9 Pohled na horní stranu modelu desky plošných spojů | 30 |
| Obr. 4-10 Pohled na spodní stranu modelu desky plošných spojů | 30 |
| Obr. 4-11 Pohled na horní stranu osazené desky | 31 |
| Obr. 4-12 Komunikační sekvence s POE PSE Tenda, napětí na vstupu (žlutý průběh), vstupní proud (zelený průběh)..... | 33 |
| Obr. 4-13 Komunikační sekvence s POE PSE MaxLink, napětí na vstupu (žlutý průběh), vstupní proud (zelený průběh)..... | 33 |
| Obr. 4-14 Komunikační sekvence s POE PSE MaxLink včetně spuštění 28W zátěže, napětí na vstupu (žlutý průběh), vstupní proud (zelený průběh) | 34 |
| Obr. 4-15 Transientní odezva od 1 A do 4 A pro 5 V při napájení 55 V..... | 34 |
| Obr. 4-16 Transientní odezva od 2A do 8 A pro 3,3 V při napájení 55 V..... | 35 |
| Obr. 4-17 Zatěžovací charakteristika POE PD při 5 V..... | 35 |
| Obr. 4-18 Zatěžovací charakteristika POE PD při 3,3 V | 36 |

Obr. 4-19 Graf účinností POE zařízení..... 36

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 Výkonové třídy a označení typu dle definovaných standardů | 17 |
| Tabulka 2 Stručný přehled zařízení | 21 |
| Tabulka 3 Volba střídy MPS pomocí jumperu JP3 | 37 |
| Tabulka 4 Volba výkonové třídy pomocí jumperu JP5 a JP2..... | 37 |
| Tabulka 5 vysvětlivka k indikačním LED | 37 |

1. ÚVOD

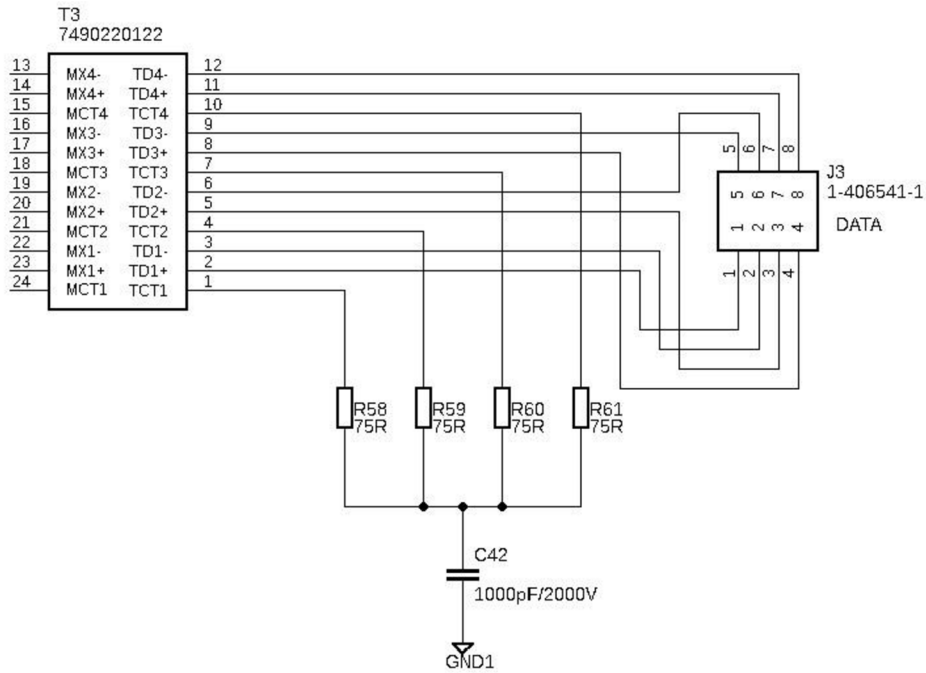
Technologie power over ethernet je v současnosti více využívána pro napájení síťových zařízení pomocí ethernetového kabelu, a to až do vzdálenosti 100 m. Napájení zařízení pomocí POE je velmi rozšířené, využívá se pro napájení IP kamer, IP telefonů, přístupových bodů, síťových senzorů a dalších zařízení. Tato technologie zajišťuje možnost centralizovaného napájení více zařízení najednou, šetří také prostředky při zapojování v místech, kde není dovedena elektřina. Centralizovaným napájením je možno zálohovat všechna zařízení najednou bez nutnosti pořizování více zálohovacích zdrojů. Při správě systému využívajícího POE je možno provést tvrdý reset zařízení z jednoho místa. POE, které je definováno standardy IEEE začalo v roce 2003 definicí IEEE802.3.af, který definoval až 15,4 W a 4 výkonové třídy, na kterých se napájené zařízení s napáječem byly schopné dohodnout. Výhody POE nezůstaly od té doby stranou a nároky na požadovaný výkon rostly, proto vznikla definice IEEE802.3at, která umožňuje dodávat až 30 W. Nejnovější je ovšem definice IEEE802.3.bt z roku 2018, která definuje výkony do 90 W. S tímto výkonem je možné napájet téměř jakékoli síťové zařízení, ať už je to IP kamera, nebo infomační kiosk. Dále existuje pasivní POE, které není definováno standardem a obvykle využívá nižší napětí. Výkony, které definuje IEEE802.3bt by za použití pasivního POE s nižším napětím nebylo možné přenášet, kvůli proudové zatížitelnosti vodičů. Z tohoto důvodu bylo také aktivní POE definováno, aktivní POE využívá totiž napětí 48-57 V. S využitím vyššího napětí a všech párů v kabelu je možné přenést o dost vyšší výkon než při použití pasivního POE. Aktivní POE také přináší možnosti volby výkonu a komunikace napájeného zařízení s napáječem.

2. TEORETICKÝ ROZBOR

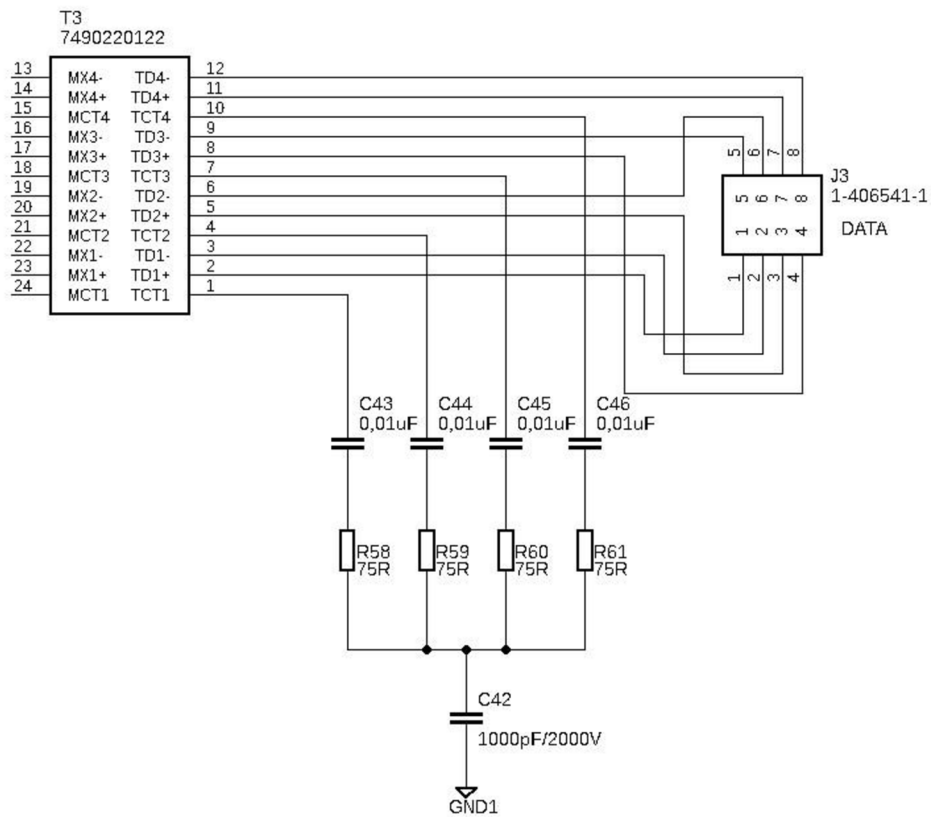
Technologii POE můžeme rozdělit na 2 části, pasivní a aktivní. Pasivní POE je možno využít pro přenos menších výkonů na kratší vzdálenosti. Pokud jsou pro přenos výkonu použity nevyužité páry je možné dosáhnout pouze rychlostí do 100Mb/s. Aktivní POE je možno využít pro vyšší výkony na delší vzdálenost, princip je založen na přenosu výkonu pomocí fantomového napětí a tím pádem je možné využívat všechny vodiče v kabelu, jak pro napájení, tak pro přenos dat, tudíž podporují rychlosti nad 100Mb/s. Někteří výrobci síťových zařízení prodávají pro své výrobky pasivní POE injektory s podporou 1Gb/s, tyto injektory využívají také přenos napájení pomocí fantomového napětí podobně jako u aktivního POE. Rozlišují mód A (přenos po párech 1-2 a 3-6) a mód B (přenos po párech 4-5 a 7-8). Tyto injektory ovšem obvykle nesplňují IEEE specifikaci a jsou certifikované pro použití pouze s konkrétním zařízením. Také se obvykle jedná o injektory bez jakékoliv logiky nebo řízení režimů. Ve spojení s POE se setkáváme s pojmy midspan a endspan. Midspan je označení pro napájecí zařízení, které musí být vloženo mezi datovou linku, například POE injektor. Endspan označení se používá pro zařízení, které již na výstupu podporuje napájení, například POE switch.

2.1 Pasivní POE

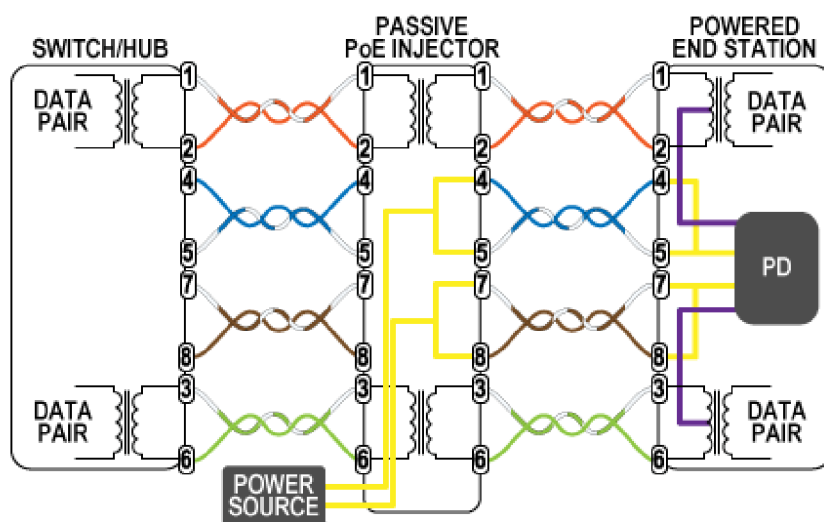
Při použití pasivního POE může být výkon přenášen přes nevyužité páry 4-5 a 7-8 v UTP kabelu, nebo se využívá přenos pomocí fantomového napětí ovšem bez logiky a jakékoli komunikace. Většinou je využíváno napětí, které je vyžadováno na straně napájeného zařízení, typicky však 24 V. Pro připojení napájení slouží takzvaný POE injektor, za injektorem jsou v UTP kabelu společně data i napájení. Jedná se pouze o propojení napájecího adaptéru a nevyužitých párů. U napájeného zařízení je opět napájecí napětí pomocí POE extraktoru odděleno a dále pokračují samostatně data a napájení. Injektor a extraktor je velmi snadné vyrobit i v domácích podmínkách viz Obr. 2-3. Pokud připojíme kabel s POE do zařízení, které není pro takovéto napájení uzpůsobeno, hrozí nám jeho zničení. Pro napájení je nutné použít extraktor nebo zařízení, které již má extraktor integrovaný. Po připojení k nekompatibilnímu zařízení, hrozí nejčastěji zničení zakončovacích 75 ohm odporů viz Obr. 2-1, které nejsou odděleny kondenzátory nebo může dojít přímo ke zničení fyzické vrstvy v zařízení. Na Obr. 2-2 je znázorněno uzpůsobené zapojení s kondenzátory, které platí pro pasivní i aktivní POE.



Obr. 2-1 Zapojení zařízení, které není uzpůsobené pro napájení pomocí POE



Obr. 2-2 Zapojení zařízení, které je uzpůsobeno pro napájení pomocí POE



Obr. 2-3 Vnitřní zapojení POE injektoru, který řeší přenos výkonu po nevyužitých párech [27]

2.2 Aktivní POE

Při použití aktivního POE je více variant, jak je možné výkon přenášet, podle způsobu zapojení rozlišujeme 2 módy, mód A a B. Mód A využívá přenosu výkonu s daty pomocí fantomového napětí. Mód B pracuje s nevyužitými páry kabelu, ovšem pouze pro rychlosti do 100Mb/s viz Obr. 2-4. Pro rychlosti nad 100Mb/s je přenos výkonu po všech párech řešen pomocí fantomového napětí. Standardy IEEE definují přenos po 2 párech pro IEEE802.3af. Pro IEEE802.3at pro max 30 W (typ2) a IEEE802.3bt je definován již přenos po všech 4 párech. Díky tomu je možné přenést oproti předchozímu standardu více než dvojnásobný výkon. Zařízení POE PSE dokáže rozlišit, zda připojené zařízení POE PD podporuje aktivní POE díky přítomnosti zatěžovacího rezistoru 24.9 k Ω . Po připojení zařízení s podporou aktivního POE probíhá domluva výkonové třídy pomocí protokolu založeného na proudovém odběru o specifické hodnotě pro jednotlivé výkonové třídy. Pokud zařízení POE PD žádá o vyšší třídu, než je možno POE PSE dodat, není mu přiděleno a zařízení se nespustí. Pokud se zařízení dohodnou a jsou kompatibilní, pak se zařízení POE PSE spustí. O počáteční komunikaci se stará POE PSE. V průběhu napájení musí POE PD dodržovat určenou výkonovou třídu, aby zůstalo napájení aktivní. Pokud chce zařízení POE PD přejít do pohotovostního režimu může informovat zařízení POE PSE o tom, že je stále aktivní a že odběr proudu není způsoben poruchou pomocí takzvaného MPS (maintain power signature), tato komunikace je založena opět na proudovém odběru v daných pulsech. Výhodou aktivního POE je podpora vyšších výkonů, což umožní napájení i složitějších a náročnějších zařízení přes jeden kabel společně s přenosem dat. Využití může být například v průmyslových kamerách s PTZ nebo ve výkonných wifi vysílačích. Největší výhodou při využití aktivního POE spočívá v možnosti detekce, zdali koncové zařízení tento druh napájení podporuje a také v možnosti přerozdělení výkonu dle požadavku koncového zařízení, například ve switchi. Výhodou může být také detekce, zdali je zařízení aktivní, nebo je v pohotovostním režimu. Aby bylo možné pomocí aktivního POE přenášet výkony kolem 70 W pracuje se zde s napětím až 48–57 V.

2.2.1 Standardy a výkonové třídy

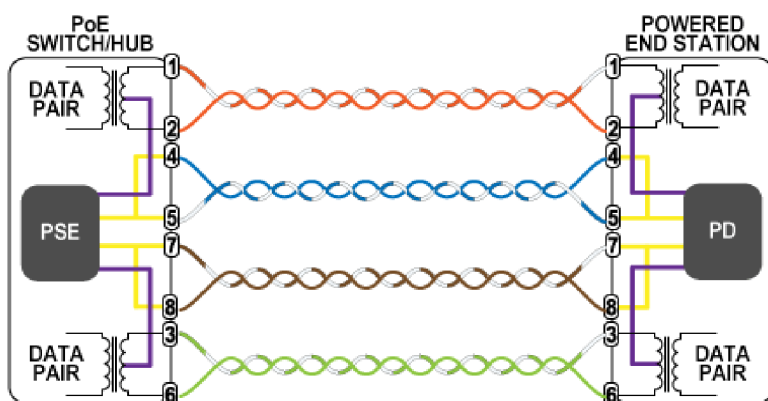
Aktivní POE je definováno pomocí standardu IEEE802.3af, IEEE802.3at a IEEE802.3bt. Standardy byly definovány postupně a podle toho také byly přidávány výkonové třídy a vlastnosti, které třída podporuje. Hlavními rozdíly jsou ovšem podporované výkony, které se s jednoduššími standardy více než zdvojnásobují. Standard definuje maximální výkony jak pro PSE, tak pro PD. Tabulka 1 znázorňuje výkony, výkonové třídy a typy zařízení pro jednotlivé standardy.

