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

POWER OVER ETHERNET

POWER OVER ETHERNET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Matěj Hykš

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Matěj Hykš ***ID:*** 211255

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Power over Ethernet

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku vzdáleného napájení síťových zdrojů dle standardu IEEE 802.3af, IEEE 802.3at, a IEEE 802.3bt. Analyzujte chování PoE vybraných síťových prvků experimentálním měřením. Navrhněte vlastní nebo použijte některé ze stávajících zapojení pro PD, u kterého diskutujte význam jeho jednotlivých částí a prvků. Zapojení prakticky realizujte a jeho činnost ověřte experimentálním měřením. V rámci experimentálního měření analyzujte vliv na síťovou komunikaci a zhodnoťte správnou činnost realizovaného PoE.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] IEEE P802.3at DTE Power Enhancements Task Force, dostupné online: http://www.ieee802.org/3/at/, [cit: 2020-09-14]

[2] Katalogový list MAX5922 - +48V, Single-Port Network Power Switch For Power-Over-LAN, 19-2708, Rev. 0; 4/03.

Termín zadání: 7.2.2022 ***Termín odevzdání:*** 31.5.2022

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Koton, 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.

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na zpracování téma ohledně napájení síťových prvků pomocí Power over Ethernet, neboli PoE. Práce se důkladněji zaměřuje na funkce standardů 802.3af a 802.3at, které podrobně popisuje a vysvětluje jejich funkcionalitu na konkrétních příkladech PD čipů. Následně popisuje metodiku měření použitou na 3 zařízení patřící do kategorie PSE a 4 zařízení z kategorie PD. V obou případech se zaměřuje na jejich analogovou tak i digitální komunikaci.

Klíčová slova

Power over Ethernet, PoE, 802.3af, IEEE, PSE, PD

Abstract

The bachelor thesis focuses on the topic of powering network elements using Power over Ethernet shortly PoE. The work focuses more in detail on the functions of the 802.3af and 802.3at standards, which are described in detail and explains their functionality on specific examples of PD chips. Then it summarizes the measurement methodology used for 3 devices belonging to the PSE category and 4 devices from the PD category. In both cases, it focuses on their analog and digital communication.

Keywords

Power over Ethernet, PoE, 802.3af, IEEE, PSE, PD

Bibliografická citace

HYKŠ, Matěj. *Power over Ethernet.* Brno, 2022. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022. 46 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Matěj Hykš
VUT ID studenta:	211255
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Power over Ethernet

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: 27. května 2022 ----------

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářskou práce prof. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za velkou pomoc při tvoření bakalářské práce. Hlavní díky patří jeho radám za nasměrování k způsobu zpracování bakalářské práce, které je unikátní a přínosné. Také za získání přístupu k materiálnímu vybavení školy, bez kterého by nebylo vypracování možné. Opětovně si také cením profesionální a zároveň pohodové komunikace která byla panem prof. Kotonem nasazena.

V Brně dne: 27. 5. 2022 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **10**

ÚVOD **11**

1. PASIVNÍ A AKTIVNÍ POE **12**

1.1 802.3AF 13

1.1.1 Úrovně napájení *14*

1.1.2 Zapojení párů *14*

1.1.3 Porovnání s 802.3at a 802.3bt *15*

1.1.4 Protokoly LLDP CDP *16*

1.1.5 Analýza zachyceného protokolu LLDP a CDP *17*

1.1.6 Zapojení párů pro 802.3at a 802.3bt *19*

1.2 MAX 5922 – PSE PRO 802.3AF 20

1.3 POROVNÁNÍ S OSTATNÍMI PSE ČIPY PRO 802.3AF 21

1.4 LTC4257 – PD PRO 802.3AF 22

2. ZPRACOVÁNÍ A METODIKA MĚŘENÍ **24**

2.1 MĚŘENÍ PSE ZAŘÍZENÍ 24

2.1 MĚŘENÍ PD ZAŘÍZENÍ 25

3. PSE ZAŘÍZENÍ **27**

3.1 CISCO CATALYST 3560G 48 PORT GIGABIT POE SWITCH 27

3.1.1 Vlastnosti *27*

3.1.2 Komentář *27*

3.1.3 Měření *28*

3.2 MIKROTIK CLOUD ROUTER SWITCH 328 29

3.2.1 Vlastnosti *29*

3.2.2 Komentář *29*

3.3 LOGITECH SINGLE POWER OVER ETHERNET 31

3.3.1 Vlastnosti *31*

3.3.2 Komentář *31*

3.3.3 Měření *31*

4. PD ZAŘÍZENÍ **33**

4.1 MIKROTIK CAP LITE 33

4.1.1 Vlastnosti *33*

4.1.2 Komentář *33*

4.1.3 Měření *34*

4.2 IP TELEFON SIP YEALINK 35

4.2.1 Vlastnosti *35*

4.2.2 Komentář *36*

4.3 RASPBERRY PI 4B A POE+ HAT 38

4.3.1 Vlastnosti *38*

4.3.2 Zhodnocení *38*

4.4 ARUBA AP-225 40

4.4.1 Vlastnosti *40*

4.4.2 Komentář *40*
4.4.3 Měření *40*

5. ZÁVĚR **42**

LITERATURA **44**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **46**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Blokové schéma pasivního PoE injektoru 12
Obr. 1.2: PoE rozbočovač 12
Obr. 1.3 Blokové schéma napájecího injektoru 802.3af 13
Obr. 1.4: Blokové schéma zapojení pro alternativu A [1] 14
Obr. 1.5: Blokové schéma zapojení pro alternativu B Endpoint PSE [1] 15
Obr. 1.6: Blokové schéma zapojení pro alternativu B Midspan PSE [1] 15
Obr. 1.7: Blokové zprávy protokolu LLDP v TLV formátu [2] 16
Obr. 1.8: Zachycená zpráva protokolu LLDP 18
Obr. 1.9: Úryvek zachyceného CDP rámce 18
Obr. 1.10: 1000/2.5G/5G/10GBASE-T 4 párový režim Endpoint [3] 19
Obr. 1.11: 1000/2.5G/5G/10GBASE-T 4 párový režim Midspan [3] 19
Obr. 1.12: Blokové schéma integrovaného obvodu MAX 5922 [6] 20
Obr. 1.13: Schématické zapojení čipu LTC4257 [4] 23
Obr. 2.1: Detekční cyklus pro standard 802.3af [1] 24
Obr. 2.2: Příklad zapojení pro testování PSE standardu 802.3af [1] 25
Obr. 2.3: Časový průběh proudu při detekci a zapnutí PD zařízení [4] 25
Obr. 3.1: Cisco Catalyst zapnutí napájení 28
Obr. 3.2: Cisco Catalyst informace ze vzdáleného připojení 28
Obr. 3.3: Cisco Catalyst CDP rámec 29
Obr. 3.4: Mikrotik detekční pulzy 30
Obr. 3.5: Mikrotik detekce a přechod do napájecího stavu 30
Obr. 3.6: Logitech po zapojení zátěže 31
Obr. 3.7: Logitech průběh napětí na nenapájeném páru vodičů 32
Obr. 4.1: cAP Lite zapnutí 34
Obr. 4.2: cAP Lite průběh napětí 34
Obr. 4.3: cAP Lite LLDP rámec 35
Obr. 4.4: cAP Lite CDP rámec 35
Obr. 4.5: SIP Yealink zapnutí napájení 36
Obr. 4.6: SIP Yealink stabilizace napětí 37
Obr. 4.7: SIP Yealink CDP rámec 37
Obr. 4.8: SIP Yealink webová konfigurace 38
Obr. 4.9: RPI Pi zapnutí napájení 39
Obr. 4.10: RPI Pi ustálení napětí 39
Obr. 4.11: AP-225 zapnutí napájení 40
Obr. 4.12: AP-225 ustálení napětí 41

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Úrovně napájení pro standard 802.3af [1] 14
Tab. 1.2: Základní porovnání mezi standardy PoE [3] 16
Tab. 1.3: Zprávy v poli type/source/priority [2] 17
Tab. 1.4: Porovnání čipů pro PSE 802.3af 22
Tab. 2.1: Třídy napájení v rozsahu PD zařízení použité k vypracování bakalářské práce 25

ÚVOD

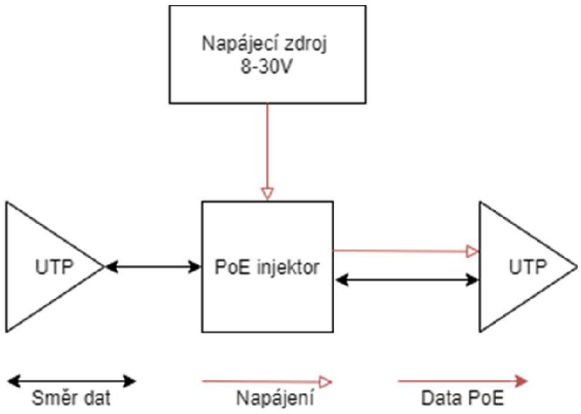
Každé síťové zařízení pro svoji funkčnost potřebuje určité množství elektrické energie. Dříve před vývojem technologií bylo potřeba připojit každé zařízení přes externí zdroj napájení do zásuvky střídavého napětí. Nyní se s vývojem technologií a zaměřením na pohodlnost uživatele a spolehlivost používá napájení po síťových kabelech.

Power over Ethernet (PoE) může být použito jako primární zdroj napájení zařízení v místech, kde není možné použít externí zdroj. Případně může být použito jako záložní, nebo být zálohované lokálním zdroje v místech kde je to možné a vyžadované pro větší dostupnost. V principu můžeme PoE rozdělit na 2 přístupy: pasivní a aktivní.