Tabulka 1 Výkonové třídy a označení typu dle definovaných standardů

| | Standard | IEEE802.3af | IEEE802.3at | IEEE802.3bt |
|-------|----------|-------------|-------------|-------------|
| | Rok | 2003 | 2009 | 2018 |
| | třída | 0-3 | 0-3 | 0-3 |
| Typ 1 | PSE | 15,4 W | 15,4 W | 15,4 W |
| | PD | 13 W | 13 W | 13 W |
| Typ 2 | třída | | 4 | 4 |
| | PSE | | 30 W | 30 W |
| | PD | | 25,5 W | 25,5 W |
| Typ 3 | třída | | | 5 |
| | PSE | | | 45 W |
| | PD | | | 40 W |
| | třída | | | 6 |
| | PSE | | | 60 W |
| Typ 4 | třída | | | 7 |
| | PSE | | | 75 W |
| | PD | | | 62 W |
| | třída | | | 8 |
| | PSE | | | 90 W |

2.2.1.1 IEEE 802.3af POE

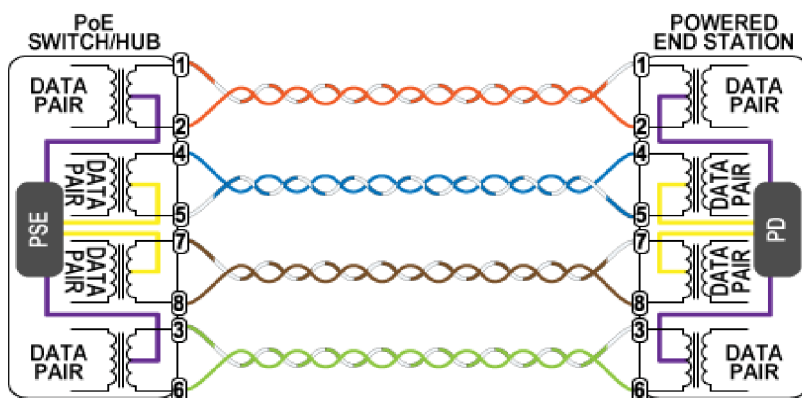
Standard uveden v roce 2003 definuje výkon POE PSE na 15,4W ve 4 výkonových třídách 0-3. Podporuje přenos po 2 párech v ethernetovém kabelu minimálně Cat.3. POE PSE bývá také označován jako typ 1. V současnosti je využíván v méně náročných zařízeních například wifi AP nebo kamery bez PTZ nebo IP telefonie.



Obr. 2-4 Vnitřní zapojení POE využívající mód A i mód B [25]

2.2.1.2 IEEE802.3at POE+

Standard uveden v roce 2003 definuje výkon POE PSE na 30 W. Zahrnuje podporu IEEE 802.3af, tudíž přenos po 2 párech pro typ 1. Typ 1 může využívat i přenosu po 4 párech, ovšem bez podpory rychlosti 1Gb/s, protože přenos výkonu po nevyužitých párech. Nově je definován typ 2, který podporuje přenos výkonu až 30 W po 4 párech, využívající přenos pomocí fantomového napětí viz Obr. 2-5. Pro tento výkon přibyla výkonová třída 4. Pro IEEE802.3at je doporučeno použití ethernetovém kabelu minimálně Cat.5.



Obr. 2-5 vnitřní zapojení využívající přenosu pomocí fantomového napětí [26]

2.2.1.3 IEEE802.3bt 4PPOE

Nejnovější standard uveden v roce 2018 definuje nově POE PSE typ 3 a typ 4, pro POE PD jsou definovány třídy 5, 6, 7 a 8. Pro POE PSE typu 3 je možno využívat výkon do 60 W, pro typ 4 až 90 W. Standard nově podporuje automatickou klasifikaci třídy, vylepšuje podporu pro pohotovostní režim a s ním spojený MPS, také využívá možnost měření odporu vedení a díky tomu může POE PSE započítat ztráty na vedení a optimalizovat výstupní výkon. Přenos napětí je uskutečněn po všech 4 párech pomocí fantomového napětí, viz Obr. 2-5. Výkony podporované tímto standardem budou mít

využití při vývoji chytrého osvětlení, napájení informačních tabulí nebo výkonných radiových vysílačů.

2.3 Zařízení POE PD

Zařízení nazývané jako POE PD neboli power over ethernet powered device je koncové napájené zařízení. Řídící obvod, který se stará o počáteční komunikaci, určení výkonové třídy a udržení napájení i pohotovostního režimu, se nazývá POE PD interface. Interface po připojení POE PSE začíná fungovat a reaguje na to odpojením detekčního odporu $24.9\text{ k}\Omega$ mezi již LAN transformátorem oddělené napájení VSS a VDD. Po uplynutí detekčního času odpojí detekční odpor a přikládá odpory klasifikační, podle kterých je určena výkonová třída POE PD.

Zařízení POE PD jsou obvykle koncová zařízení jako například IP telefony, kamery, informační kiosky, komunikátory či IoT zařízení. V dnešní době se také využívají routery s podporou napájení pomocí POE, tyto routery obvykle dokážou napájení také dále distribuovat. POE PD zařízení bývá, co se týká zpracování, obvykle méně komplexní oproti POE PSE, implementuje pouze jeden port.

2.4 Zařízení POE PSE

Zařízení nazývané jako POE PSE neboli power over ethernet power supply equipment je napájecí zařízení. Toto zařízení dokáže rozpoznat, zdali připojené zařízení podporuje POE nebo ne. Zařízení podporující aktivní POE mají připojený $24.9\text{ k}\Omega$ zatěžovací odpor na vedení a POE PSE detekuje odpor pomocí proudu, který protéká citlivými snímacími odpory, které detekují proud okolo 2 mA . Po rozpoznání zařízení, se přechází ke klasifikaci, pokud proběhne v pořádku, tak jsou přiděleny napájenému zařízení prostředky, o které si zažádalo. POE PSE jsou vyráběny, buď jako koncová zařízení tzn. switche nebo routery, nebo jako samostatné napáječe podobně jako pasivní injektory.

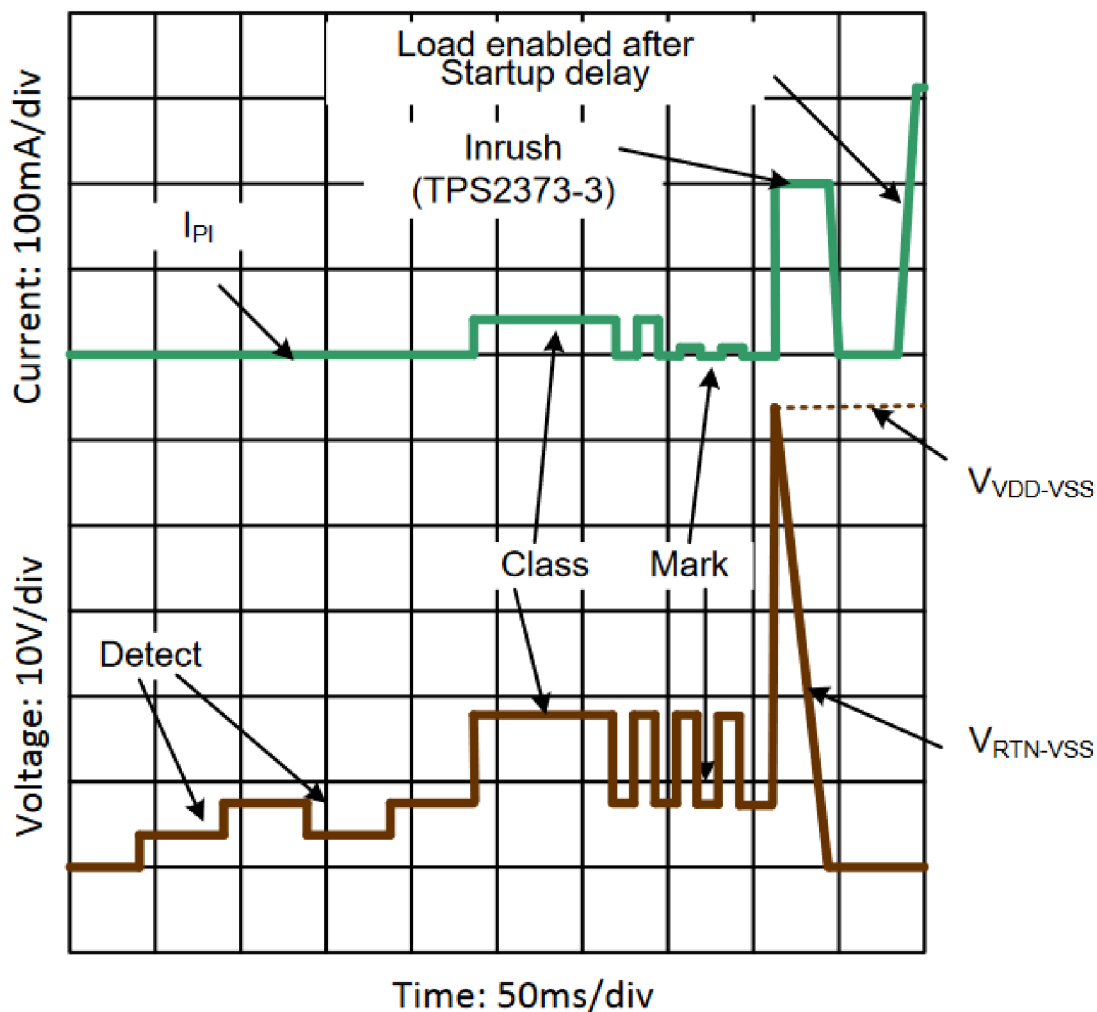
2.4.1 Volba výkonové třídy a módy zařízení PD

Napěťové rozsahy a operační módy POE PD jsou popsány na Obr. 2-7. Na Obr. 2-6 je popsán princip, jakým se domlouvají zařízení a v jakých při tom pracují napěťových rozsazích. Na Obr. 2-6 je konkrétně vyobrazeno domluvení se na výkonové třídě 6. průběhy napětí a proudu na obrázku jsou pro POE PD interface tps2373. Tento obvod je použitý v praktické části, ovšem tyto průběhy jsou pro všechna zařízení totožná.

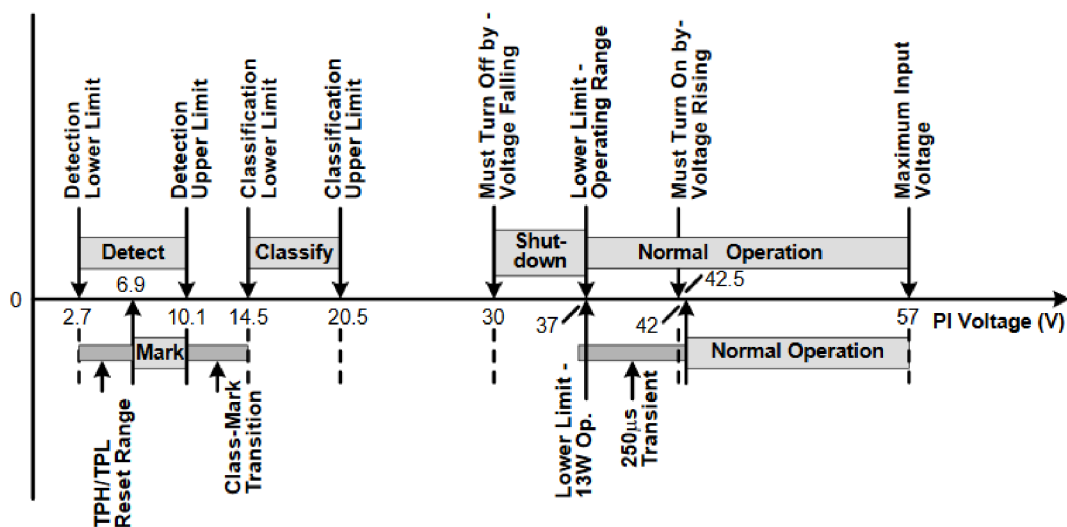
I_{PI} představuje proud do zařízení jako celku

$V_{RTN-VSS}$ je napětí mezi piny POE PD interface

$V_{VDD-VSS}$ je napětí za filtračním článkem



Obr. 2-6 Zobrazení jednotlivých kroků od detekce až po spuštění zařízení [5]



Obr. 2-7 Zobrazení jednotlivých módů a napěťových úrovní zařízení [5]

3. ZAŘÍZENÍ NA TRHU

Na trhu je dostupné nepřehledné množství zařízení s podporou POE. Poslední dobou se neustále více rozšiřuje aktivní POE, počínaje od IP kamer až po různá IoT zařízení. Výhodou při použití pasivního POE může být cena a způsob zapojení, ovšem při využití aktivního POE odpadá použití injektoru a extraktoru, který je obvykle nutné schovat do další instalační krabičky například u IP kamer. Při použití aktivního POE odpadá starost s napěťovou kompatibilitou, protože by mělo být využíváno jednotné napětí. Pro napájení více zařízení za použití jednoho zdroje je v případě využití pasivního POE možné využít tzv. POE injektor panel. U těchto panelů je nutné kontrolovat proudový odběr jednotlivých zařízení a také je nutný switch pro propojení více zařízení. V případě aktivního POE jsou dostupné POE switche, které v sobě integrují POE PSE. V Tabulka 2 jsou uvedeny parametry a orientační ceny dostupných POE zařízení.

Tabulka 2 Stručný přehled zařízení

| Zařízení | Typ POE | Rychlost | Cena | Obrázek |
|---|---------|----------|---------|--|
| injektor/extraktor | Pasivní | 100Mb/s | 99 Kč |  [18] |
| Injektor Mikrotik Injektor využívaný firmou Mikrotik pro napájení svých zařízení | Pasivní | 1Gb/s | 113 Kč |  [14] |
| injektor panel 8 portů Pasivní injektor panel umožňující volbu pracovního módu a proudovou ochranou 650mA na portech | pasivní | 1 Gb/s | 883 Kč |  [15] |
| Tenda POE PSE 802.3af POE PSE typu 1, podporující výkon 15 W, 48 V | aktivní | 100 Mb/s | 199 Kč |  [23] |
| MaxLink POE PSE 802.3af/at/bt POE PSE typu 3 podporující výkon 60 W, 55 V | aktivní | 1 Gb/s | 979 Kč |  [17] |
| POE switch netis PE6108G 155 W 8 portů aktivní POE switch s podporou 802.3af/at s výkonem 30 W/port | Aktivní | 1Gb/s | 2739 Kč |  [21] |

4. POUŽITÉ SOUČÁSTKY

Součástky použité při návrhu zařízení se z velké části opírají o doporučení výrobce POE PD interface, který uvádí seznam kompatibilních součástek, které je možné pro výrobu zařízení využít. Z hlediska pasivních součástek hraje především roli tolerance hodnot. U cívek a transformátorů musí být brán ohled na proudovou zatížitelnost a kompatibilitu se standardy IEEE802.3bt.

4.1 POE PD interface TPS2373-4

Interface od firmy Texas Instruments podporuje výkonové třídy pro POE IEEE 802.3bt typ 3 (60 W) a typ 4 (90 W). Interface je zpětně kompatibilní se standardem IEEE 802.3at a IEEE 802.3af. Interface je vybaven automatickým řízením signatury napájení, což zajišťuje komunikaci a alokaci výkonu na straně zdroje i když je napájené zařízení v úsporném režimu. Pomocí vstupních pinů CLSA a CLSB je možno vhodnou kombinací zvolit požadovanou výkonovou třídu, a to v osmi třídách. Dále je vybaven vstupem pro detekci externího napájení, v tomto režimu se počítá s tím, že zařízení není napájeno pomocí POE, ale z externího adaptéru. Pokud je na tento pin přivedeno napětí, pak je vnitřní mosfet vypnut a je využíván externí napájení. Výhodou tohoto interface je výstupní pin PG (power good), který slouží k řízení DC/DC měniče. V případě, že se interface dohodne na požadovaném výkonu, slouží tento pin ke spuštění měniče, tímto je zajištěno, že není měnič spuštěn v počáteční komunikační sekvenci, ale až po ní kdy je alokovan výkon na straně POE PSE. Interface je vyráběn ve 20 vývodovém VQFN pouzdře.