Cílem bakalářské práce bude krátce vysvětlit funkcionalitu pasivního PoE a jeho příklady použit. Následně se budeme zabývat již pouze PoE aktivním, jeho vlastnostmi a požadavky jednotlivých úrovní standardů. Zároveň si nižší standardy aktivního PoE ukážeme na konkrétní příkladech PSE čipů od různých výrobců a porovnáme jejich funkce nad rámec standardu. V bakalářské práci se ale zaměříme na dodržování standardů, jejichž metodiku měření si blíže popíšeme v druhé kapitole. Objasníme si pro nás důležité parametry a rozdělíme je na PSE a PD zařízení. Třetí kapitola se zaměřuje, na již právě zmíněné PSE zařízení od 3 různých výrobců a s rozdílným způsobem aplikace. Stručně popíšeme jejich parametry, podíváme se na jejich průběhy napětí a případnou komunikaci na vyšší vrstvě. Ve čtvrté kapitole prostudujeme protějšek k PSE, a to PD zařízení. V tomto případě si opět stručně popíšeme 4 zařízení různých výrobců, standardů, použití. Důležité pro nás budou odpovědi k napájení a zdali vyhovují standardu, případně vlastnostem uváděných u konkrétního typu zařízení.

1. PASIVNÍ A AKTIVNÍ POE

Pasivní PoE je dnes nejpoužívanější typ PoE. Jeho princip je velice jednoduchý. Pro dodání požadovaného výkonu pro koncové zařízení využívá páru vodičů, které se aktivně neúčastní na datové komunikaci. Použití zjednodušeně ukázáno na obr. 1.1.



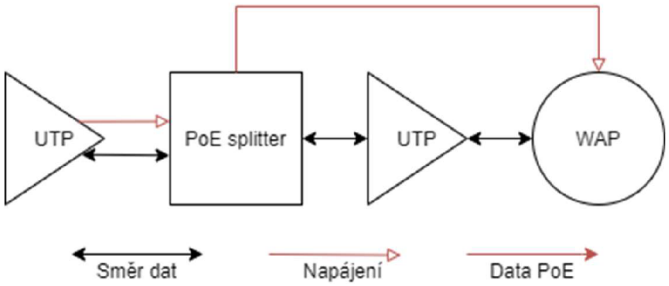
Obr. 1.1: Blokové schéma pasivního PoE injektoru

Tento typ PoE je převážné pro napájení bezdrátových přístupových bodů, mikrovlnných spojů, routerů, modemů a dalších, nízkonákladových komunikačních zařízení.

Právě cena je rozhodujícím faktorem pro nasazení pasivního PoE. Použití pasivního PoE injektor bez integrovaného napájecího zdroje je nejlevnější variantou, jak napájet zařízení pomocí síťových kabelů. Cena narůstá s integrovaným zdrojem, který však zaručuje, při použití vzdáleného zařízení stejného výrobce, jeho kompatibilitu, a to nehledě na přímý nebo kroucený kabel.

Tato jednoduchost je však potenciálně nebezpečná, protože v obvodu se nenachází žádná logika a injektor ihned dodává napětí do koncového zařízení. Právě v domácím prostředí, kde se najde jeho největší uplatnění, může vést k poškození nekompatibilního zařízení na vzdáleném konci. Například v případě připojení síťové karty 1000BASE-T kompatibilní, může dojít k poškození párů potřebných pro komunikaci na gigabitové rychlosti, nebo samotnému zničení mikročipů síťové karty.

Ve speciálních případech, kde vzdálené zařízení není v dosahu elektrické sítě, není kompatibilní s pasivní či aktivním PoE, lze využít PoE rozbočovač. Jedná se o tzv obrácený PoE injektor, který fyzicky oddělí vstupní páry na výstupní páry a napájecí konektor.



Obr. 1.2: PoE rozbočovač

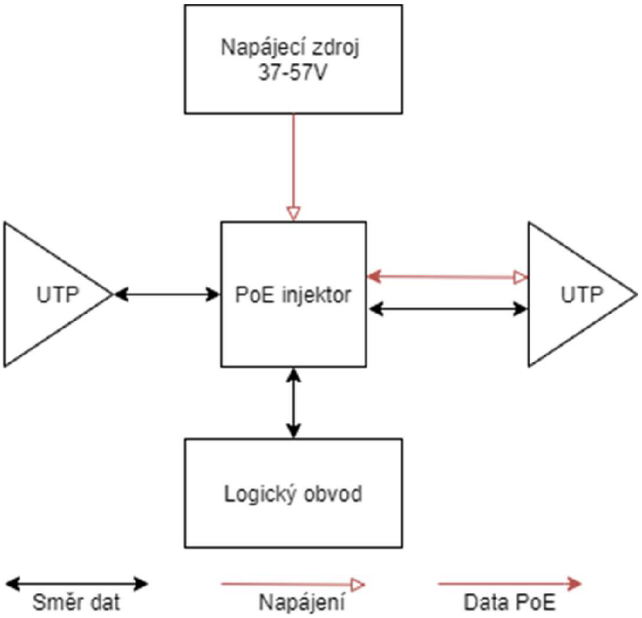
Aktivní PoE vzdáleně napájí zařízení pomocí již existujících datových kabelů, a to jak po dedikovaných párech, které nejsou využity k datové komunikaci, tak i po již využitých párech, které se aktivně účastní datové komunikace, a to spojením střídavé datové složky a stejnosměrné napájecí složky.

Při porovnání s pasivním PoE je jeho implementace cenově náročnější, ale mnohem bezpečnější. K jeho funkci je třeba speciální čip na napájecím (PSE) a napájenému (PD) zařízení. Pokud je vzdálený čip přítomný, tak odpoví napájecímu zařízení, zdali je s konkrétním typem PoE kompatibilní.

1.1 802.3af

Jedná se o první standard pro aktivní napájení síťových prvků od společnosti IEEE z roku 2003. Při napěťovém rozsahu 37 až 57 V a proudu maximálně 350 mA dodává výkon 12,95 W pro PD zařízení z původních 15,40 W na PSE, protože očekává ztráty na vedení. Z tohoto důvodu je nutné využití minimálně kabeláže Cat. 3 či 5 s maximálním odporem 20 Ω na pár.[1]

Při porovnání schéma aktivního napájecího injektoru pro standard 802.3af (obr. 1.3) s blokovým schéma pasivního injektoru (obr. 1.1) můžeme vidět stejný typ obvodu s právě přidaným logickým čipem, který vyjednává potřebné parametry pro vzdálené PD zařízení, případně jeho úplné odmítnutí napájení.



Obr. 1.3 Blokové schéma napájecího injektoru 802.3af

Zjištění kompatibility pro správnou funkčnost mezi vzdáleným PD a napájecím PSE je třeba zajistit kompatibilitu. PSE zařízení jí zjistí pomocí odporu vzdáleného PD zařízení a to tak, že odešle detekční napětí (V_{detect} rozsahu 2,8 V až 10 V) a změří procházející proud. Takto získá 1 či více vzorků. Pokud vypočítaný odpor vyhovuje standardu (PD zařízení má odpor 19 kΩ až 26,5 kΩ), tak pokračuje s dalším určení parametrů.[1]

1.1.1 Úrovně napájení

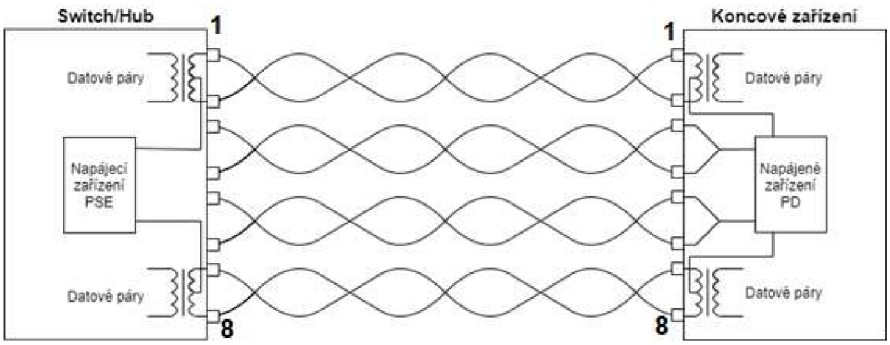
Po správném zjištění kompatibility pokračuje logický čip v určení 1 ze 3 úrovní napájení. Úroveň zjistí opětovně změřením odporu vzdáleného PD zařízení (napětím 10,1 V až 14,5 V). Z vypočteného odporu následně určí úroveň napájení CL0, CL1, CL2 nebo CL3. Speciálním případem je 0. úroveň, která nabízí plný dostupný výkon PSE. Její využití nastane v případě, že zařízení nebude úspěšně klasifikováno k úrovni napájení. Z níže uvedené tabulky 1.1 můžeme vidět nižší dostupný výkon pro PD, než který byl poskytnut PSE. Takové snížení dostupného výsledku je započítáno, protože standard počítá se ztrátami na vedení.

Tab. 1.1: Úrovně napájení pro standard 802.3af [1]

Třída napájení	dostupný výkon PSE	dostupný výkon PD
CL0	15,4 W	12,95 W
CL1	4 W	3,84 W
CL2	7 W	6,49 W
CL3	15,4 W	12,95 W

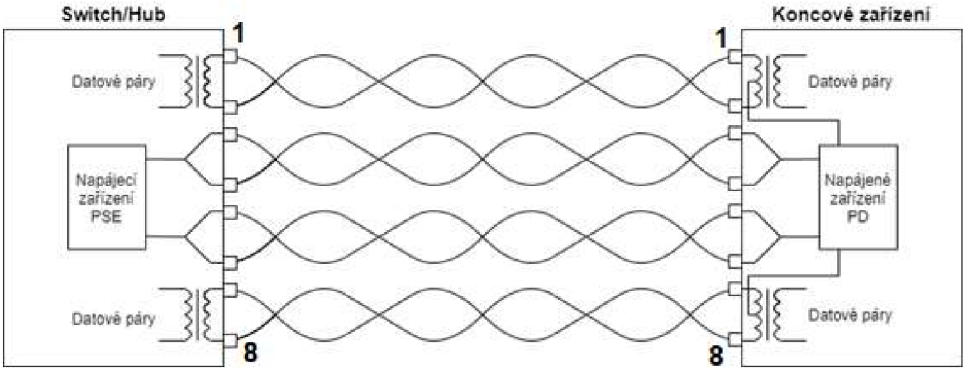
1.1.2 Zapojení párů

Pro zapojení existují 2 alternativy: A a B. Alternativa A (obr. 1.4) má pouze jednu možnost připojení a to napájení na zařízení vysílající data tzv. Endpoint PSE. Data i napájení se přenáší po stejných párech. K jejich oddělení se využívají transformátory, které přenesou pouze střídavou složku – data a stejnosměrná složka – PoE je využita k napájení PD. Kladné napětí je přivedeno na pin 1 a 2, záporné na 3 a 6. V tomto zapojení je standard kompatibilní s rychlostmi 10Mb/s, 100Mb/s.



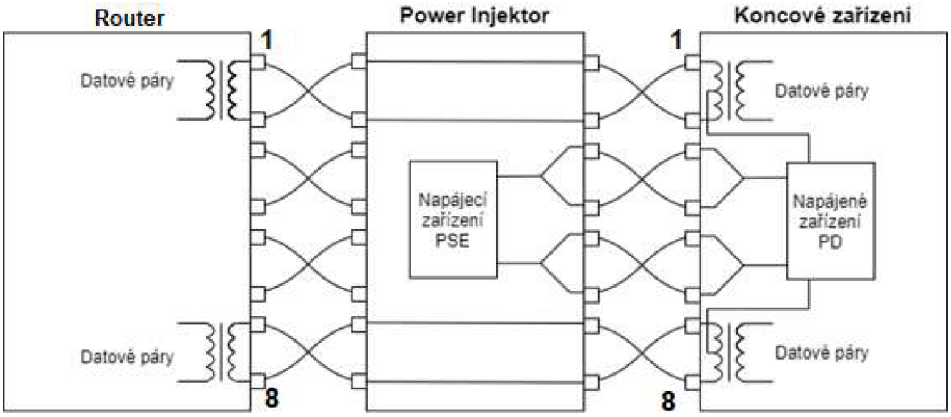
Obr. 1.4: Blokové schéma zapojení pro alternativu A [1]

Alternativa B využívá 2 možnosti: umístění PSE v zařízení vysílajícím data (Endpoint PSE), nebo v náhodném místě na kabeláži tzv. Midspan PSE. V případě využití možnosti Endpoint PSE je napájecím zařízením většinou switch s PoE funkcí. Zjednodušené schéma je uvedeno na obrázku 1.5 dále.



Obr. 1.5: Blokové schéma zapojení pro alternativu B Endpoint PSE [1]

Možnost Midspan může být využita v případě potřeby napájení 1 zařízení, například v případě potřeby napájení bezdrátového přístupového bodu k místnímu ISP, kdy na našem konci je kombinovaný domácí Router/Switch/AP. V takovém případě umístíme PoE injektor na vhodném místě datového kabelu. PoE injektor zajistí detekci a napájení koncového zařízení po nevyužitých párech jak je uvedeno na obrázku 1.6.



Obr. 1.6: Blokové schéma zapojení pro alternativu B Midspan PSE [1]

1.1.3 Porovnání s 802.3at a 802.3bt

Jako první uvedený standard 802.3af je označován jako PoE 1. typu. Je schopný doručit výkon 12,95 W při použití napěťového rozsahu 37 až 57 V. Dále se výkon rozděluje na 3 úrovně. K napájení se využívá varianty A nebo B.

Druhým standardem je 802.3at, PoE typu 2, neboli PoE+. Rozšiřuje předchozí standard primárně o jeho dostupný výkon. Pro PD je nyní dostupné 25,5 W se 4 možnostmi úrovně napájení. První 3 úrovně jsou stejné, jako v PoE typu 1, ale 4. úroveň pracuje s rozsahem 12,95 až 25,5 W. Tyto úrovně mohou být vyjednané pomocí charakteristického odporu, stejně jako v PoE typu 1, nebo pomocí LLDP protokolu a hodnoty TLV, blíže viz kapitole 1.2.1.

K napájení je možné využít variantu A nebo B, ale jejich zapojení nyní nezáleží na umístění PSE, proto je možnost využít Endpoint a Midspan v obou případech. Požadovaná úroveň na kabeláž se ale zvýšila na Cat. 5.

Třetím standardem je 802.3bt, PoE typu 3 a 4, neboli 4PPoE/PoE++. Oba typy dále rozšiřují předchozí standardy, typ 3 na 51 W se 6 úrovněmi napájení a typ 4 na 71 W s 8 úrovněmi napájení, které jsou vyjednané charakteristickým odporem nebo pomocí LLDP protokolu. Zásadní změna přichází s možností zapojení. Pro typ 3 jsou zde opět možnosti A a B. Přidává se k nim ale 4 párový režim, který je potřebný pro funkci 5 a 6 úrovně a u typu 4 je tento režim požadovaný. Data a napájení se přenáší po všech 4 párech a jednotlivé složky jsou opětovně odděleny transformátory.[3]

Tab. 1.2: Základní porovnání mezi standardy PoE [1, 2, 3]

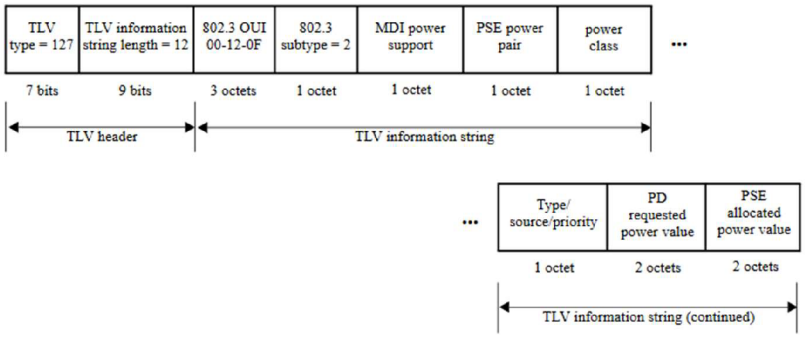
	802.3af	802.3at	802.3bt
Max spotřeba PSE	15,4 W	30 W	71 W
Max výkon pro PD	12,95 W	25,5 W	100 W
Detekce kompatibility	odpor	odpor/LLDP	odpor/LLDP
Maximální proud	350 mA	600 mA	950 mA
Úrovně napájení	3	4	8
Požadavky na kabeláž	Cat. 3	Cat. 5	Cat. 5
Standard z roku	2003	2009	2018

1.1.4 Protokoly LLDP CDP

Protokol LLDP, pracující na 2. vrstvě ISO/OSI, je součástí standardu IEEE 802.1AB. Slouží primárně ke zjišťování sousedních zařízení, nebo v 1 lokální síti a jejich dovedností.

Na níže uvedeném obrázku 1.7 lze přibližně popsat strukturu obsažené TLV zprávy. Jako první slouží 7-bit hlavička, která oznamuje začátek zprávy. Následujících 9 bitů je k oznámení očekávané délky zprávy. 3 byty slouží k identifikaci organizace a 1 byte k určení podtypu této organizace. Následujících až 507 bytů nese informaci o zařízení, ze kterého byl rámec vyslán.

Tyto informace jsou obsaženy v rámci, který obsahuje cílovou mutlicast a cílovou MAC adresu, ethertype, chassis id TLV, Port ID TLV, Time to live TLV a konec LLDPDU.[2]



Obr. 1.7: Blokové zprávy protokolu LLDP v TLV formátu [2]

V následující tabulce 1.2 je vidět příklad kombinací pro odesílané zprávy PoE. Zařízení o sobě dává vědět jaké ho je typu, jaká je jeho funkce a priorita napájení.

Tab. 1.3: Zprávy v poli type/source/priority [2]

Bit	Funkce	Hodnota		Význam
		7	6	
7:6	typ napájení	1	1	typ 1 PD
		1	0	typ 1 PSE
		0	1	typ 2 PD 0
		0	0	typ 2 PSE
		5	4	
5:4	v případě typu PD	1	1	PSE a přímé napájení
		1	0	Rezervováno
		0	1	PSE
		0	0	neznámé
		5	4	
	v případě typu PSE	1	1	rezervováno
		1	0	záložní zdroj
		0	1	primární zdroj
		0	0	neznámé
3:2	rezervováno	3	2	ignorováno příjemcem
		0	0	
		1	0	
1:0	priorita napájení	1	1	nízká
		1	0	vysoká
		0	1	kritická
		0	0	neznáma

Pro ostatní příklady a informace je vhodné přečíst standard 802.3bt, který je aktuální a obsahuje potřebné informace k hlubšímu nastudování.[3]

1.1.5 Analýza zachyceného protokolu LLDP a CDP

K analýze protokolů LLDP a CDP jsem propojil síťovou kartu Aquantis 5G Ethernet umístěnou na základní desce ASUS s fyzickou adresou 9C:5C:8E:BC:78:B3 do portu 2, který je součástí přepínače Cisco Catalyst 3560G series PoE-48. Jedná se o starší gigabitový switch řady, který je ale 802.3af kompatibilní a pro účely analýzy datové komunikace naprosto dostatečný.