4.2 PWM DC/DC kontrolér UCC2897

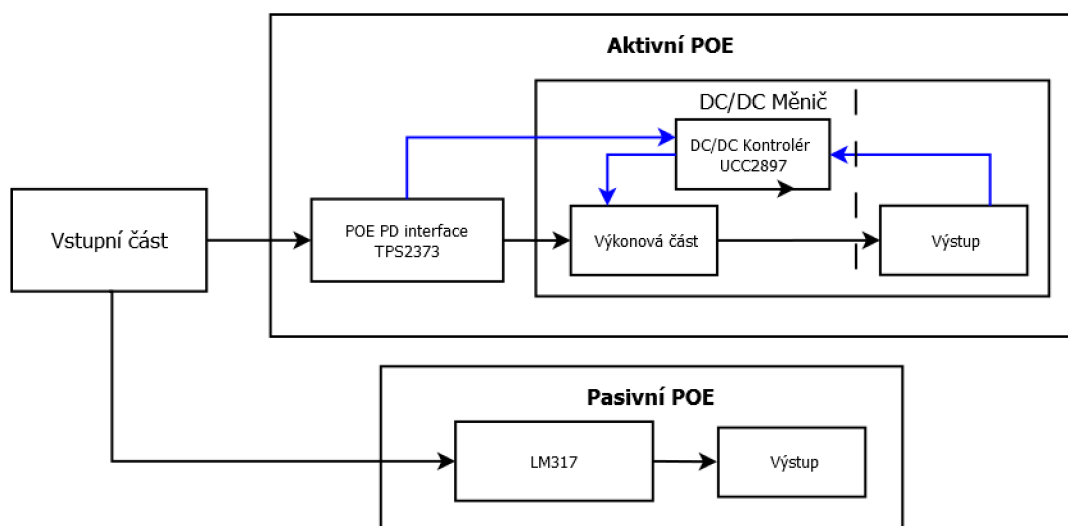
Kontrolér, určený k řízení jednočinného propustného měniče, podporující funkci soft startu, je vybaven přepětovou a podpětovou ochranou na vstupu, která umožňuje odpojení výstupu a zastavení činnosti měniče v případě poruchy. Umožňuje nastavení časového zpoždění spínání mezi hlavním a pomocným výstupem. Je určen pro aplikace v DC/DC měničích s vysokou účinností se zaměřením na datové komunikace a automobilový průmysl, kde se pracuje s napětími kolem 50 V. kontrolér je vyráběn ve 20 vývodovém VQFN pouzdře.

4.3 Pasivní součástky

Pasivní součástky byly zvoleny dle doporučení s přesností hodnoty 1 % pro případy, kde by mohla nepřesnost hodnoty ovlivnit funkci zařízení, například u detekčního nebo klasifikačního odporu. Lan transformátor je kompatibilní se standardem IEEE 802.3bt. Ostatní cívky a transformátor byly voleny tak, aby splňovaly proudovou zatížitelnost a požadovanou hodnotu.

5. ZPRACOVÁNÍ

Zařízení bylo navrženo tak, aby bylo schopné využívat POE jak aktivní, tak pasivní variantu a jeho výstupem bylo volitelně 5 V nebo 3,3 V. Z výkonových důvodů jsou aktivní a pasivní POE rozděleny na samostatné části. Celkově je pak možné zařízení rozdělit na 3 části, jak je znázorněno na blokovém schématu na Obr. 5-1. Při návrhu aktivní části byl použit POE PD interface TPS2373 v kombinaci s PWM kontrolérem pro řízení DC-DC měniče UC2897A od firmy Texas Instruments. Zařízení bylo navrženo tak, aby bylo možné určovat výkonové třídy podle potřeby. Změna výkonové třídy se provádí pomocí dvou pinových lišt a vhodnou kombinací zvolených propojek. POE PD interface TPS2373 podporuje technologii 802.3bt, která umožňuje napájenému zařízení odebírat při nejvyšší dohodnuté výkonové třídě až 70 W. V tomto případě je využito napájení po všech 4 párech LAN kabelu. Výstupní výkonová část aktivního POE je galvanicky oddělená od vstupních obvodů. Aktivní část navrženého POE PD je možné využít při napájení výkonově náročných zařízení. V části s pasivním POE byl využit lineární nastavitelný regulátor LM317 se vstupem do 37 V. Výkon v této větvi je omezen na 7,5 W pro 5 V a 3,5 W pro 3,3 V. Zařízení je vybaveno 2 konektory RJ45 jeden pro vstup dat a napájení a druhý pro výstup dat.



Obr. 5-1 Blokové schéma zařízení POE PD, černá šipka (výkonové cesty), modrá šipka (řídící signály)

5.1 Parametry navrženého zařízení POE PD

Pasivní POE 7–37 V

Aktivní POE pro standardy, IEEE 802.3af, at, bt 48 V/55 V

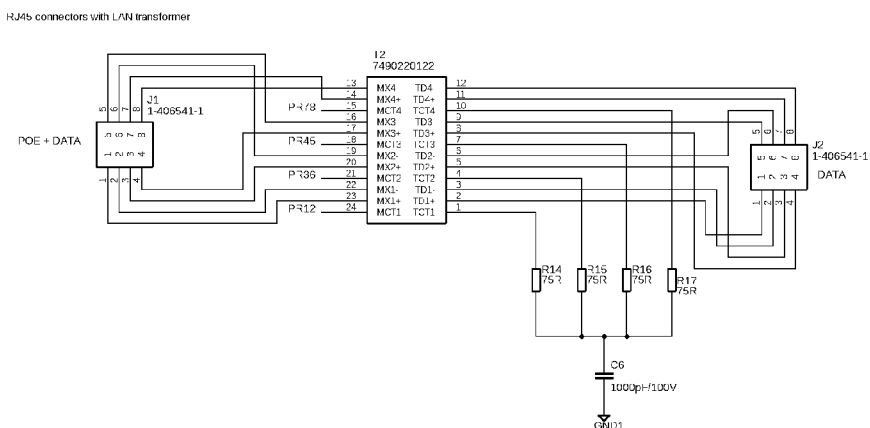
Maximální výkon 70 W pro aktivní POE 5 V/14 A, 3 V/23 A

Maximální výkon 7,5 W/4,5 W pro pasivní POE 5 V/1,5 A, 3 V/1,5 A

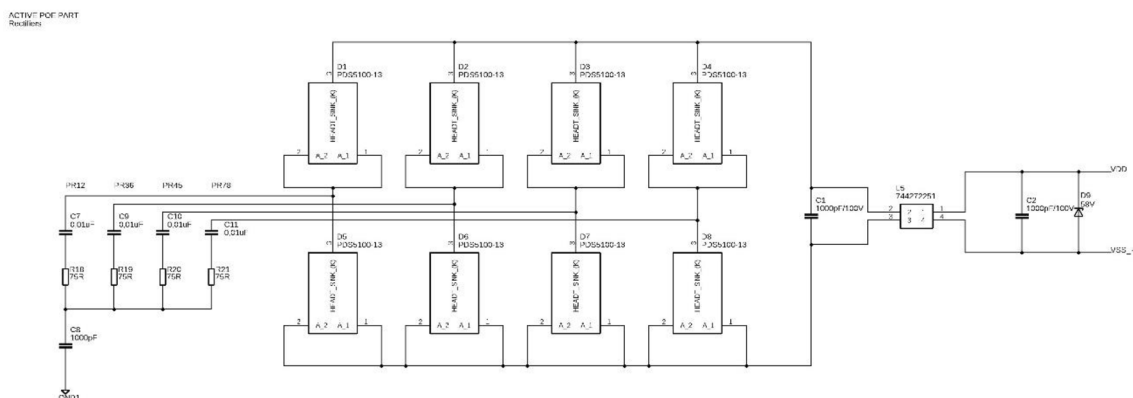
Výstupní napětí obou větví volitelné: 5 V /3,3 V

5.2 Vstupní část

Vstupní obvod začíná konektorem RJ-45, na který jsou přivedena data včetně napájení. Napájení je odděleno pomocí LAN transformátoru viz Obr. 5-2, ze kterého jsou vyvedeny středy z párového zapojení vodičů UTP kabelu. Páry jsou standardně zapojeny ve dvojicích 1-2, 3-6, 4-5, 7-8. Pro zachování impedance vedení 75ohmů je použito sériové zapojení kondenzátoru a odporu na každém středu LAN transformátoru z napájecí strany, na straně výstupní jsou pouze odpory. Pokud by nebyly použity kondenzátory, mohlo by dojít ke zničení zakončovacích odporů a zařízení by bylo nefunkční. Tímto zapojením je zaručena kompatibilita s POE. Za párovými vývody z LAN transformátoru následuje diodový můstek sloužící k filtraci vstupního napětí a oddělení zařízení od střídavé složky, na diodový můstek byly použity výkonové 5 A schottkyho diody. Za můstkem je zapojen kondenzátor a filtrační dvojitá cívka viz Obr. 5-3. Za filtračním obvodem je již napětí vstupující do interface TPS2373 a DC-DC měniče.



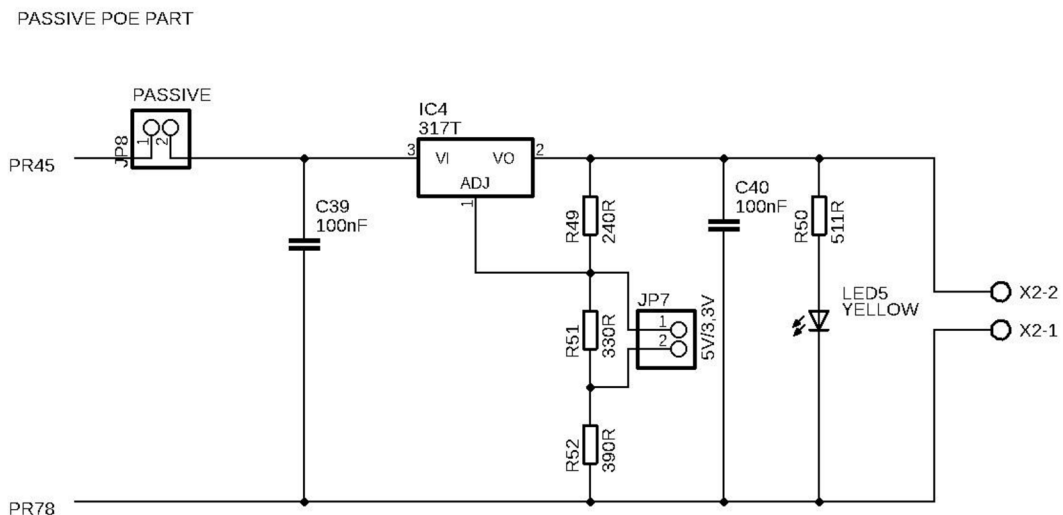
Obr. 5-2 Zapojení vstupního a výstupního RJ45 konektoru a lan transformátoru



Obr. 5-3 Zapojení filtračních prvků

5.3 Pasivní POE

Při použití pouze pasivního POE byl navržen podružný obvod s lineárním regulátorem napětí LM317. Obvod je připojen přes jumper k párovým vývodům 4-5 pro kladnou větev a 7-8 pro zápornou z LAN transformátoru, které se využívají pro napájení po nevyužitých vodičích. Díky zapojení s LAN transformátorem je možné pasivní POE využít i při rychlostech nad 100Mb/s. Volba napětí mezi 5 V a 3,3 V je realizována pomocí jumperu, kterým je přemostěn odpor nastavující napětí lineárního regulátoru. Výstup obvodu pasivního POE má samostatnou svorku, protože z této části není možné odebírat takový výkon jako z části s DC/DC měničem. Pokud by došlo k nesprávnému použití a zatížení této větve by bylo větší, než je dovoleno, mohlo by dojít ke zničení zařízení. Připojení obvodu k páru volíme jumperem JP8 a napětí volíme pomocí jumperu JP7. V zapojeném stavu JP7 je na výstupu 3,3 V. Zapojení lze vidět na obrázku 4-3. Regulátor byl zvolen v provedení 3DPAK, kdy je připájená ploška využita také pro chlazení součástky. Při maximálním výkonu a nejvyšším možném napájecím napětí na něm může být ztráta až 7,5 W. Napětí na výstupu je indikováno pomocí LED. Schéma zapojení je znázorněno na Obr. 5-4.



Obr. 5-4 Zapojení lineárního regulátoru

5.4 Aktivní POE

Zapojení části s aktivním POE se skládá ze 3 částí POE PD interface, DC/DC měniče včetně řídicího obvodu a výstupního galvanicky odděleného obvodu.

5.4.1 POE PD interface

Hlavním prvkem v části s aktivním POE je POE PD interface, v tomto případě je to TPS2373-4RGWR, který podporuje IEEE802.3bt typ 4. Jelikož se návrh nezabývá konkrétní výkonovou třídou, ale zahrnuje všeobecnou problematiku jsou na piny pro volbu výkonové třídy vyvedeny odpory, kterými je možno pomocí jumperu zvolit požadovanou výkonovou třídu. A to od nejmenšího (class 0) až po nejvyšší výkon (class

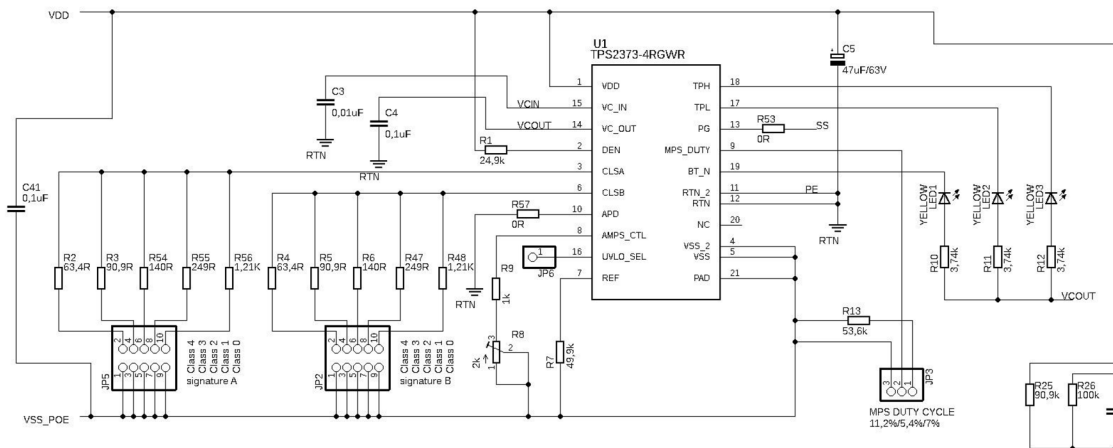
8). Volbu výkonové třídy provádíme pomocí jumperu JP5 pro volbu A a JP2 pro volbu B. Konfiguraci pinů volíme dle tabulky z technické dokumentace viz Obr. 5-5.

Table 1. Class Resistor Selection

| PD Class | CLASS SIGNATURE A | CLASS SIGNATURE B | MINIMUM POWER AT PD (W) | MAXIMUM POWER AT PD (W) | NUMBER OF CLASS CYCLES @ MAX POWER | RESISTOR CLSA (Ω) | RESISTOR CLSB (Ω) |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0.44 | 12.95 | 1 | 1210 | 1210 |
| 1 | 1 | 1 | 0.44 | 3.84 | 1 | 249 | 249 |
| 2 | 2 | 2 | 3.84 | 6.49 | 1 | 140 | 140 |
| 3 | 3 | 3 | 6.49 | 12.95 | 1 | 90.9 | 90.9 |
| 4 | 4 | 4 | 12.95 | 25.5 | 2,3 | 63.4 | 63.4 |
| 5 | 4 | 0 | 25.5 | 40 | 4 | 63.4 | 1210 |
| 6 | 4 | 1 | 40 | 51 | 4 | 63.4 | 249 |
| 7 | 4 | 2 | 51 | 62 | 5 | 63.4 | 140 |
| 8 | 4 | 3 | 62 | 71 | 5 | 63.4 | 90.9 |

Obr. 5-5 Výkonové třídy POE PD dle volby rezistorů [5]

Pro nastavení šířky MPS pulzů slouží JP3, pro nastavení úrovně proudu MPS slouží trimr R8. Hodnota R8 a R9 by měla být typicky 1.2k ohm, ovšem může být potřeba použít jinou hodnotu dle použitého PSE. Pro indikaci stavu PSE slouží LED 1, 2 a 3, které jsou připojeny na výstupy TPH, TPL a BT_N. LED indikují, jaký typ PSE je použit viz Tabulka 5. RTN piny slouží jako výstup napětí vstupujícího do interface na stranu DC/DC měniče interně jsou pomocí mosfetu propojeny po dohodnutí výkonové třídy. Pro propojení POE PD interface a DC/DC kontroléru slouží pin PG (power good), tímto pinem ovládá PD běh PWM kontroléru. Tímto je zajištěno, že pokud není domluvena třída napájení s POE PSE není DC/DC měnič spuštěn. Tato funkce se nazývá soft start. Schéma zapojení je znázorněno na Obr. 5-6.