Na obrázku 1.8 se nachází rámec protokolu LLDP o celkové délce 58 bytů. Pro naše účely bude stačit popsat hodnotu TLV:

- 49-51 unikátní kód organizace – 00:12:bb (Telecommunications In)
- 52 Media Subtype – Media Capabilities (0x01)
- 53-54 dovednosti - LLDP-MED
- 55 třídní typ – Endpoint Class I (1)
- 7 bitů – End of LLDPU (0)
- 9 bitů TLV délka - 0

```
0000  01 80 c2 00 00 0e 9c 5c  8e bc 78 b3 88 cc 02 07   ·······\ ··x·····
0010  04 9c 5c 8e bc 78 b3 04  07 03 9c 5c 8e bc 78 b3   ··\··x·· ···\··x·
0020  06 02 0e 11 fe 09 00 12  0f 01 03 00 01 00 00 fe   ........ ........
0030  07 00 12 bb 01 00 01 01  00 00                     ........ ··
```

Obr. 1.8: Zachycená zpráva protokolu LLDP

Pro nás užitečné informace začínají na 49 bytu zprávy, zde se nachází unikátní kód organizace. Následuje informace o dovednostech síťové karty, mezi které patří pouze dovednost LLDP-MED a následuje ukončení rámce.

Mezi zachycenými protokoly se nacházel také Cisco protokol CDP (obr 1.9), celým názvem Cisco Discovery Protocol. V principu má podobnou funkci jako LLDP, ale liší se formátem nesené informace.

Samotný rámec je mnohonásobně delší a to celých 435 bytů. Díky tomu nese také mnohem více informací: konkrétní model switche, jeho verze IOS, odkaz na stránky výrobce atd. Nás v tomto případě zajímají ale byty 419 až 435, které nesou právě informaci o jeho dovednostech, co se napájení týče, a dostupné kapacity napájení.

Switch správně udává využití napájení 0 mW, ale jeho maximální dostupné je uvedeno v hexadecimální podobě na ff ff ff ff, což po převodu dekadické soustavy vychází hodnotu přes 4 MW. Takovou kapacitu switch samozřejmě nemá, protože jeho udávaný maximální výkon pro napájení výrobce udává do 370 W.

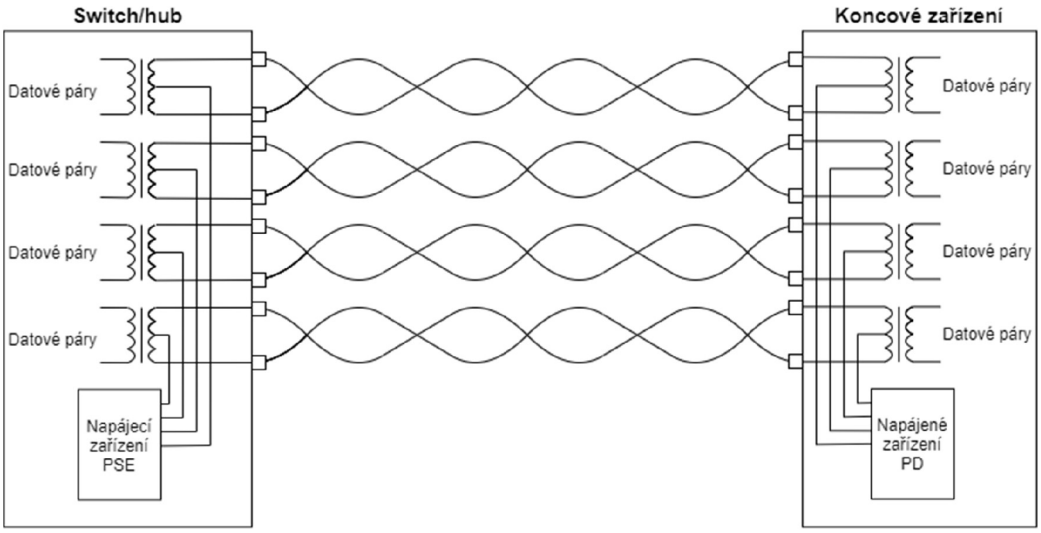
```
00c0  6f 72 74 0a 43 6f 70 79  72 69 67 68 74 20 28 63   ort·Copy right (c
00d0  29 20 31 39 38 36 2d 32  30 31 37 20 62 79 20 43   ) 1986-2 017 by C
00e0  69 73 63 6f 20 53 79 73  74 65 6d 73 2c 20 49 6e   isco Sys tems, In
00f0  63 2e 0a 43 6f 6d 70 69  6c 65 64 20 54 68 75 20   c.·Compi led Thu
0100  32 38 2d 53 65 70 2d 31  37 20 30 32 3a 30 34 20   28-Sep-1 7 02:04
0110  62 79 20 70 72 6f 64 5f  72 65 6c 5f 74 65 61 6d   by prod_ rel_team
0120  00 06 00 18 63 69 73 63  6f 20 57 53 2d 43 33 35   ····cisc o WS-C35
0130  36 30 47 2d 34 38 50 53  00 02 00 08 00 00 00 00   60G-48PS ........
0140  00 03 00 16 47 69 67 61  62 69 74 45 74 68 65 72   ····Giga bitEther
0150  6e 65 74 30 2f 32 00 04  00 08 00 00 00 28 00 08   net0/2·· ·····(··
0160  00 24 00 00 0c 01 12 00  00 00 00 ff ff ff ff 01   ·$····· ........
0170  02 30 ff 00 00 00 00 00  00 00 16 46 89 2b 80 ff   ·0····· ···F·+··
0180  00 00 00 09 00 04 00 0a  00 06 00 01 00 0b 00 05   ........ ........
0190  01 00 12 00 05 00 00 13  00 05 00 00 16 00 08 00   ........ ........
01a0  00 00 00 00 1a 00 10 00  00 00 01 00 00 00 00 ff   ........ ........
01b0  ff ff ff                                           ···
```

Obr. 1.9: Úryvek zachyceného CDP rámce

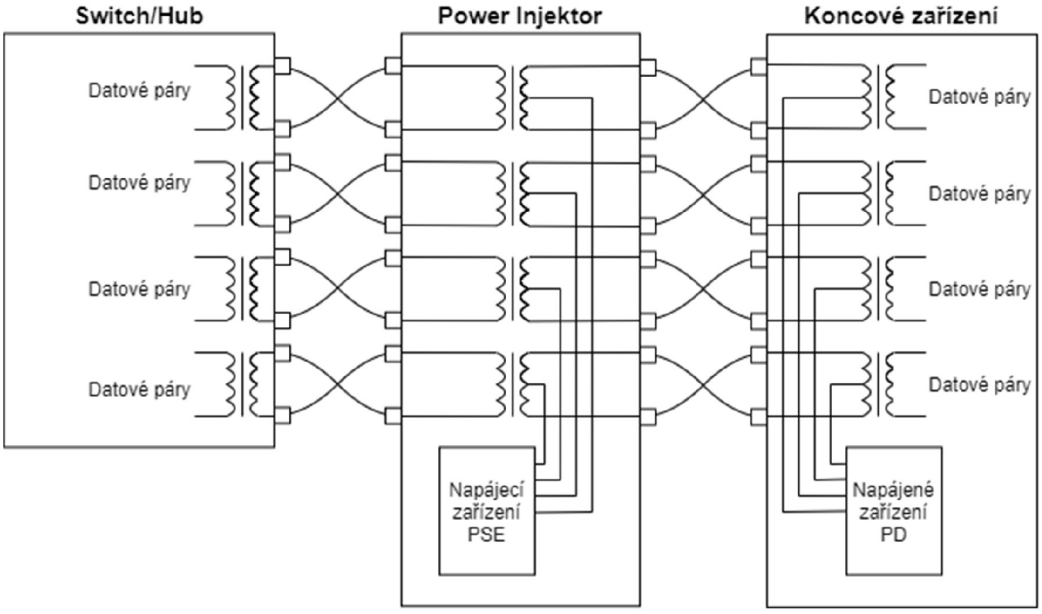
1.1.6 Zapojení párů pro 802.3at a 802.3bt

Stejně jako v případě 802.3af je možnost využití alternativ A i B pro připojení PoE typu 2 a 3, ale je možnost využít zapojení PSE ve zdroji informací (Endpoint, obr. 1.10) i v náhodném místě na kabeláži (Midspan, obr. 1.11). Přidává se také oddělení transformátorem na všech párech, které umožnují využít plného potenciálu UTP kabelu.

Velkou změnou je 4 párový režim, který umožnuje napájení i přenos dat na všech párech. Tento režim je nutný pro funkčnost PoE typu 4. [3]



Obr. 1.10: 1000/2.5G/5G/10GBASE-T 4 párový režim Endpoint [3]

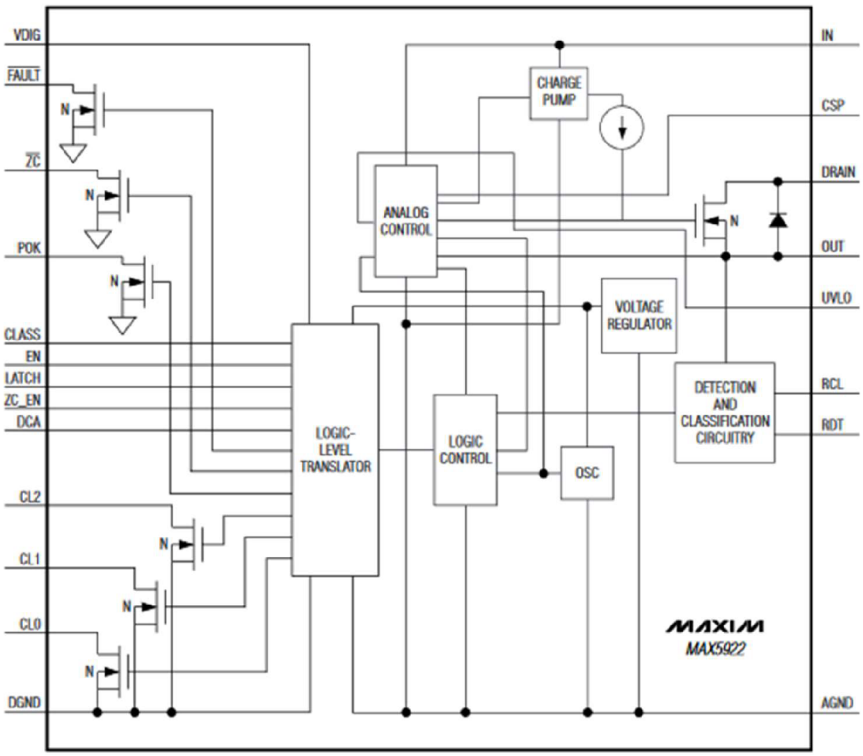


Obr. 1.11: 1000/2.5G/5G/10GBASE-T 4 párový režim Midspan [3]

1.2 MAX 5922 – PSE pro 802.3af

Jedná se jednoportový napájecí kontrolér s integrovaným mosfetem, který vyhovuje standardu IEEE 802.3af. Mezi jeho klíčové vlastnosti patří:

- +32 V až +60 V vstupní provozní napětí
- 0,45 Ω integrovaný napájení přepínač
- PD detekce a klasifikace
- nastavitelný proudový limit
- detekce nulového proudu
- vstupní logické signály kompatibilní s 1,8 V až 5 V CMOS logikou
- oddělené analogové a digitální uzemnění až do ±4 V offset
- ochrana proti přehřátí a překročení maximálního proudu s výstupem pro indikaci stavu
- automatické restart v případě poruchy



Obr. 1.12: Blokové schéma integrovaného obvodu MAX 5922 [6]

PD detekuje PoE kompatibilní zařízení tak, že by po připojení k PSE mělo vykazovat charakteristický odpor 25 kΩ. Cílový odpor se změří pomocí odeslání napětí +4 V na výstup OUT. Ze změřeného proudu vezme vzorek tDET (88 ms), který si uloží do paměti. Následně změní napětí sondy na +8 V a opět změří vzorek proudu. Z rozdílu těchto napětí a proudu se vypočítá odpor PD.

V případě, že vypočítaný odpor PD je v rozmezí 19 kΩ až 26,5 kΩ, logický obvod bude dále postupovat.

Neurčitý stav může nastat v případě, že odpor PD se pohybuje mezi 15 kΩ až 19 kΩ nebo 26.5 kΩ až 33 kΩ, nemusí správně vyhodnotit PD. V tomto případě bude dále posílat napětí ze sondy na výstup a zařadí jej do úrovně napájení CL0.

V případě, že se hodnoty budou pohybovat mimo výše zmíněná rozmezí, odmítne všechny požadavky PD.

Referenční hladina pro detekci parametrů PD musí být nastavena připojeným rezistorem o parametrech 18,2 kΩ ±1 %, případně paralelně zapojeným kondenzátorem o kapacitě 680nF k odstranění šumu ze silnoproudých rozvodů.

Interní dioda zapojená v sérii se zdrojem napětí sondy a výstupem OUT k ochraně zařízení, která nejsou IEEE 802.3af/at kompatibilní a k vlastní ochraně proti připojení do zkratu. V režimu zjišťování kompatibility s PD je výstupní limit OUT z výroby nastaven na 1,5mA.

Pro systémy, kde je napájení PD řešeno přes volné páry, je třeba povolit detekci kolizí. Ta je zapnuta v případě, že připojíme vstup DCA na logický výstup VDIG, neboli logickou 1. Pokud v takovém to případě je zjištěna kolize, výstup OUT se na 2,8 s přepne do režim vysoké impedance.

Jak bylo již v kapitole 1.1.2 zmíněno, standard 802.3af napájí zařízení 1 ze 4 úrovní. Právě po úspěšném zjištění kompatibility vzdáleného PD zařízení, přejde obvod do režimu klasifikace, kdy zjistí, jaká úroveň napájení je požadována. K určení úrovně je na výstup OUT vysláno ze sondy napětí 17,5V. Opětovně se změří proud, který obvodem prochází a z něj se vypočítá úroveň napájení CL0, CL1 a CL2. Ke správné funkci je třeba připojit mezi piny RCL a IN odpor o parametrech 150 Ω ±1 %.

Po zjištění kompatibility s 802.3af a zařazení do úrovně se MAX 5922 přepne do režimu napájení PD, při kterém se zapne 0,45 Ω N kanál na integrovaném MOSFETU. [6]

Varianty MAX 5922:

1. MAX5922A
   a. Základní varianta.
2. MAX5922B
   a. V porovnání s první variantou má tento čip detekci kolizí v základě vypnutou.
   b. Oproti první variantě je tento čip vybaven vstupem DET_DIS. Pokud je tento vstup připojen na logickou 1, tak dojde k vypnutí detekce a klasifikace na jednotlivé úrovně, bez ohledu na stav DCA a CLASS vstupu. Naopak při zapojení vstupu DET_DIS na logickou 0 dojde k zapnutí detekce kolizí
3. MAX5922C
   a. V porovnání s první variantou má tento čip detekci kolizí v základě zapnutou.
   b. Viz bod 2.b)

1.3 Porovnání s ostatními PSE čipy pro 802.3af

První zde zmíněný MAX 5922 dosahuje nejlepších parametrů, co se týče odporu přepínače, vstupního napětí, rozmezí provozní teploty a další. Mezi jeho hlavní výhody však můžeme zařadit programovatelný vstupní limit, který bude při překročení signalizován výstupem. Je dostupný ve třech variantách, jejichž rozdíly jsou více popsané v kapitole 1.2. Mezi jeho nevýhody však patří vysoká cena, a nekompaktní provedení integrovaného čipu. Z těchto důvodu se může tento čip označit za ideální pro testování v laboratorních podmínkách díky jeho nastavitelnosti a zpětné vazbě.

Druhým zmíněným čipem je TPS2375 od Texas Instruments. V porovnání s čipem MAX5922 má stejnou kvalitu ochrany proti elektrostatickému výboji, ale značně nižší vstupní napětí a postrádá nastavitelnost proudu. Díky tomu jej však dostaneme v mnohem kompaktnější pouzdře, pouze 8 pinů místo 28 jako v případě MAX5922.

Také cena je zásadně nižší, a to v rozmezí 45 až 60 Kč za jeden kus. Tento čip bych označil za vhodný pro využití v případě, kdy potřebujeme napájet jedno PD standardem 802.3af.

Jiným možným čipem je LTC4258 od Linear Technology. Mezi hlavní rozdíl v porovnání s přechozími čipy je jeho schopnost napájet 4 jednotlivá zařízení místo jediného. Čip může být řízen autonomně, nebo připojením na I^2C sběrnici. Díky tomu ještě znásobuje schopnost řízení, protože na tuto sběrnici se při zapojení typem BUS může řídit až 16 LTC4258, které ve výsledku mohou obsluhovat až 64 nezávislých PD.

Tab. 1.4: Porovnání čipů pro PSE 802.3af [5, 6, 13]

	MAX5922	TPS2375	LTC4258
integrovaný přepínač	0,45 Ω	0,58 Ω	neuvedeno
maximální vstupní napětí	-0.3 V až +76 V	0 až +57 V	0.3 V až -70 V
pracovní napětí	+32 V až +60 V	+30,5 V až +39,3 V	-47 V až -57 V
ochrana proti ESD	15 kV	15 kV	?
proudový limit	programovatelný	450 mA	100 mA
provozní teplota	-40 °C až +85 °C	-40 °C až +85 °C	0 °C až +70 °C
indikace	power-good zero-current přepětí přehřátí	power-good open-drain přehřátí	zpětná vazba stavu pomocí I^2C sběrnice
varianty	MAX5922A MAX5922B MAX5922C	TPS2375PW TPS2376PW TPS2377PW	neuváděno
cena za kus	200 až 240 Kč	45 až 60 Kč	160 až 170 Kč (za 100 kusů)

1.4 LTC4257 – PD pro 802.3af

Jedná se o jednoportový napájecí kontrolér s integrovaným MOSFETem kompatibilním se standardem 802.3af. Mezi jeho klíčové vlastnosti patří:

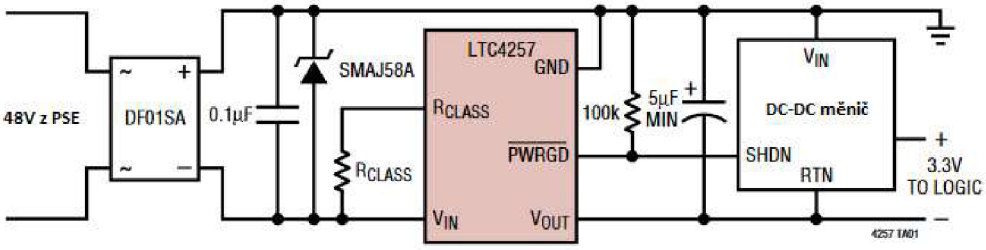
- integrovaný MOSFET s maximální proudem 400 mA
- integrovaný 25 kΩ charakteristický rezistor
- programovatelné úroveň napětí 0 až 3
- detekce nízkého napětí
- chytrá ochrana pro správnou funkčnost v rámci pracovních teplot
- zpětná vazba pro Power Good

Z následujícího obrázku 1.13 můžeme vidět schématické zapojení PD čipu. Schéma je kompatibilní s rychlostmi 10BASE-T a 100BASE-TX. Je uzpůsobenu komunikaci jak po volných párech, kde je správné polarity napájení dosaženo pomocí Graetzova můstku reprezentovaného integrovaným čipem DF01SA.

V případě komunikace přes datové páry je nutné nejdříve stejnosměrnou a střídavou složku oddělit transformátory a opět pomocí Graetzova můstku usměrnit na správnou polaritu.