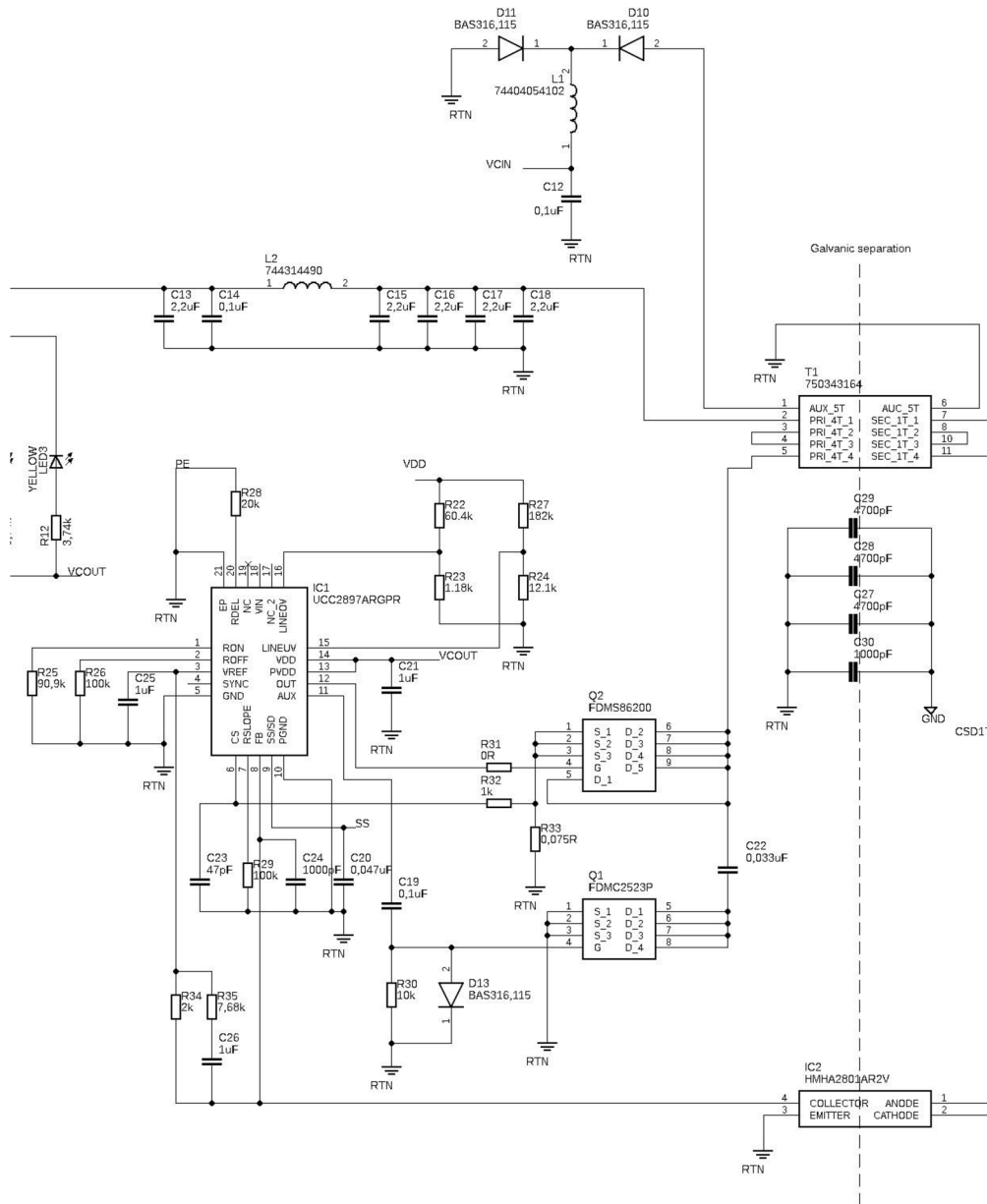


Obr. 5-6 Zapojení POE PD interface

5.4.2 DC/DC měnič

V Zapojení je využit jednočinný propustný měnič s impulsním transformátorem. Pro řízení tohoto DC/DC měniče byl dle katalogového listu vývojové desky a doporučení výrobce zvolen PWM kontrolér UCC2897A. Tento kontrolér podporuje funkci soft startu, a tudíž je možné propojení s výstupem PG (power good) z POE PD interface, tudíž je zajištěn bezproblémový start až po domluvě zařízení na výkonové třídě. Napětí

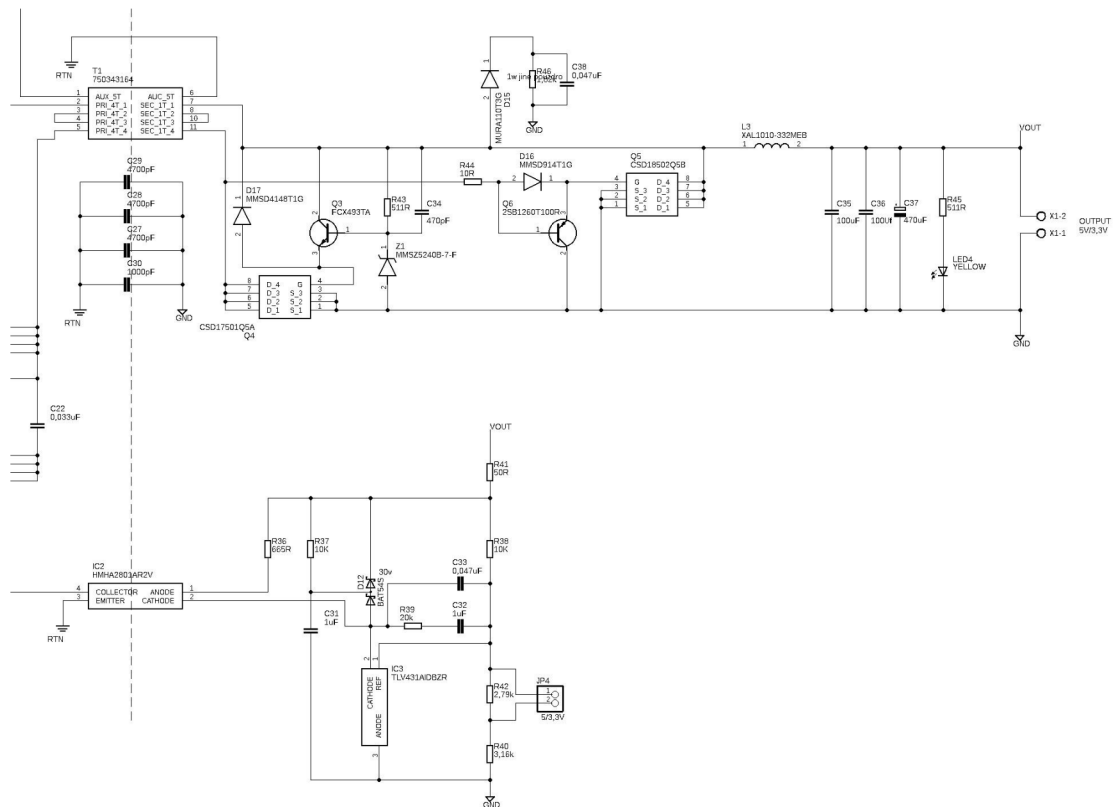
VDD je přes filtrační prvky LC přivedeno na hlavní výkonový transformátor, spínání se provádí vůči zemi, která je společná s POE PD interface. Spínání zajišťuje výkonový mosfet FDMS86200 N-kanál, pro demagnetizaci vinutí transformátoru slouží pomocný mosfet FDMC2523P P-kanál. Na piny LINEOV (line over voltage) a LINEUV (line under voltage), jsou připojeny odporové děliče s nastavením pro hlídání přepětí a podpětí na vstupu VDD, se kterým se pracuje. V případě přepětí nebo podpětí je běh měniče pozastaven do doby, než se hodnoty vrátí do požadovaného stavu. Na pin FB (feedback) je přivedena zpětná vazba z optočlenu. Pomocí této zpětné vazby se dorovnávají odchylky v požadovaném napětí. Zapojení DC/DC měniče je možné vidět na Obr. 5-7.



Obr. 5-7 Zapojení DC/DC měniče

5.4.3 Výstupní část

Výstupní část se skládá ze synchronně řízeného usměrňovače, ve kterém jsou použity výkonové mosfety CSD18502B, určené pro tuto aplikaci. Po usměrnění a vyfiltrování je výstup VOUT přiveden do obvodu zpětné vazby, kde je nastaveno referenční napětí pomocí napěťového regulátoru TLV431. Snímání napětí je tedy prováděno přímo na výstupních svorkách. Napětí lze nastavit pomocí změny hodnoty odporu v zapojení. Hodnoty odporu byly stanoveny podle výpočtu dle katalogového listu TLV431 [37]. Změna odporu je provedena připojením nebo odpojením požadovaného odporu pomocí jumperu JP4. Při spojení je nastaveno 5 V a při rozpojení je nastaveno 3,3 V. Podle hodnoty napětí je přes optočlen přenesena zpětná vazba do PWM kontroléru. Napětí na výstupu je indikováno pomocí LED. Výstupní část je od řídicí části galvanicky oddělena a pro eliminaci rozdílných potenciálů je umístěno mezi výstupní a řídicí země čtveřice paralelně zapojených kondenzátorů pro napětí 2 kV. Čtveřice je použita kvůli zvýšení napětí a zvětšení plochy, na které jsou umístěny. Hlavní roli v tomto případě hrála cena vysokonapěťového kondenzátoru. Zapojení výstupní části je možné vidět na Obr. 5-8 Obr. 5-7.



Obr. 5-8 Zapojení výstupní části

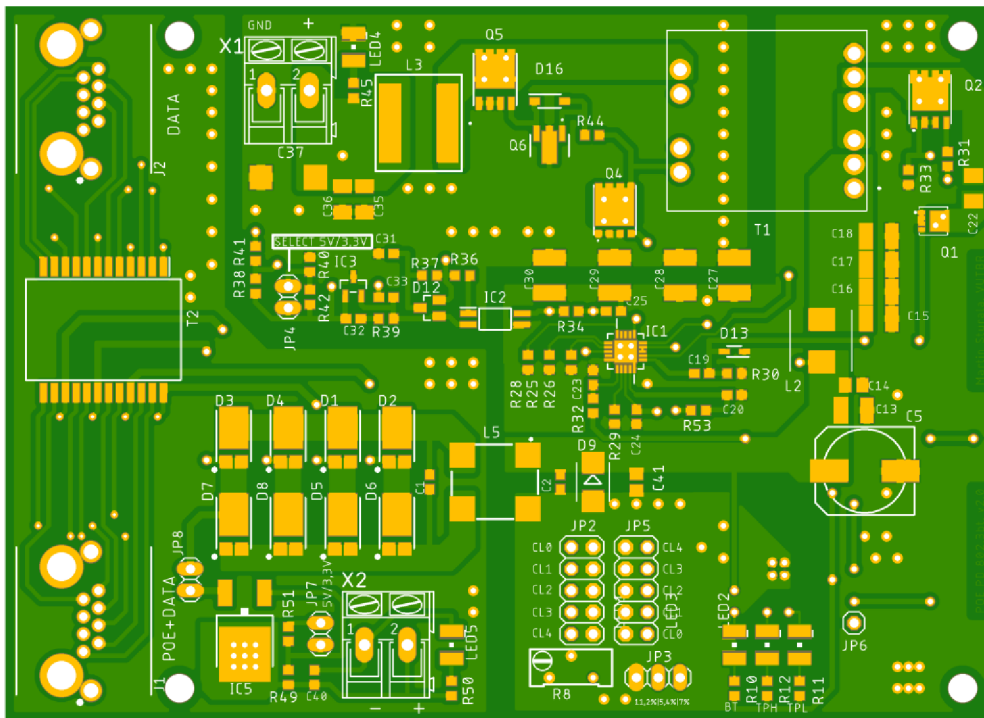
5.4.4 Výběr součástek

Součástky a jejich hodnoty byly zvoleny dle schématu zapojení vývojového kitu pro POE PD interface. Cívky a trafo využitě v zapojení jsou kompatibilní se standardem 802.3bt a PD interface TPS2373. Velikost SMD součástek byla zvolena ve velikosti 0603, pokud to bylo možné. Součástky jejichž parametry nedovolují použití této

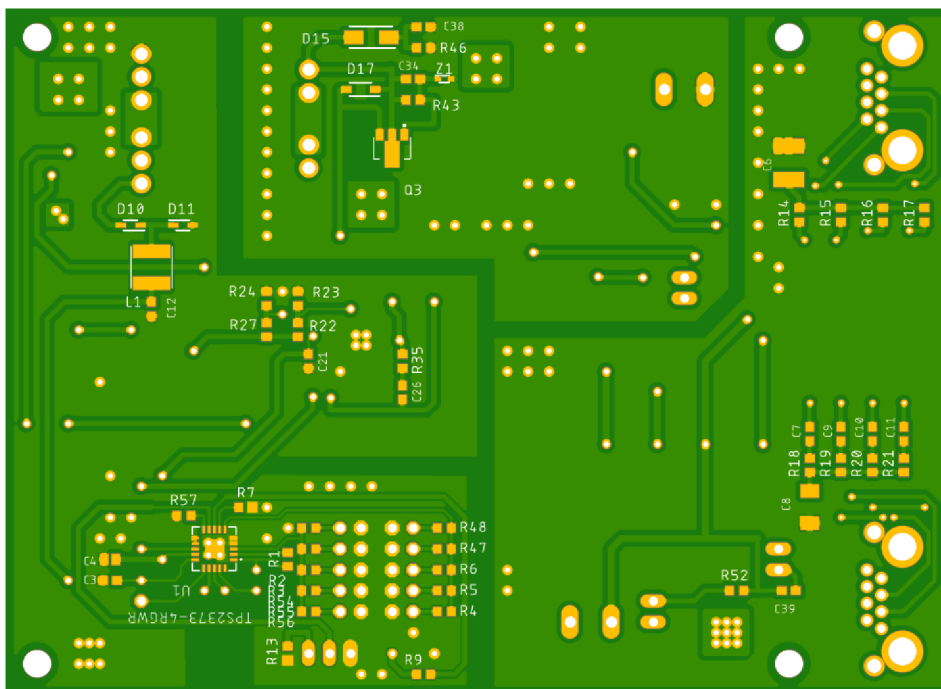
velikosti jsou v pouzdrech větších. Veškeré součástky, které byly použité pro výrobu jsou dostupné z obchodů mouser a farnell. Seznam součástek je k dispozici v Příloha 10 -Příloha 11 -Příloha 12 -.

5.5 Návrh desky plošných spojů

První verze desky plošných spojů byla navržena příliš velká. Rozměry desky byly z původních 130x130mm upraveny na velikost 115,57 x 83,82 mm, ovšem deska byla navržena jako univerzální, a proto jsou zde součástky navíc např. jumpery pro volbu napětí nebo pro volbu výkonové třídy. Na desce byly také upraveny silové cesty a celková organizace součástek. Více času bylo věnováno části s DC-DC měničem, která se opírá o doporučené zapojení a je nejvíce komplexní. Pouzdra součástek s velikostí 1206 byla nahrazena na velikost 0603 pokud to bylo možné. V návrhu jsou použity téměř všechny součástky s SMD pouzdry. Součástky, které jsou nejvíce komplikované na osazování, jsou integrované obvody s pouzdry VQFN (5,1x5,1 mm) s 20 vývody. Tyto součástky je nutné pájet pomocí horkého vzduchu, nebo jinou bezkontaktní technologií. Šířka cest pro připojení pouzder VQFN je 0,2mm, ostatní jsou posíleny. Výkonové cesty od filtračních prvků až po koncový konektor jsou zesíleny pomocí POLYGON příkazu pro vytvoření měděné cesty. V návrhu jsou tímto způsobem také oboustranně vytvořeny plochy GND. Z pohledu zemí je návrh rozdělen na 4 oddělené části, vstupní, řídicí pro POE PD, interface řídicí pro PWM kontrolér a výstupní galvanicky oddělenou. Na všech je použito rozletí pomocí příkazu polygon. Při využití příkazu POLYGON byly zohledněny izolační vzdálenosti a také proudy, které těmito cestami budou téct. Pro lepší odvod tepla a také zjednodušení pájení je po každém výkonovém prvku proveden prokov na druhou stranu DPS. Na druhé straně je opět s pomocí POLYGON příkazu vytvořena ploška sloužící pro chlazení a lepší osazení součástky. Na desce jsou připraveny otvory pro uchycení distančních sloupků pomocí šroubků M3. Model desek plošných spojů je vyobrazen na Obr. 5-9 a Obr. 5-10.