Po přivedení detekčního napětí z PSE čipu, je detekován integrovaný 25 kΩ odpor, který PSE čipu indikuje kompatibilitu s PoE. Následuje detekce úrovně napájení, kterou je třeba nejdříve nastavit připojením rezistoru na pin R_{class}.

Po správné klasifikaci úrovně napájení zařízení přejde do aktivního režimu a začne vysílat signál Power Good. [4]



Obr. 1.13: Schématické zapojení čipu LTC4257 [4]

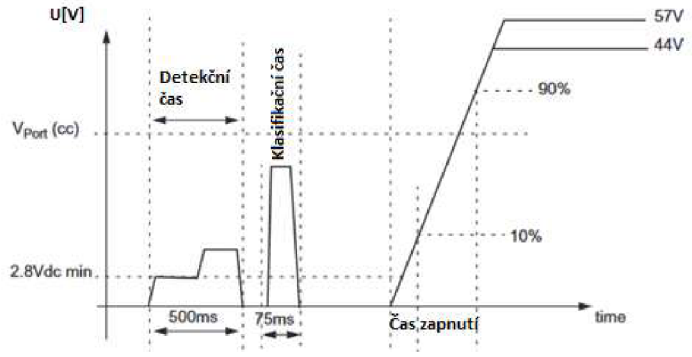
2. ZPRACOVÁNÍ A METODIKA MĚŘENÍ

K přesnému měření napětí, průběhů a jejich zaznamenání použijeme osciloskop Keysight InfiniiVision DSO-X 2004A v kombinaci s napěťovou sondou Agilent N2863A. Pro přibližné měření a určení správné polarizace můžeme využit digitální multimetr PARKSIDE a breadboard pro Arduino.

Program Wireshark běžící na PC bude separátní zachytávat komunikace mezi PSE a PD zařízeními. K zachycení datové komunikace využijeme externí síťové karty Lenovo USB-C to Ethernet Adapter s fyzickou adresou 3C:18:A0:59:A5:F2.

2.1 Měření PSE zařízení

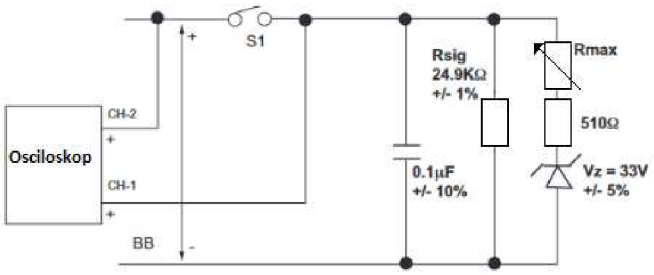
U PSE zařízení nás bude zajímat hlavně průběh napětí při otevřeném obvodu, připojení PD zařízení a následně samotném napájení. Zde můžeme vycházet z cyklu uvedeném v standardu 802.3af.



Obr. 2.1: Detekční cyklus pro standard 802.3af [1]

V první fázi očekáváme detekci s napětím v rozmezí 2,8 V až 10,1 V s maximální délkou 500 ms, pokračujeme klasifikací do napájecí třídy v rozmezí 14,5 V až 20,5 V. Pokud PSE úspěšně detekuje PD, může dojít k začátku napájení zařízení.

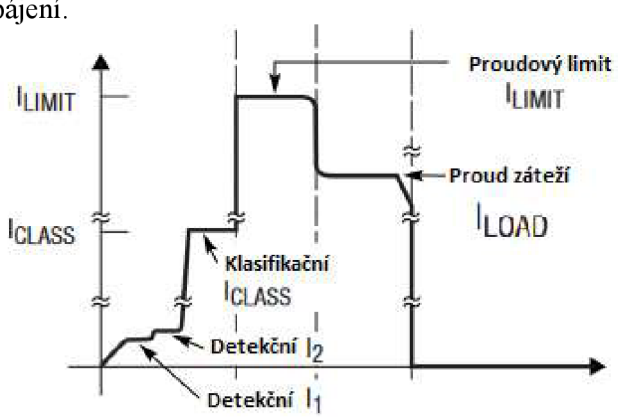
K ověření tohoto průběhu jsme sestrojili testovací desku doporučovanou přímo organizací IEEE (obr. 2.2). V první fázi detekce poteče proud 25,5 kΩ rezistorem (hodnota je rozdílná, ale jak již bylo dříve uvedeno je v rámci rozsahu), tak aby se jevil jako kompatibilní. Následovat bude klasifikace, při které bude PSE opět detekovat pouze 25,5 kΩ rezistor, takže jej zařadí do třídy 0. V následujícím kroku předpokládáme zvednutí napětí v rozmezí 44 V až 57 V, nyní by mělo dojít k průrazu Zenerovy diody. Proud bude následně procházet sérii rezistoru a potenciometru nastaveného tak, aby dosahoval 10 mA. Jeho odpor můžeme však měnit tak, abychom dostali proud v rozmezí 2 až 48 mA. K monitorování datové komunikace využijeme bezprostředního propojení mezi externí síťovou kartou Lenovo a daným PSE zařízením pomocí přímého ethernetového kabelu. V případě přepínačů, u kterých můžeme upravovat konfiguraci a je tomu tak vyžadováno, navíc připojíme přímý ethernetové kabel mezi dedikovanou síťovou kartu Aquantis 5G Ethernet umístěnou na základní desce ASUS s fyzickou adresou 9C:5C:8E:BC:78:B3. [1]



Obr. 2.2: Příklad zapojení pro testování PSE standardu 802.3af [1]

2.1 Měření PD zařízení

Pro změření kompatibility s PoE u PD zařízení můžeme vycházet z hodnoty proudu, kterou získáme pomocí Ohmova zákona přepočtem ze změřené úrovně napětí a známé hodnoty odporu. Takto v první fázi detekce očekáváme hodnoty proudu v rozmezí 0 až 3 mA. V případě klasifikace 0 až 44 mA v závislosti na třídě zařízení a potom samotné napájení zařízení. Zde vyžadujeme minimální odběr 10 mA tak, aby nedošlo k odpojení z napájení.



Obr. 2.3: Časový průběh proudu při detekci a zapnutí PD zařízení [4]

K měření proudu jsme vytvořili další testovací desku, která umožňuje rozpojení jednotlivých vodičů a jejich příslušných párů. Následně pomocí multimetru zjistíme, které páry se aktivně účastní PoE napájení, a omezíme spojení na příslušné vodiče. K měření nám následně posloužil rezistor s hodnotou 5,6 Ω zapojený do série mezi PSE a PD zařízení. Dle vypočteného proudu můžeme PD zařízení zařadit do 1 z 5 tříd napájení z níže uvedené tabulky

Tab. 2.1: Třídy napájení v rozsahu PD zařízení použité k vypracování bakalářské práce[2]

Třída napájení	dostupný výkon PD	klasifikační proud
CL0	12,95 W	0 až 5 mA
CL1	3,84 W	8 až 13 mA
CL2	6,49 W	16 až 21 mA
CL3	12,95 W	25 až 31 mA
CL4	25,50 W	35 až 45 mA

K zachycení datové komunikace bylo opět využito externí síťové karty Lenovo. Zde oproti PSE ale máme 3 možnosti jak napájet zařízení. První možností je využití dedikovaného zdroje pokud takový máme k dispozici.

Druhou možností je využití Midspan PSE zařízení, které nebude ovlivňovat datovou komunikaci, což si můžeme vyzkoušet. Nejdříve připojíme dedikovaný zdroj, který máme k dispozici, do PD zařízení a monitorujeme komunikaci. Pokračovat budeme odpojením dedikovaného zdroje a umístěním Midspan PSE mezi síťový adaptér Lenovo a použité PD zařízení. V případě že se nám po odchycení rámců se nám na lince neobjeví žádná další komunikace, můžeme takto pokračovat v měření.

Třetí možností je monitorování komunikace pomocí zrcadlení portu na přepínači, pokud takový máme k dispozici a touto funkcí disponuje. K tomu připojíme dedikovanou kartu Aquantis a přes toto připojení nakonfiguruje přepínač tak, aby zrcadlil komunikaci z portu, na který připojíme PD zařízení směrem k našemu externímu adaptéru Lenovo. Zde je po nastavení zrcadlení opět vhodné ověřit, že se nám na adaptér Lenovo bude dostávat pouze komunikace mezi přepínače a PD. Případně můžeme nastavit v programu Wireshark na filtrování komunikace na pro nás zajímavé MAC adresy. Také bude záležet na výrobci přepínače a jeho verzi OS/firmware. Proto si při jeho změně opět zkontrolujeme komunikaci.

3. PSE ZAŘÍZENÍ

3.1 Cisco Catalyst 3560G 48 Port Gigabit POE Switch

Přepínač Cisco Catalyst 3560G je starším zařízením, jemuž vypršela podpora od výrobce v roce 2021. I přes jeho stáří však stále může nabídnout velké množství portů s maximální přenosovou kapacitou 32 Gbit/s a možností napájet až 24 PD zařízení při dodávání maximálního výkonu 15,4 W na port. [7]

3.1.1 Vlastnosti

- Kódové značení výrobce: WS-C3560G-48PS-S
- Rok vydání: 2004
- Verze OS: 15.0.2-SE11
- Kompatibilita PoE: 802.3af

3.1.2 Komentář

Vzhledem k hmotnosti přepínače bylo provedeno měření nejdříve v domácích podmínkách pomocí PD zařízení Rasberry PI 4B s PoE+ HAT, IP telefonu YEALINK SIP-T23G a počítače se spuštěným programem Wireshark.

I přes nižší verzi PoE je přepínač schopen napájen Rasberry PI se základními USB periferiemi. Problém a nestabilita by mohla nastat při připojení více periférii, výkonnějších a náročnějších SSD, případně dalších zařízení pomocí GPIO.

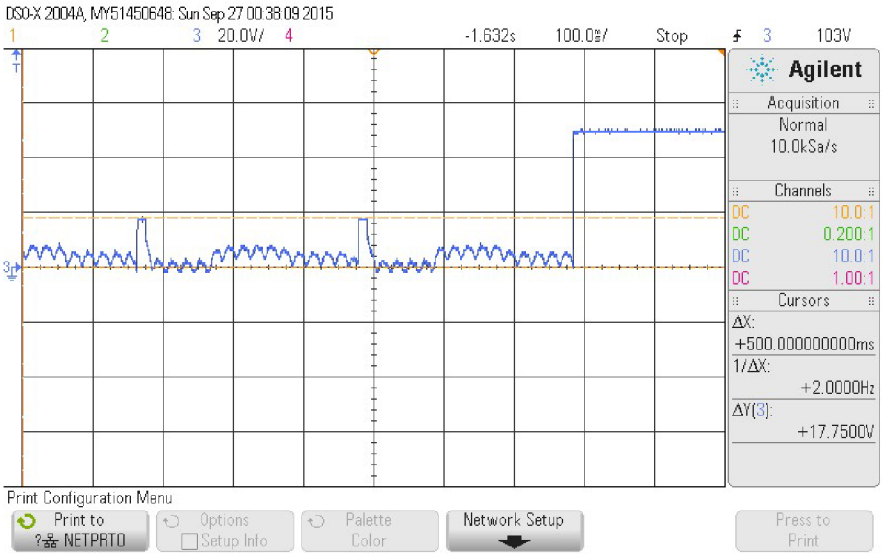
IP telefon YEALINK pracoval bez problému vzhledem ke vzájemné kompatibilitě standardů.

Testování pomoci programu Wireshark přineslo pozitivní výsledky, protože i když je přepínač kompatibilní pouze se standardem 802.3af, který nezahrnuje vyšší logickou komunikaci pomocí protokolu LLDP, tak byly zachyceny zprávy proprietárního protokolu Cisco CDP, jak je vidět na obrázku 3.3, které již obsahují velice základní informace o samotném zařízení a jeho PoE schopnostech.

Následně jsme zařízení změřili i pomocí osciloskopu a zaznamenali průběh napětí na obrázku 3.1. Detekční napětí zde bylo značně kolísavé. Pohybuje v rozmezí 0 až 7 V, případně 5 až 10 V. Klasifikační napětí je stabilních 17,75 V s délkou pulzu 25 ms, což je vyhovující standardu, který požaduje čas do 75 ms. Následně dojde k přepnutí na napájecí napětí 50 V.

Připojená zařízení a jejich potřeby napájení je následně možné sledovat pomocí vzdáleného připojení a to pomocí příkazu `show power inline`, jak je vidět z obrázku 3.2. Zde můžeme vidět celkový dostupný výkon, již dedikovaný a zbývající. Následně jsou vypsané jednotlivé porty a jejich detailnější informace. Zde nás může zaujmout port Gi0/9 který má přiřazený výkon pouze 6 W, třídu 2 a zařízení T23. Zařízení se budeme podrobněji zabývat v následujících kapitolách.

3.1.3 Měření



Obr. 3.1: Cisco Catalyst zapnutí napájení

```
Switch#show power inline
Available:370.0(w)  Used:52.2(w)  Remaining:317.8(w)

Interface Admin  Oper       Power   Device              Class Max
                            (Watts)
--------- ------ ----------- ------- ------------------- ----- ----
Gi0/1     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/2     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/3     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/4     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/5     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/6     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/7     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/8     auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/9     auto   on          6.0     T23                 2     15.4
Gi0/10    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/11    auto   on          15.4    Ieee PD             4     15.4
Gi0/12    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/13    auto   on          15.4    Ieee PD             4     15.4
Gi0/14    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/15    auto   on          15.4    MikroTik            0     15.4
Gi0/16    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/17    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/18    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/19    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
Gi0/20    auto   off         0.0     n/a                 n/a   15.4
```

Obr. 3.2: Cisco Catalyst informace ze vzdáleného připojení

```
987 489.678594  Cisco_89:2b:90                CDP/VTP/DTP/PAgP/UDLD        CDP      436 Device ID: Switch  Port ID: GigabitEthernet0/16

> Port ID: GigabitEthernet0/16
> Capabilities
> Protocol Hello: Cluster Management
> VTP Management Domain:
> Native VLAN: 1
> Duplex: Full
> Trust Bitmap: 0x00
> Untrusted port CoS: 0x00
> Management Addresses
v Power Available: 0 mW, 4294967295 mW
    Type: Power Available (0x001a)
    Length: 16
    Request-ID: 0
    Management-ID: 1
    Power Available: 0mW
    Power Available: 4294967295mW

0050  30 2d 49 50 53 45 52 56  49 43 45 53 4b 39 2d 4d   0-IPSERV ICESK9-M
0060  29 2c 20 56 65 72 73 69  6f 6e 20 31 32 2e 32 28   ), Versi on 12.2(
0070  35 35 29 53 45 31 32 2c  20 52 45 4c 45 41 53 45   55)SE12,  RELEASE
0080  20 53 4f 46 54 57 41 52  45 20 28 66 63 32 29 0a    SOFTWAR E (fc2)·
0090  54 65 63 68 6e 69 63 61  6c 20 53 75 70 70 6f 72   Technica l Suppor
00a0  74 3a 20 68 74 74 70 3a  2f 2f 77 77 77 2e 63 69   t: http: //www.ci
00b0  73 63 6f 2e 63 6f 6d 2f  74 65 63 68 73 75 70 70   sco.com/ techsupp
00c0  6f 72 74 0a 43 6f 70 79  72 69 67 68 74 20 28 63   ort·Copy right (c
00d0  29 20 31 39 38 36 2d 32  30 31 37 20 62 79 20 43   ) 1986-2 017 by C
00e0  69 73 63 6f 20 53 79 73  74 65 6d 73 2c 20 49 6e   isco Sys tems, In
00f0  63 2e 0a 43 6f 6d 70 69  6c 65 64 20 54 68 75 20   c.·Compi led Thu
0100  32 38 2d 53 65 70 2d 31  37 20 30 32 3a 30 34 20   28-Sep-1 7 02:04
0110  62 79 20 70 72 6f 64 5f  72 65 6c 5f 74 65 61 6d   by prod_ rel_team
0120  00 06 00 18 63 69 73 63  6f 20 57 53 2d 43 33 35   ····cisc o WS-C35
0130  36 30 47 2d 34 38 50 53  00 02 00 08 00 00 00 00   60G-48PS ········
0140  00 03 00 17 47 69 67 61  62 69 74 45 74 68 65 72   ····Giga bitEther
0150  6e 65 74 30 2f 31 36 00  04 00 08 00 00 00 28 00   net0/16· ·····(·
0160  08 00 24 00 00 0c 01 12  00 00 00 00 ff ff ff ff   ··$····· ········
0170  01 02 21 ff 00 00 00 00  00 00 00 16 46 89 2b 80   ··!····· ····F·+·
0180  ff 00 00 00 09 00 04 00  0a 00 06 00 01 00 0b 00   ····· ····· ·····
0190  05 01 00 12 00 05 00 00  13 00 05 00 00 16 00 08   ····· ····· ·····
01a0  00 00 00 00 00 1a 00 10  00 00 00 01 00 00 00 00   ····· ····· ·····
01b0  ff ff ff ff                                         ····
```

Obr. 3.3: Cisco Catalyst CDP rámec

3.2 Mikrotik Cloud Router Switch 328

Konkrétní přepínač a celkově platforma RouterOS je velice dobře konfigurovatelný jak pomocí protokolu SSH tak i proprietárního programu Winbox. Přepínač nabízí možnost využití 4 10 Gbit/s SFP+ portů a až 24 Gbit/s portů s konektorem RJ-45. Celkově přepínač nabídne až 450 W pro PD zařízení s rozdělením 150 W na každých 8 portů a se špičkovým výkonem 30 W při připojením omezeného množství PD zařízení. [8]

3.2.1 Vlastnosti

- Kódové značení výrobce: CRS328-24P-4S+RM
- Rok vydání: 2020
- Verze OS: 6.46.1
- Kompatibilita PoE: 802.3af/at, pasivní

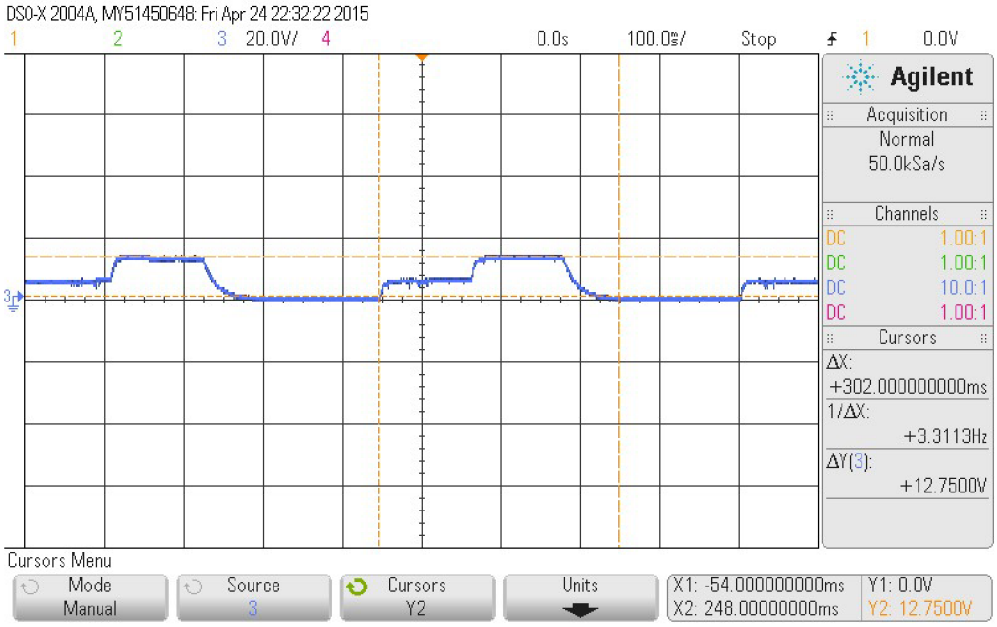
3.2.2 Komentář

Ke konfiguraci přepínače zde bylo využito jednoduššího grafického rozhraní Winbox a nastaveno poe-out: auto-on a poe-voltage: high. V případě nastavení poe-out: force-on se z konkrétního portu stane pasivní PoE. Poe-voltage: high v tomto případě znamená napětí 52 V vyžadované standardem, low je poloviční na 26 V které je vhodnější pro využití při nastavení portu do pasivního režimu. Právě mnohá ze zařízení Mikrotik jsou kompatibilní s PoE pasivním a zvládají napětí pouze do 30 V a 52 V by mohlo vést k jejich nenávratnému poškození.