Obr. 5-9 Pohled na horní stranu modelu desky plošných spojů



Obr. 5-10 Pohled na spodní stranu modelu desky plošných spojů

5.6 Výroba a testování

Jelikož se použité kontroléry vyrábí pouze v SMD pouzdrech VQFN a cena součástek pro výrobu zařízení není zanedbatelná, nebylo zapojení fyzicky otestováno na testovací desce. Deska byla navržena ve dvou verzích. Při návrhu druhé verze byly objeveny nedostatky, které by mohly způsobit chybu a byly opraveny. Ovšem především byl návrh druhé verze realizován kvůli zmenšení DPS.

5.6.1 Výroba a osazování DPS

Výroba DPS byla zadána firmě Gatema. DPS je vyrobena v oboustranném provedení s prokovey, jako základní materiál je použito DPS s označením FR4 (1,5 mm) s vrstvou mědi 18 μ m. Na povrchu DPS je aplikována zelená ochranná maska s bílými potisky součástek. DPS byla výrobcem elektricky testována.

Osazování součástek probíhalo postupně od nejmenších SMD součástek jako rezistory, kondenzátory v provedení 0603 přes větší SMD součástky bez spodních pájecích plošek. Tyto součástky byly osazovány pomocí mikropájky a trubičkového cínu s tavidlem. Součástky s pouzdry VQFN, PowerDI5, SON 5x6mm, QFN-8, PQFN08A byly osazovány pomocí horkovzdušné pájecí stanice a pájecí pasty s tavidlem. DPS bylo od zbytků tavidla a pájecí pasty očištěno pomocí izopropylalkoholu. Nakonec byly osazeny vývodové součástky jako jsou konektory a pinové lišty. Při osazování bylo nalezeno několik chyb, které již byly opraveny. Nejzásadnější byla záměna pouzder 1 W SMD odporů a elektrolytického kondenzátoru, které musely být při osazování improvizovaně umístěny. Osazená deska je na Obr. 5-11.



Obr. 5-11 Pohled na horní stranu osazené desky

5.6.2 Zprovoznění DPS

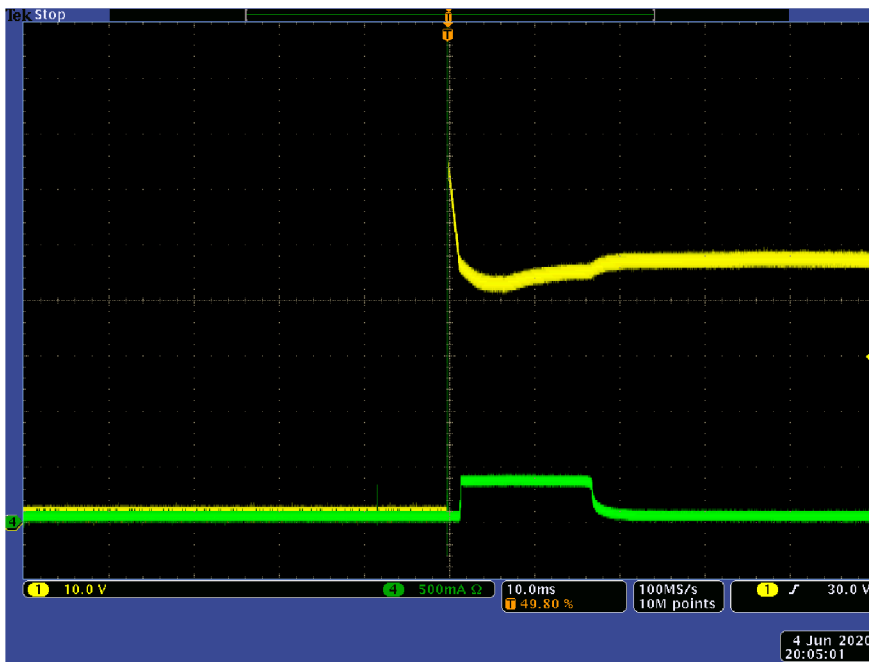
Za pomoci multimetru byly proměřeny místa, kde by mohlo dojít ke zkratu nebo k záměně polarit součástek. Po kontrole byla deska postupně oživována. Za účelem oživování nebyla osazena cívka L5, která propojuje usměrňovač a část s aktivním POE. Nejdříve byla otestována část LAN transformátoru, a to otestováním funkčnosti ethernetového spojení. Mezi zařízení podporující 1Gb/s připojení bylo připojeno zařízení POE PD a úspěšně bylo navázáno funkční spojení 1Gb/s. Dále byla oživována část s pasivním POE. Pomocí laboratorního zdroje s nastaveným proudovým omezením bylo připojeno pomocí pasivního injektoru napájení na páry 4-5 a 7-8. V pasivní části nebyly při oživování nalezeny žádné nedostatky. Následně byla osazena cívka L5 a oživena část s POE PD interface a DC-DC měničem. Tato část byla oživena najednou jelikož prvky jsou spolu propojeny. Oživování proběhlo pomocí POE PSE Tenda s výkonem 15 W. Po připojení napáječe se ukázalo, že byla obrácena polarita u výstupního Tantalového kondenzátoru, ale po výměně se i část s aktivním POE projevila jako funkční.

5.6.3 Testování výrobku POE PD

Pro testování byly vybrány dva POE PSE. Jako první byl vybrán napáječ Tenda model PoE15F-48V-I podporující standard IEEE802.3af a výkon do 15W. Jako druhý byl zvolen napáječ MaxLink model MAXPI60v2 podporující standardy IEEE 802.3af/at/bt a výkon do 60 W. Oba napáječe byly odzkoušeny s IP kamerou podporující standard IEEE802.3af a byly plně funkční. Napáječ Tenda byl zvolen spíše jako informativní pro ověření, zdali je zařízení zpětně kompatibilní i se standardem IEEE 802.3af. Po připojení se podle očekávání ukázal napáječ Tenda jako napáječ typu 1. Napáječ MaxLink byl podle POE PD a indikačních výstupů určen jako napáječ typu 2 a ne jako napáječ typu 3, který byl očekáván. Je možné, že napáječ je typu 2, ale výrobce jej uvádí jako kompatibilní se standardem IEEE 802.3bt kvůli dodávanému výkonu.

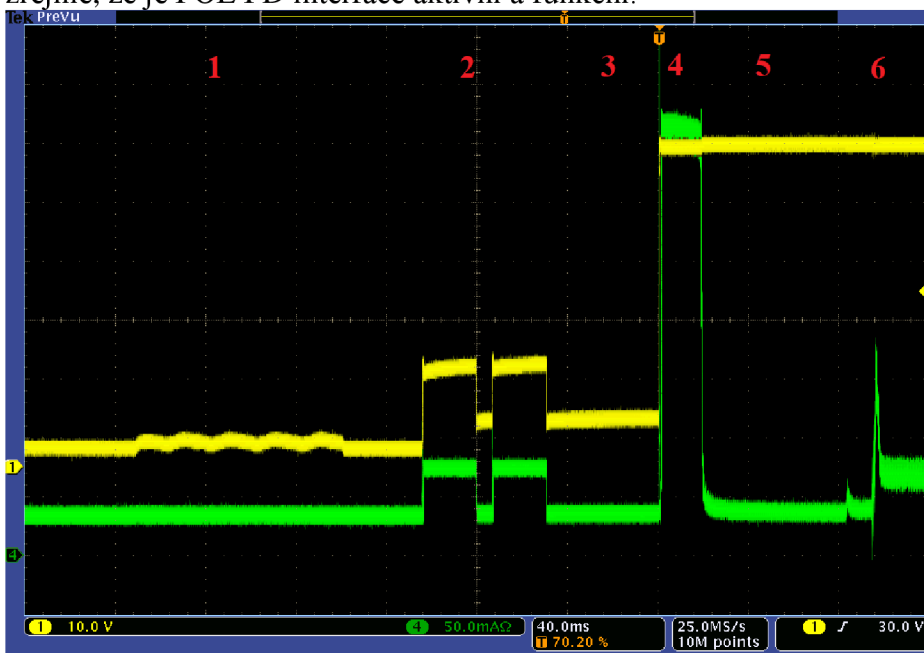
5.6.3.1 Spouštění a počáteční komunikace

Po připojení zařízení k napáječi Tenda bylo zařízení POE PD detekováno a POE PSE Tenda spustil napájení, ovšem odchycená komunikace ukazuje na to, že napáječ spoléhá pouze na detekční odpor 24,9k ohm a neřeší klasifikaci viz Obr. 5-12, na kterém vidíme, že napáječem byla provedena pouze detekce a poté zahájeno napájení. Na Obr. 5-12 je zachycen průběh napětí (žlutý průběh) a proudu (zelený průběh) na vstupu do POE PD.



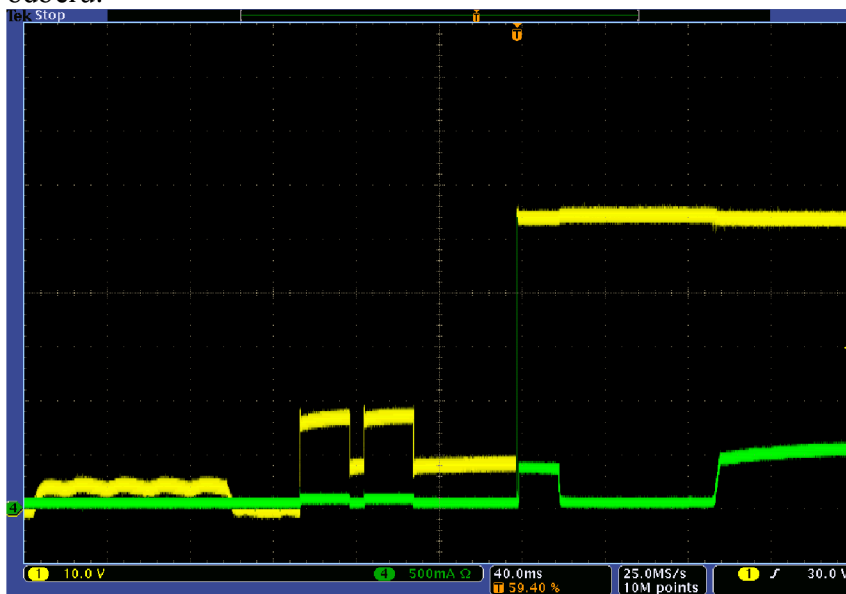
Obr. 5-12 Komunikační sekvence s POE PSE Tenda, napětí na vstupu (žlutý průběh), vstupní proud (zelený průběh)

Další testy proběhly již s POE PSE MaxLink 60 W. Tento napáječ již nespolehá pouze na detekční odpor. Po připojení zařízení byla odchycena komunikace viz Obr. 5-13, kde lze pozorovat detekční napětí (úsek 1), klasifikační napětí a proudy (úsek 2), časový úsek pro označení chybné detekce, který je v tomto případě nevyužit (úsek 3), zapínací proud o velikosti 350 mA, který je charakteristický pro TPS2373-4 (usek 4), časová prodleva před spuštěním napájení a DC/DC měniče (usek 5) a nakonec spuštění napájení a DC/DC měniče (úsek 6). Díky zachycení komunikace a ověření hodnot je zřejmé, že je POE PD interface aktivní a funkční.



Obr. 5-13 Komunikační sekvence s POE PSE MaxLink, napětí na vstupu (žlutý průběh), vstupní proud (zelený průběh)

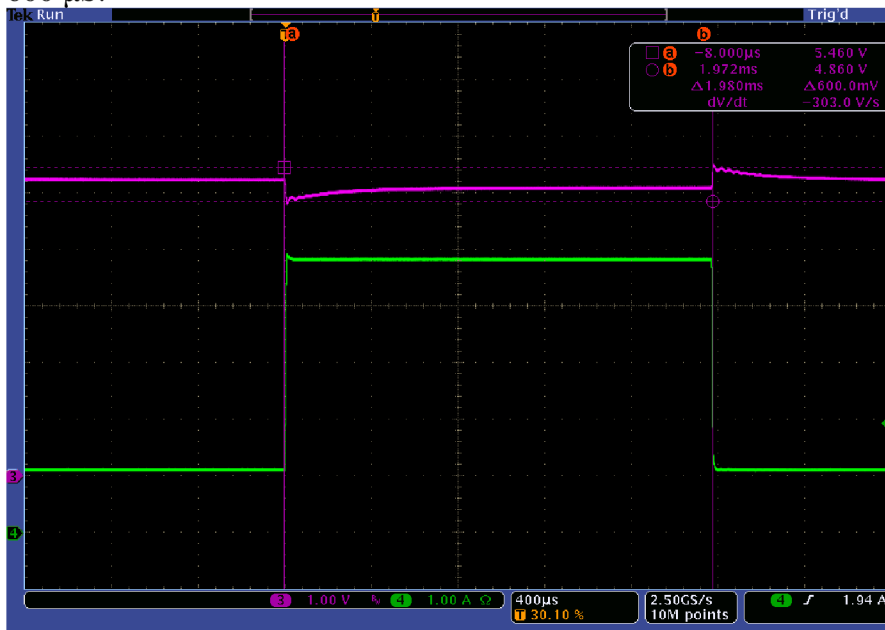
Na Obr. 5-14 je zachycena počáteční komunikace včetně připojení zátěže o výkonu 28 W. Na obrázku je také vidět pokles napětí na napájecí při zvýšení proudového odběru.



Obr. 5-14 Komunikační sekvence s POE PSE MaxLink včetně spuštění 28W zátěže, napětí na vstupu (žlutý průběh), vstupní proud (zelený průběh)

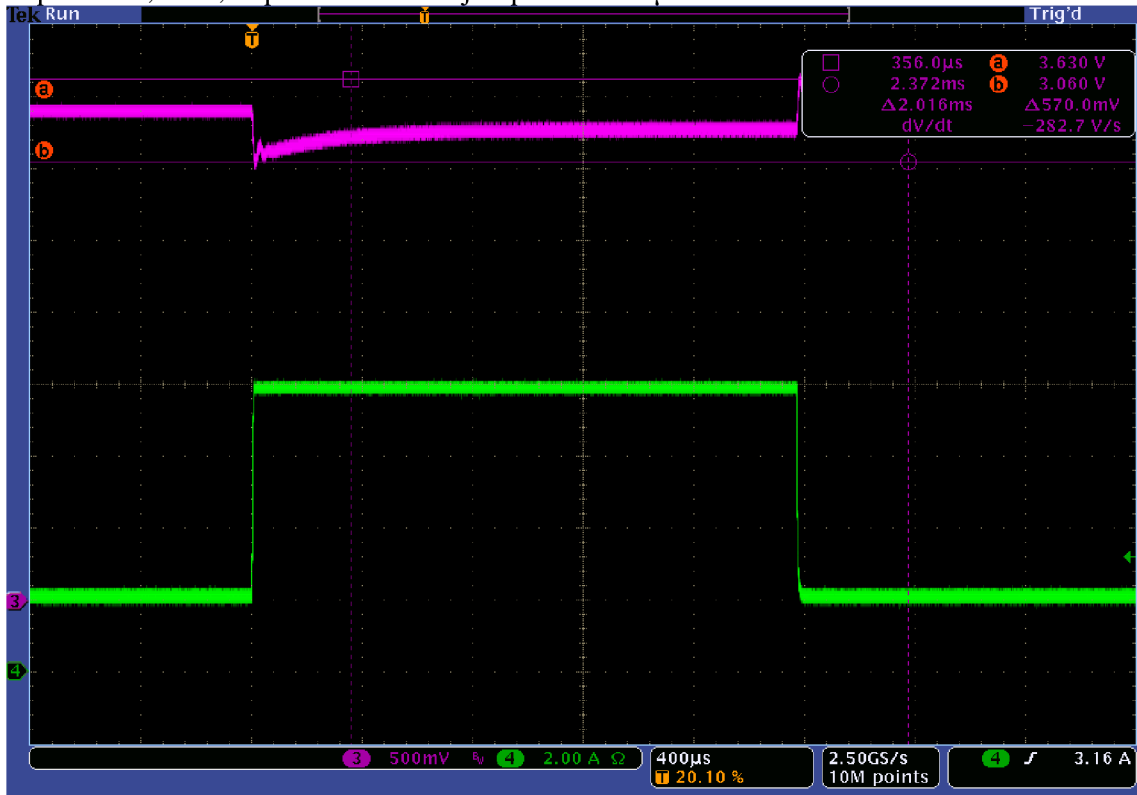
5.6.3.2 Transientní odezva DC/DC měniče

Po ověření funkčnosti POE PD interface byla otestována funkčnost DC/DC měniče. Měnič byl zatěžován umělou regulovatelnou zátěží. Byla změřena přechodná odezva a zatěžovací charakteristika na výstupu měniče. Na Obr. 5-15 je zachycena přechodná odezva od 1 A do 4 A pro 5 V při napájení 55 V na vstupu měniče. Výstup při zatížení podkmitne z původních 5,24 V na 4,86 V. Regulační smyčka stabilizuje napětí přibližně do 600 μ S. Při odepnutí zátěže překmitne napětí na 5,46 V, napětí se stabilizuje opět do 600 μ S.



Obr. 5-15 Transientní odezva od 1 A do 4 A pro 5 V při napájení 55 V

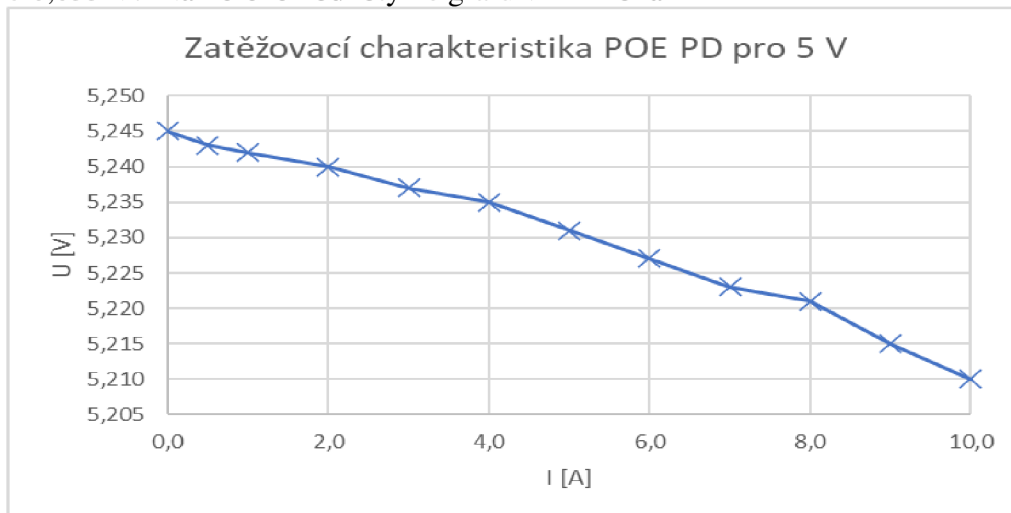
Na Obr. 5-16 je zachycena přechodná odezva od 2 A do 8 A pro 3,3 V při napájení 55 V na vstupu měniče. Výstup při zatížení podkmitne z původních 3,37 V na 3,06 V. Regulační smyčka stabilizuje napětí přibližně do 600 μ S, Při odepnutí zátěže překmitne napětí na 3,63 V, napětí se stabilizuje opět do 600 μ S.



Obr. 5-16 Transientní odezva od 2A do 8 A pro 3,3 V při napájení 55 V

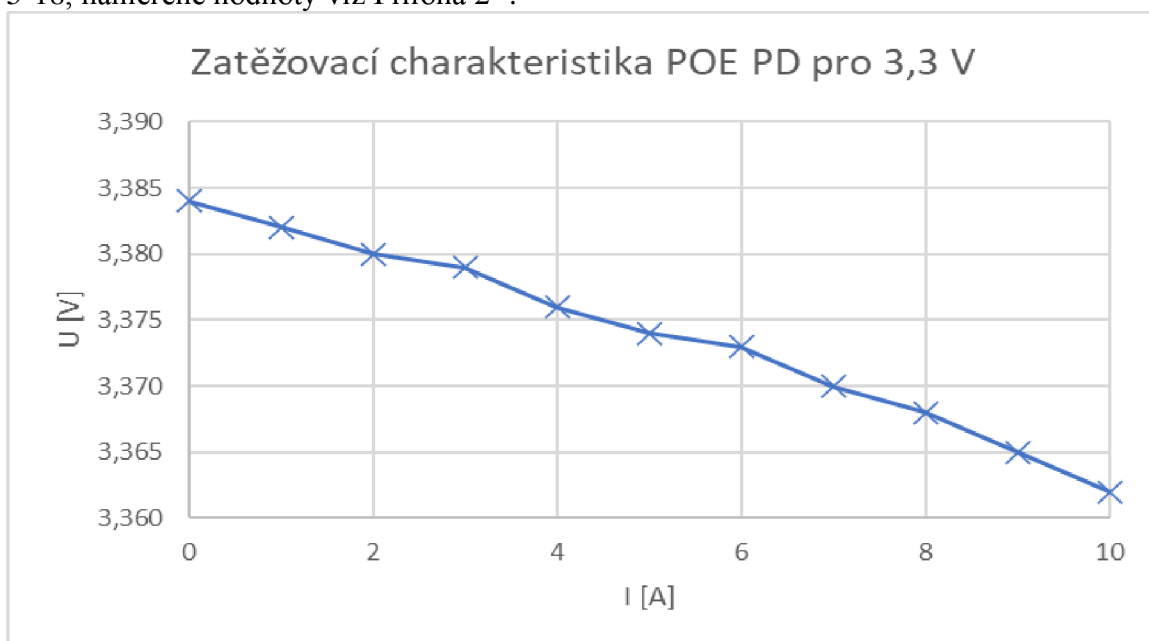
5.6.3.3 Zatěžovací charakteristika POE PD

Na Obr. 5-17 je znázorněna zatěžovací charakteristika pro 5 V, jako napájení sloužil POE PSE podporující 60 W, proto byly hodnoty měřeny do 10 A. Z měření je zřejmé, že se POE PD chová jako velmi tvrdý zdroj, což dokazuje pokles napětí při 10 A pouze o 0,035 V. Naměřené hodnoty ke grafu viz Příloha 2 -



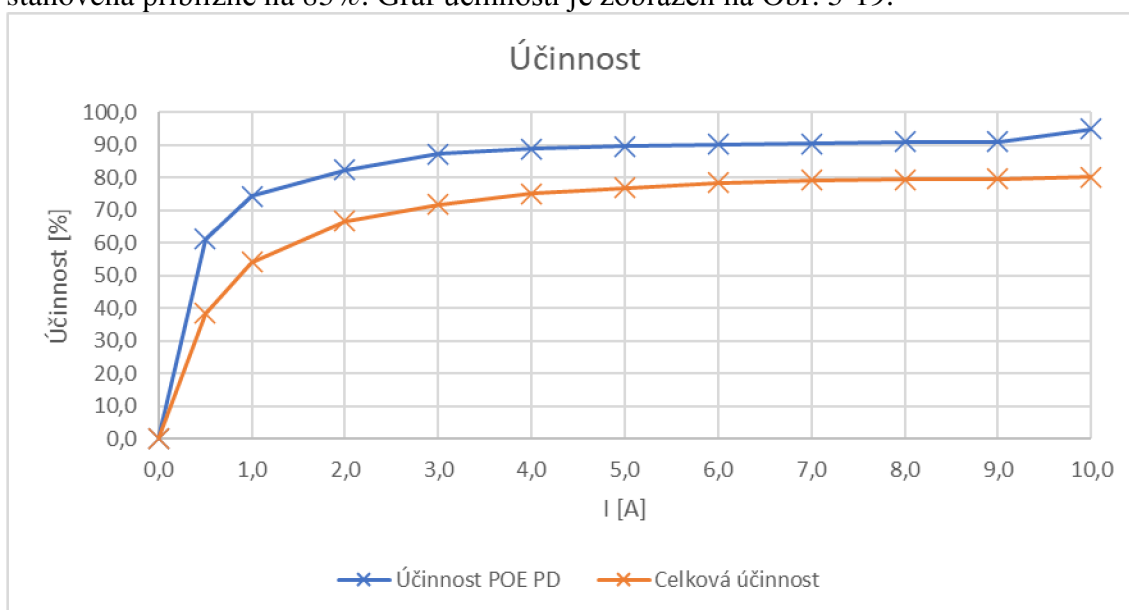
Obr. 5-17 Zatěžovací charakteristika POE PD při 5 V

Pro nastavení 3,3 V dopadly výsledky podobně. Pokles napětí je 0,22V Graf viz Obr. 5-18, naměřené hodnoty viz Příloha 2 -.



Obr. 5-18 Zatěžovací charakteristika POE PD při 3,3 V

Při měření zatěžovacích charakteristik byl také měřen vstupní proud a napětí na konektoru POE PD, změřen byl také celkový proud odebíraný celým systémem včetně POE PSE. Viz Příloha 1 -. Z těchto hodnot byla spočítaná účinnost POE PD a účinnost celého systému. Na Obr. 5-19 můžeme vidět, že účinnost navrženého zařízení dosahuje 90% a účinnost celého systému včetně POE PSE dosahuje přibližně 80% tato odchylka může být způsobena započtením ztrát na napáječi MaxLink a na vedení. Účinnost samostatného POE PSE nebyla výrobcem uvedena ovšem podle naměřených dat byla stanovena přibližně na 85%. Graf účinnosti je zobrazen na Obr. 5-19.



Obr. 5-19 Graf účinností POE zařízení

6. STRUČNÝ NÁVOD K OBSLUZE POE PD

Zařízení je kompatibilní s aktivními POE PSE napáječi, a s pasivními injektory, které využívají páry 4-5(+) a 7-8(-). Veškeré volby a změny, které jsou prováděny pomocí jumperů musí být prováděny ve vypnutém stavu.

6.1 Pasivní POE

Při použití pasivního POE musí být jumper JP8 propojen. Napětí 5 V zvolíme rozpojením jumperu JP7, Napětí 3,3 V zvolíme spojením jumperu JP7. Po připojení LAN kabelu je výstupní napětí indikováno pomocí LED5.

6.2 Aktivní POE

Při použití aktivního POE musí být JP8 rozpojen. Napětí 5 V zvolíme spojením jumperu JP4 Napětí 3,3 V zvolíme rozpojením jumperu JP4. Střídu pro MPS pulzy volíme jumperem JP3 viz Tabulka 3. Proud pro MPS lze nastavit pomocí R8.

Tabulka 3 Volba střídy MPS pomocí jumperu JP3

| Střída MPS | Pozice JP3 |
|------------|----------------|
| 5,4 % | Odpojeno |
| 7 % | Pozice napravo |
| 11.2 % | Pozice nalevo |

Výkonovou třídu lze zvolit kombinací jumperu JP5 a JP2 viz Tabulka 4.

Tabulka 4 Volba výkonové třídy pomocí jumperu JP5 a JP2

| Výkonová třída | Pozice JP5 | Pozice JP2 |
|----------------|------------|------------|
| 0 | CL0 | CL0 |
| 1 | CL1 | CL1 |
| 2 | CL2 | CL2 |
| 3 | CL3 | CL3 |
| 4 | CL4 | CL4 |
| 5 | CL4 | CL0 |
| 6 | CL4 | CL1 |
| 7 | CL4 | CL2 |
| 8 | CL4 | CL3 |

Po připojení Lan kabelu s napájením je výstupní napětí indikováno pomocí LED4. Typ POE PSE lze určit pomocí LED označených TPL, TPH a BT. Viz Tabulka 5.

Tabulka 5 vysvětlivka k indikačním LED

| POE PSE | Svítlí LED |
|---------|------------------------------|
| Typ1 | Žádná |
| Typ2 | TPL |
| Typ3 | BT, P>25,5 W TPL, P>40 W TPH |
| Typ4 | TPL, TPH a BT |

7. ZÁVĚR

Zařízení POE PD bylo navrženo, aby fungovalo s nejnovějším standardem IEEE 802.3bt definovaným pro POE s výkonem až 70 W na straně POE PD, ale také s pasivním POE, které využívá nižší napětí a nedosahuje takové účinnosti. Při návrhu byla využita doporučená zapojení, které lze najít v katalogových listech použitého kontroléru pro POE. Zařízení je navrženo v technologii SMD, jelikož použité kontroléry se v jiné technologii nevyrábí. Výsledný návrh byl realizován v softwaru EAGLE 9.5.1 pro tvorbu schémat a návrh DPS. Schémata a DPS návrhu celého zařízení jsou přiloženy. Zařízení bylo vyrobeno a úspěšně otestováno s napáječem o výkonu 60 W. Při testech bylo zjištěno, že se zařízení chová jako tvrdý zdroj, ovšem transientní odezva DC/DC měniče není zcela ideální, ale splňuje očekávání. Při tvorbě zařízení POE PD se spoléhá na to, že výstup nebude skokově zatěžován, jelikož se provádí volba výkonové třídy a poté musí zařízení splňovat mezní hranice odebíraného výkonu. Při testech bylo také ověřeno, že zařízení je schopno provést komunikaci s napáječem a domluvit se na volbě výkonové třídy. Měřením bylo ověřeno že při vyšších výkonech zařízení dosahuje účinnosti kolem 90 %.

Literatura

- [1] Názorné zapojení pasivního POE [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.elektrokolos.wz.cz/konstrukce/poe/poe.php>
- [2] Článek o pasivním POE [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/poeticky-dum-napajime-po-ethernetovem-kabelu/>
- [3] Prezentace o standardech 802.3af, at, bt [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://training.ti.com/high-power-poe-design-considerations>
- [4] Prezentace o standardu 802.3bt [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://training.ti.com/node/1128369>
- [5] Katalogový list k čipu tps2373 [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2373.pdf>
- [6] Katalogový list k regulátoru LM317 [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slvs044x/slvs044x.pdf>
- [7] Katalogový list k PWM kontroléru UCC2897 [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ucc2897a.pdf>
- [8] Katalogový list k vývojovému kitu s tps2373 [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/sluubj1a/sluubj1a.pdf>
- [9] Návrh DC/DC měniče [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyvoj/id:9180/navrh-vysokofrekvencnich-dc-dc-menicu-s-vysokym-vstupnim-napetim>
- [10] IEEE standard 802.3bt-2018 [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8632920>
- [11] Knihovny pro EAGLE software [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://ms.componentsearchengine.com/>
- [12] Katalog a výběr součástek Mouser [online]. [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/>
- [13] Katalog a výběr součástek Farnell [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/>
- [14] Obrázek pasivního injektoru mikrotik [online]. In: . [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.wifi-shop.cz/mikrotik-pasivni-gigabit-poe-injektor-s-led-indikaci_i3040.jpg
- [15] Obrázek pasivního 1Gb/s panel injektoru [online]. In: . [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.abctech.cz/mhpower-poe-pan6-gb-gigabitovy-stineny-6-portovy-pasivni-poe-panel_i22274.jpg
- [16] Informace k POE PSE MaxLink [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.czc.cz/maxlink-poe-injektor-pi60v2-802-3af-at-bt-55v-1-1a-60w-1gbit-napajeci-kabel/287834/produkt>
- [17] Obrázek aktivního POE PSE MaxLink [online]. In: . [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://iczc.cz/cfk40qcnevi4e9ns3dle0jt7v9-3_1/obrazek
- [18] Obrázek pasivního POE injektoru [online]. In: . [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://cdn.alza.cz/ImgW.ashx?fd=f3&cd=NW422c75>

- [19] Článek o výhodách a využití POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.domorazek.cz/napajeni-po-ethernetu-poe/>
- [20] POE switch netis [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/cs/149589-switch-netis-pe6108g>
- [21] Obrázek POE switche netis [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.img4.cz/www/img/imgsticode?code=NAPNTS1006>
- [22] POE PSE tenda [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.czc.cz/tenda-poe15f-48v-i-poe-injektor-10-100-802-3af-15-4w/274390/produkt>
- [23] Obrázek POE PSE Tenda [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://iczc.cz/1chn3bu782j4kbd82o0cedoadc-1_1/obrazek
- [24] Teorie k IEEE802.3af/at [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.dipolnet.cz/poe_-_iee_802_3af_and_iee_802_3at_bib746.htm
- [25] Obrázek znázorňující napájení pomocí nevyužitých párů a fantomového napětí [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://static.dipol.com.pl/images/en/images/info/d005.gif>
- [26] Obrázek znázorňující napájení pomocí fantomového napětí [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://static.dipol.com.pl/images/en/images/info/d006.gif>
- [27] Obrázek znázorňující zapojení pasivního POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://static.dipol.com.pl/images/en/images/info/d011.gif>
- [28] Úvod do aktivního POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/introduction_to_poe_802.3af_802.3at.pdf
- [29] Dokumentace Texas Instruments k POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva986/slva986.pdf>
- [30] Dokumentace Microsemi k POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/136209-next-generation-poe-ieee-802-3bt-white-paper
- [31] Článek o POE s velkým výkonem [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/poe-s-velkym-vykonem-reseni-pomoci-ieee-8023bt.html>
- [32] Článek o POE s velkým výkonem EN [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/design-in-high-power-poe-ieee-8023bt-solutions>
- [33] Základní informace o POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_over_Ethernet
- [34] Informace o POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Power_over_Ethernet
- [35] Prezentace o MPS a využití v POE [online]. [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: http://www.ieee802.org/3/bt/public/mar14/yseboodt_01_0314.pdf
- [36] PATOČKA, Miroslav. Teorie jednočinného propustného měniče. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřící technice a silnoproudé elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2011, s. 415-438. ISBN 978-80-214-40003-6.
- [37] Technická dokumentace k TLV431 [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv431a.pdf>

Seznam příloh

| | |
|--|----|
| Příloha 1 - Tabulka naměřených hodnot pro zatěžovací charakteristiky | 42 |
| Příloha 2 - Schéma vstupního obvodu část 1 | 43 |
| Příloha 3 - Schéma vstupního obvodu část 2 | 44 |
| Příloha 4 - Schéma části s pasivním POE..... | 45 |
| Příloha 5 - Schéma části s aktivním POE | 46 |
| Příloha 6 - Schéma výstupní části | 47 |
| Příloha 7 - Osazovací plánec horní strany pro navrženou DPS..... | 48 |
| Příloha 8 - Osazovací plánec spodní strany pro navrženou DPS | 48 |
| Příloha 9 - Seznam součástek část 1 | 49 |
| Příloha 10 - Seznam součástek část 2 | 50 |
| Příloha 11 - Seznam součástek část 3 | 51 |
| Příloha 12 - Schémata a podklady pro výrobu DPS v elektronické podobě..... | 51 |

Příloha 1 - Tabulka naměřených hodnot pro zatěžovací charakteristiky a účinnosti

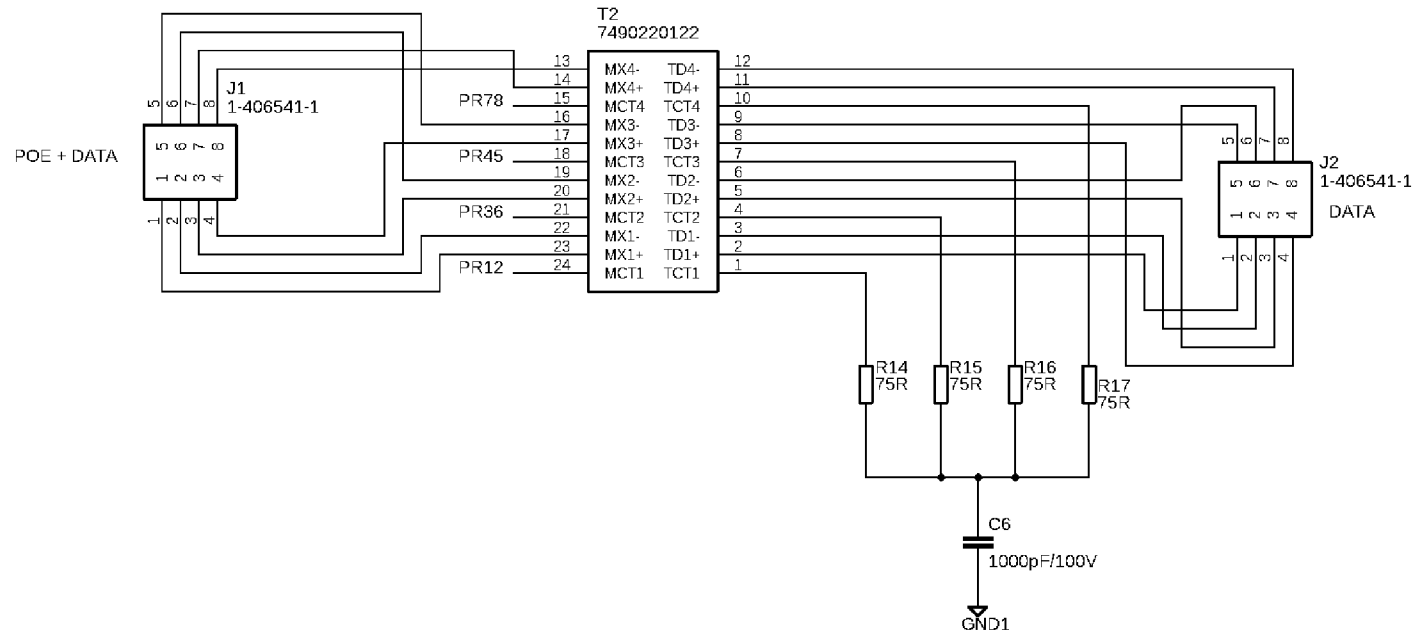
| Napětí na vstupu [V] | Vstupní proud [A] | Výstupní napětí [V] | Výstupní proud [A] | Celkový výkon včetně POE PSE [W] | Vstupní výkon [W] | Výstupní výkon [W] | Účinnost POE PD [%] | Celková účinnost [%] | Účinnost POE PSE [%] |
|----------------------|-------------------|---------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 55,68 | 0,054 | 5,245 | 0,0 | 3,8 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 79,1 |
| 55,64 | 0,077 | 5,243 | 0,5 | 6,8 | 4,3 | 2,6 | 61,2 | 38,6 | 63,0 |
| 55,60 | 0,127 | 5,242 | 1,0 | 9,7 | 7,1 | 5,2 | 74,2 | 54,0 | 72,8 |
| 55,53 | 0,229 | 5,240 | 2,0 | 15,7 | 12,7 | 10,5 | 82,4 | 66,8 | 81,0 |
| 55,45 | 0,325 | 5,237 | 3,0 | 21,9 | 18,0 | 15,7 | 87,2 | 71,7 | 82,3 |
| 55,37 | 0,426 | 5,235 | 4,0 | 27,9 | 23,6 | 20,9 | 88,8 | 75,1 | 84,5 |
| 55,31 | 0,528 | 5,231 | 5,0 | 34,0 | 29,2 | 26,2 | 89,6 | 76,9 | 85,9 |
| 55,22 | 0,630 | 5,227 | 6,0 | 40,0 | 34,8 | 31,4 | 90,2 | 78,4 | 87,0 |
| 55,14 | 0,733 | 5,223 | 7,0 | 46,2 | 40,4 | 36,6 | 90,5 | 79,1 | 87,5 |
| 55,05 | 0,834 | 5,221 | 8,0 | 52,6 | 45,9 | 41,8 | 91,0 | 79,4 | 87,3 |
| 54,97 | 0,938 | 5,215 | 9,0 | 59,0 | 51,6 | 46,9 | 91,0 | 79,6 | 87,4 |
| 54,89 | 1,000 | 5,210 | 10,0 | 64,9 | 54,9 | 52,1 | 94,9 | 80,3 | 84,6 |

Příloha 2 - Tabulka naměřených hodnot pro zatěžovací charakteristiky

| Výstupní napětí [V] | Výstupní proud [A] |
|---------------------|--------------------|
| 3,384 | 0 |
| 3,382 | 1 |
| 3,380 | 2 |
| 3,379 | 3 |
| 3,376 | 4 |
| 3,374 | 5 |
| 3,373 | 6 |
| 3,370 | 7 |
| 3,368 | 8 |
| 3,365 | 9 |
| 3,362 | 10 |

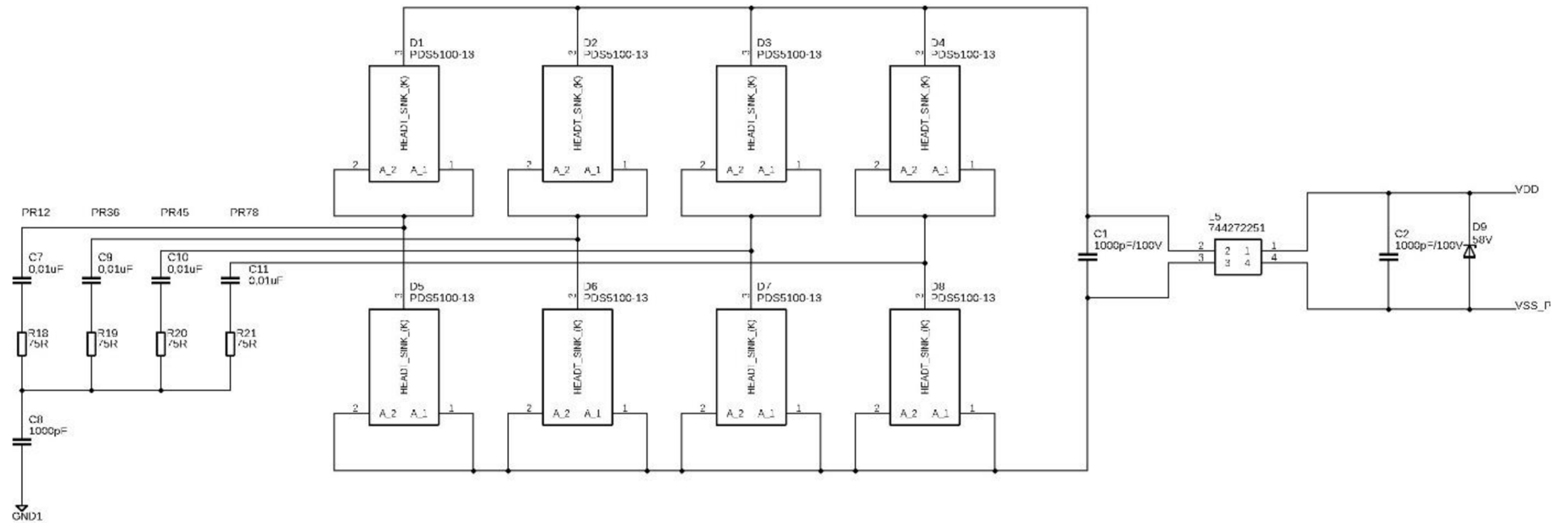
Příloha 3 - Schéma vstupního obvodu část 1

RJ45 connectors with LAN transformer



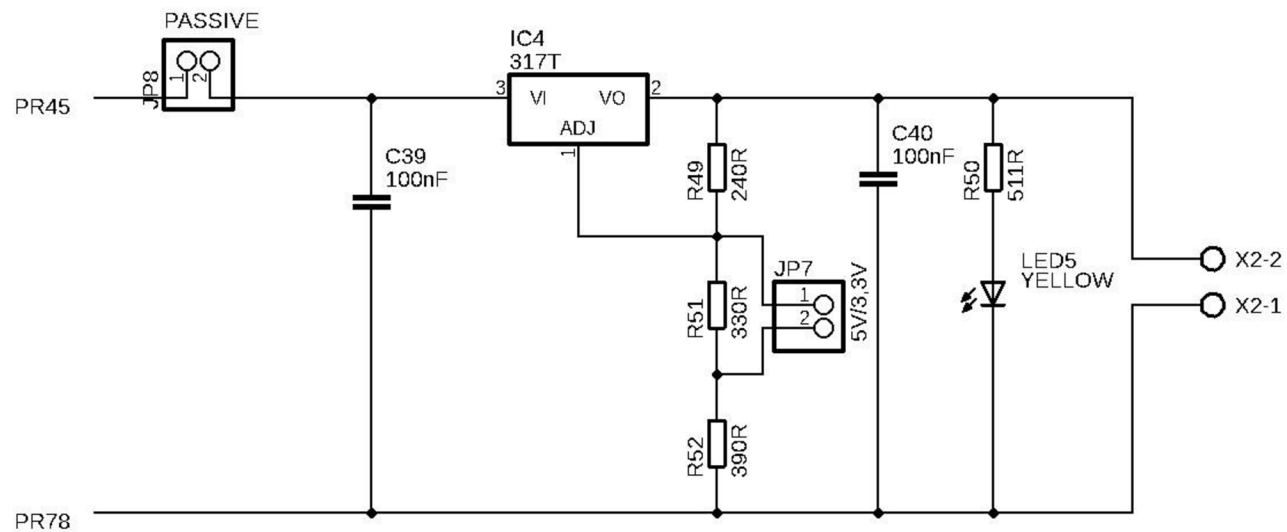
Příloha 4 - Schéma vstupního obvodu část 2

ACTIVE POE PART
Rectifiers

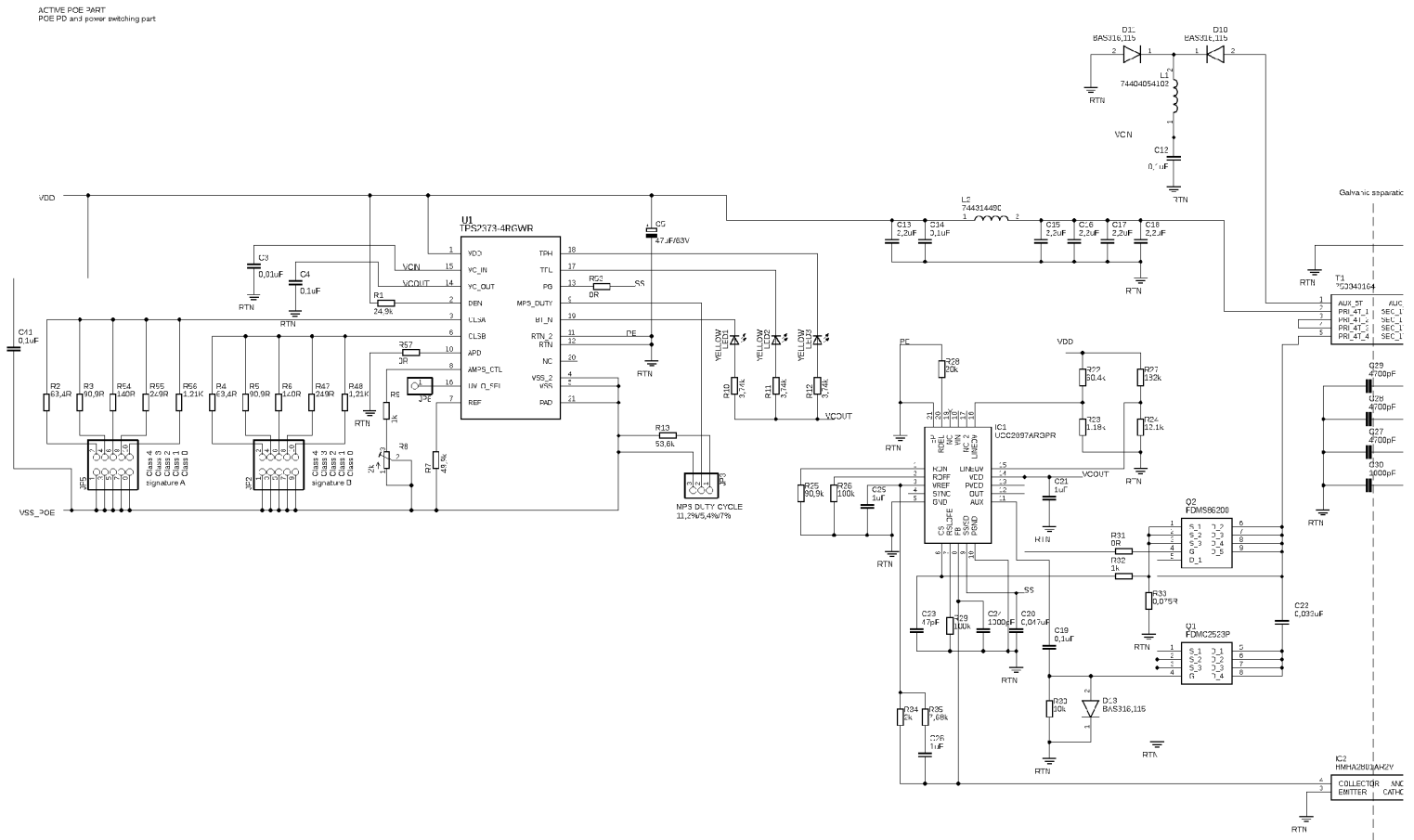


Příloha 5 - Schéma části s pasivním POE

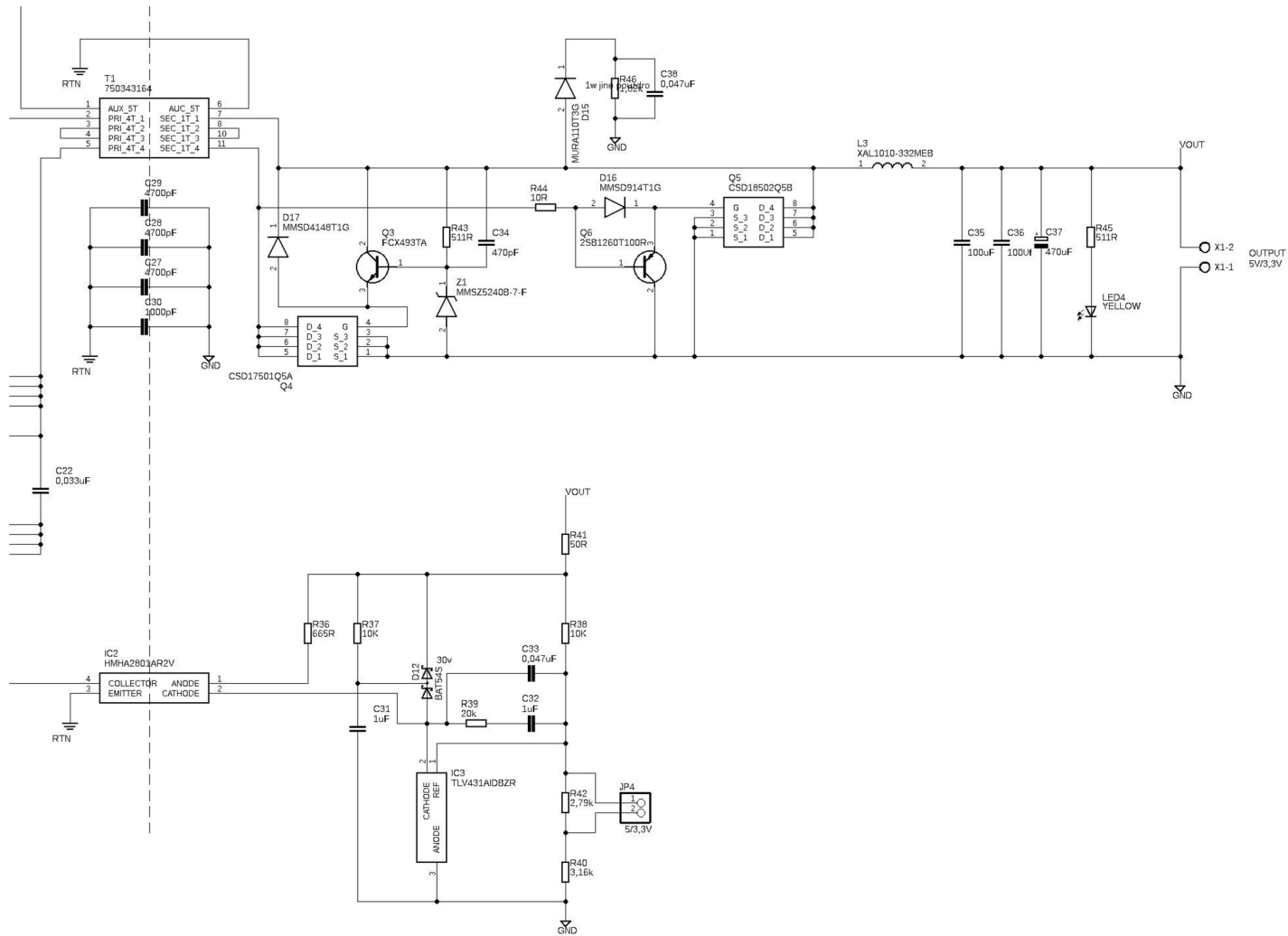
PASSIVE POE PART



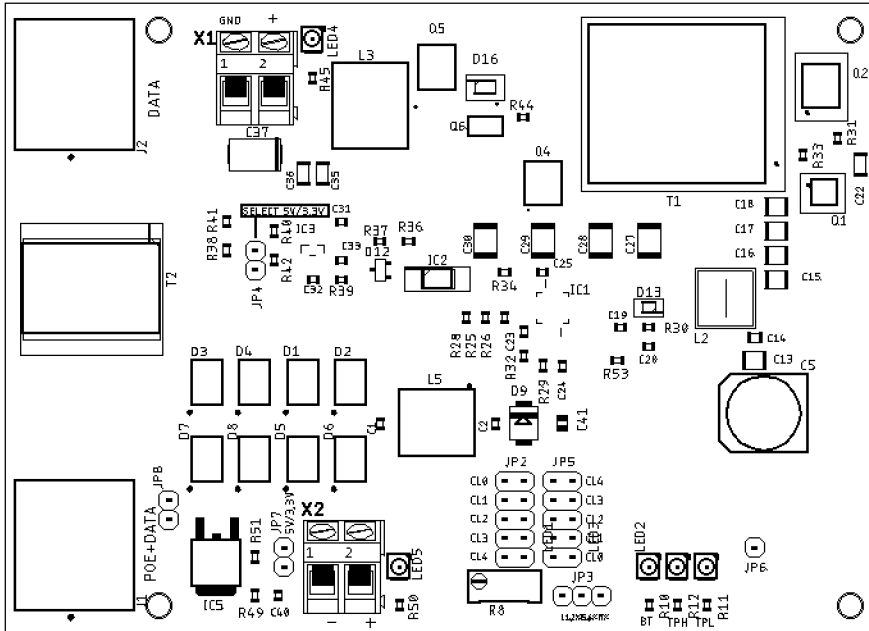
Příloha 6 - Schéma části s aktivním POE



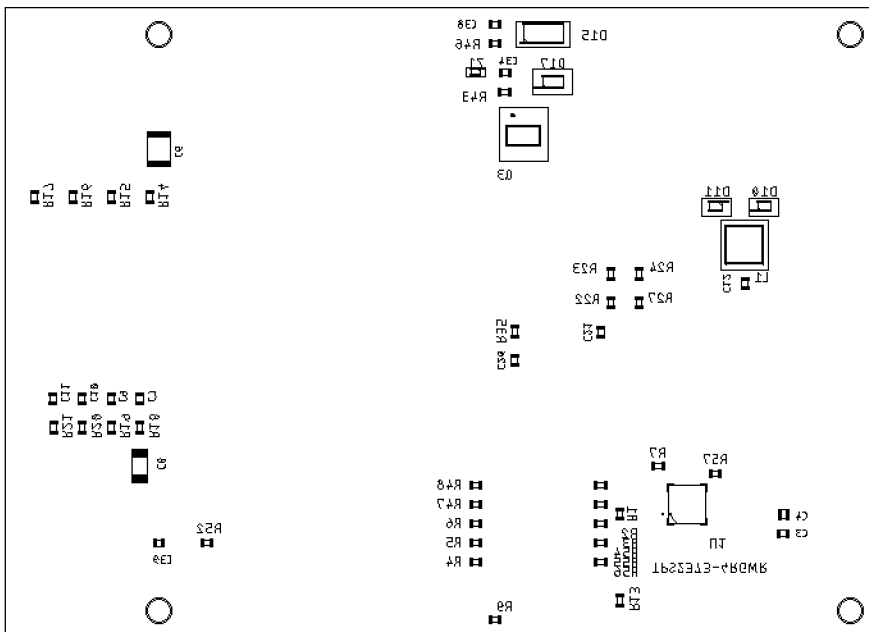
Příloha 7 - Schéma výstupní části



Příloha 8 - Osazovací plánec horní strany pro navrženou DPS



Příloha 9 - Osazovací plánec spodní strany pro navrženou DPS



Příloha 10 - Seznam součástek část 1

| Počet | Hodnota | Součástka | Pouzdro | Označení |
|-------|---------------|------------|--------------|-------------------------|
| 2 | | AK300/2 | AK300/2 | X1, X2 |
| 1 | | PINHD-1X1 | 1X01 | JP6 |
| 3 | | PINHD-1X2 | 1X02 | JP4, JP7, JP8 |
| 1 | | PINHD-1X3 | 1X03 | JP3 |
| 2 | | PINHD-2X5 | 2X05 | JP2, JP5 |
| 5 | 0,01uF | C-EUC0603 | C0603 | C3, C7, C9, C10, C11 |
| 1 | 0,033uF | C-EUC1206K | C1206K | C22 |
| 3 | 0,047uF | C-EUC0603 | C0603 | C20, C33, C38 |
| 1 | 0,075R | R-EU_R0603 | R0603 | R33 |
| 1 | 0,1uF | C-EUC0504 | C0504 | C4 |
| 2 | 0,1uF | C-EUC0603 | C0603 | C12, C19 |
| 1 | 0,1uF | C-EUC0805 | C0805 | C41 |
| 1 | 0,1uF | C-EUC0805K | C0805K | C14 |
| 3 | 0R | R-EU_R0603 | R0603 | R31, R53, R57 |
| 2 | 1,21K | R-EU_R0603 | R0603 | R48, R56 |
| 1 | 1,82k | R-EU_R0603 | R0603 | R46 |
| 2 | 1-406541-1 | 1-406541-1 | 1-406541-1_1 | J1, J2 |
| 1 | 1.18k | R-EU_R0603 | R0603 | R23 |
| 1 | 1000pF | C-EUC0603 | C0603 | C24 |
| 1 | 1000pF | C-EUC1808 | C1808 | C8 |
| 1 | 1000pF | C-EUC1812K | C1812K | C30 |
| 2 | 1000pF/100 V | C-EUC0603 | C0603 | C1, C2 |
| 1 | 1000pF/2000 V | C-EUC1812K | C1812K | C6 |
| 1 | 100Uf | C-EUC1206K | C1206K | C36 |
| 2 | 100k | R-EU_R0603 | R0603 | R26, R29 |
| 2 | 100nF | C-EUC0603 | C0603 | C39, C40 |
| 1 | 100uF | C-EUC1206K | C1206K | C35 |
| 2 | 10k | R-EU_R0603 | R0603 | R37, R38 |
| 1 | 10R | R-EU_R0603 | R0603 | R44 |
| 1 | 10k | R-EU_R0603 | R0603 | R30 |
| 1 | 12.1k | R-EU_R0603 | R0603 | R24 |
| 2 | 140R | R-EU_R0603 | R0603 | R6, R54 |
| 1 | 182k | R-EU_R0603 | R0603 | R27 |
| 2 | 1k | R-EU_R0603 | R0603 | R9, R32 |
| 5 | 1uF | C-EUC0603 | C0603 | C21, C25, C26, C31, C32 |
| 5 | 2,2uF | C-EUC1210K | C1210K | C13, C15, C16, C17, C18 |
| 1 | 2,79k | R-EU_R0603 | R0603 | R42 |

Příloha 11 - Seznam součástek část 2

| Počet | Hodnota | Součástka | Pouzdro | Označení |
|-------|--------------|--------------------|-------------------------|--|
| 2 | 20k | R-EU_R0603 | R0603 | R28, R39 |
| 1 | 24,9k | R-EU_R0603 | R0603 | R1 |
| 1 | 240R | R-EU_R0603 | R0603 | R49 |
| 2 | 249R | R-EU_R0603 | R0603 | R47, R55 |
| 1 | 2SB1260T100R | 2SB1260T100R | ROHM_SOT-89 | Q6 |
| 1 | 2k | R-EU_R0603 | R0603 | R34 |
| 1 | 2k | R-TRIMM64Y | RTRIM64Y | R8 |
| 1 | 3,16k | R-EU_R0603 | R0603 | R40 |
| 3 | 3,74k | R-EU_R0603 | R0603 | R10, R11, R12 |
| 1 | 330R | R-EU_R0603 | R0603 | R51 |
| 1 | 390R | R-EU_R0603 | R0603 | R52 |
| 3 | 4700pF | C-EUC1812K | C1812K | C27, C28, C29 |
| 1 | 470pF | C-EUC0603 | C0603 | C34 |
| 1 | 470uF | CPOL-EUD/7343-31R | D/7343-31R | C37 |
| 1 | 47pF | C-EUC0603 | C0603 | C23 |
| 1 | 47uF/63 V | CPOL-EU140CLH-1014 | 140CLH-1014 | C5 |
| 1 | 49,9k | R-EU_R0603 | R0603 | R7 |
| 1 | 50R | R-EU_R0603 | R0603 | R41 |
| 3 | 511R | R-EU_R0603 | R0603 | R43, R45, R50 |
| 1 | 53,6k | R-EU_R0603 | R0603 | R13 |
| 1 | 58 V | ZENER-DIODESMB | SMB | D9 |
| 1 | 60.4k | R-EU_R0603 | R0603 | R22 |
| 2 | 63,4R | R-EU_R0603 | R0603 | R2, R4 |
| 1 | 665R | R-EU_R0603 | R0603 | R36 |
| 1 | 7,68k | R-EU_R0603 | R0603 | R35 |
| 1 | 74404054102 | 74404054102 | 74404054102 | L1 |
| 1 | 744272251 | 744272251 | 744272251 | L5 |
| 1 | 744314490 | 744314490 | WE-HCI_7030/7040/705023 | L2 |
| 1 | 7490220122 | 7490220122 | SOIC127P1600X885-24N | T2 |
| 1 | 750343164 | 750343164 | 750343164 | T1 |
| 8 | 75R | R-EU_R0603 | R0603 | R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21 |
| 2 | 90,9R | R-EU_R0603 | R0603 | R3, R5 |
| 1 | 90,9k | R-EU_R0603 | R0603 | R25 |
| 3 | BAS316,115 | BAS316,115 | SOD2512X110N | D10, D11, D13 |
| 1 | BAT54S | BAT54S | SOT23 | D12 |
| 1 | CSD17501Q5A | CSD17501Q5A | Q5A | Q4 |

Příloha 12 - Seznam součástek část 3

| Počet | Hodnota | Součástka | Pouzdro | Označení |
|-------|--------------------|----------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 1 | CSD18502Q5B | CSD18502Q5B | Q5B | Q5 |
| 1 | FCX493TA | FCX493TA | ZXTN2010ZQTA | Q3 |
| 1 | FDMC2523P | FDMC2523P | FDMC86139P | Q1 |
| 1 | FDMS86200 | FDMS86200 | FDMS1D4N03S | Q2 |
| 1 | HMHA2801AR2V | HMHA2801AR2V | SOIC127P680X239-4N | IC2 |
| 1 | LM317MABDT | LM317MABDT | DPACK | IC5 |
| 1 | MMSD4148T1G | MMSD914T1G | SOD3716X135N | D17 |
| 1 | MMSD914T1G | MMSD914T1G | SOD3716X135N | D16 |
| 1 | MMSZ5240B-7-F | MM5Z11VT5G | SODFL1608X70N | Z1 |
| 1 | MURA110T3G | MURA110T3G | DIOM5226X220N | D15 |
| 8 | PDS5100-13 | PDS5100-13 | POWERDI5 | D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8 |
| 1 | TLV431AIDBZR | TLV431AIDBZR | SOT95P237X112-3N | IC3 |
| 1 | TPS2373-4RGWR | TPS2373-4RGWR | RGW0020B | U1 |
| 1 | UCC2897ARGPR | UCC2897ARGPR | QFN50P400X400X100- 21N | IC1 |
| 1 | XAL1010- 332MEB | XAL1010-332MEB | XAL1010 | L3 |
| 5 | YELLOW | LG_T679-E1F1-1 | PLCC2 | LED1, LED2, LED3, LED4, LED5 |

Příloha 13 - Schémata a podklady pro výrobu DPS v elektronické podobě

Podklady pro výrobu DPS v příloze byly vygenerovány na základě nastavení pro firmu Gatema.