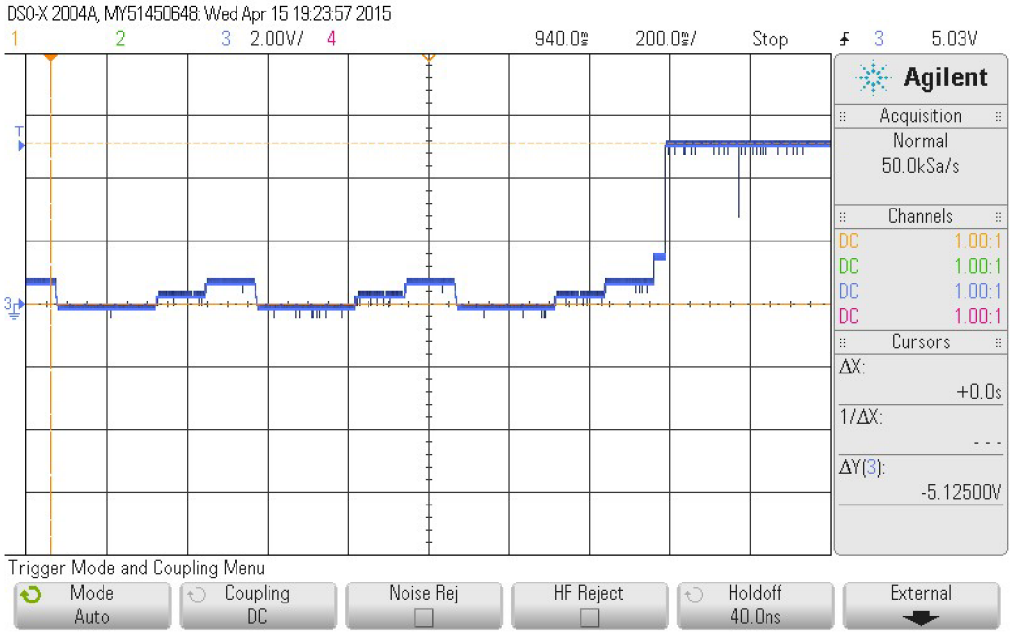
Dle následujícího obrázku 3.4 můžeme vidět periodicky se opakující pulzy na detekci a klasifikaci PD zařízení. Celková délka pulzu je 302ms se 100ms na ustáleném napětí 6,375 V a 12,75 V.

Na následujícím obrázku 3.5 můžeme vidět přechod přepínače do napájecího režimu. V případě nastavení na poe-voltage: low zde ale dochází ke krátkému špičkovému napětí 52 V, což ale i v případě použití zařízení nekompatibilní s aktivním PoE nemá vliv na jejich funkčnost.

Při zachycení komunikace jsme mohli sledovat průběh rámců LLDP, které ale nenesly pro nás žádnou užitečnou informaci.



Obr. 3.4: Mikrotik detekční pulzy



Obr. 3.5: Mikrotik detekce a přechod do napájecího stavu

3.3 Logitech single Power over Ethernet

Zařízení jako takové není samostatně prodejné a je součástí telekonferenčních sad Logitech. Z tohoto důvodu je obtížné najít další informace k tomuto zařízení, ale i tak by mělo splňovat standard 802.3at jak uvádí na svém krytu.

3.3.1 Vlastnosti

- Kódové značení výrobce: POE30R-1AT
- Kompatibilita PoE: 802.3at

3.3.2 Komentář

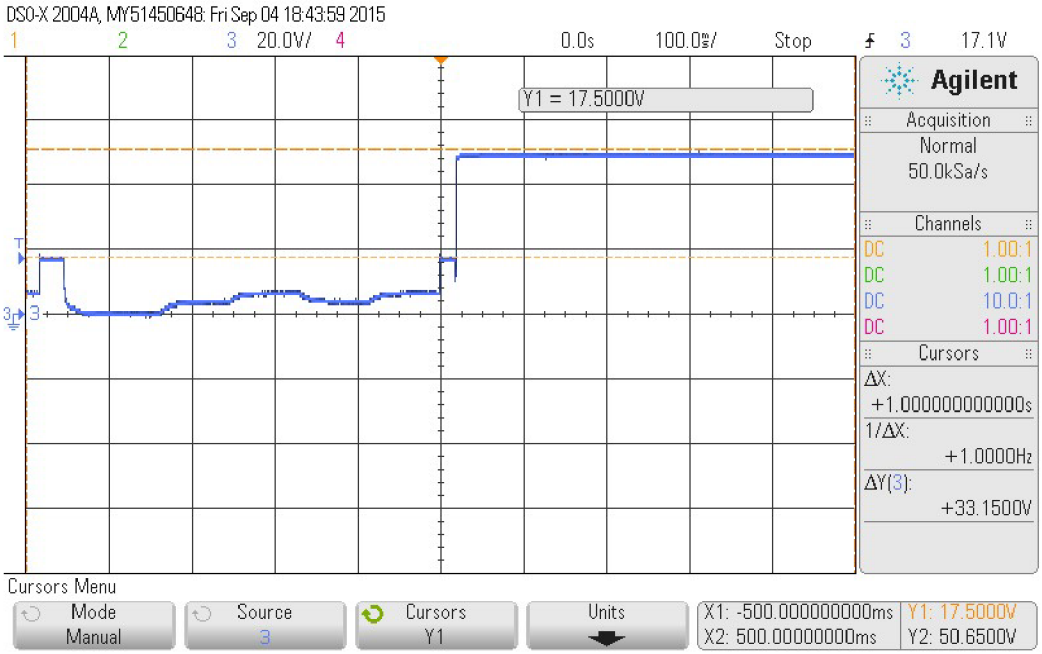
Z průběhu napětí na obrázku 3.6 můžeme vidět odpovídající průběh s hodnotou detekčního napětí 4,25 V, respektive 7 V. První cyklus trvá 179 ms a následující 159 ms, jejich délky vyhovují standardu. Následuje klasifikační pulz s hodnotou napětí 17,5 V a délku 20ms jež opět odpovídá standardu.

Na obrázku 3.7 je také uveden průběh napětí, na nenapájeném páru vodičů. Zařízení jsme takto měřili bez připojeného PD a jak z něj můžeme vidět, tak dochází k indukci střídavého napětí 230 V na datové vodiče. I když jsou tedy špatně odstíněné, tak i přes tuto vadu nedochází k poškození zařízení nebo ochraně zdraví, protože při připojení zátěže napětí klesne na desetinu.

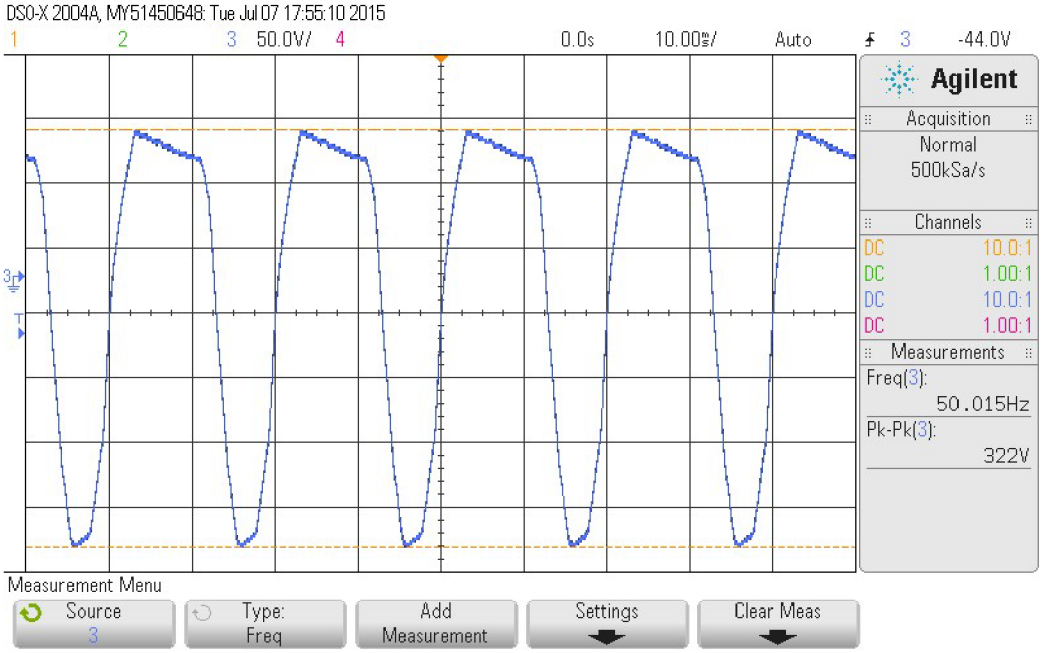
Jelikož se jedná o PoE injektor, neboli Midspan PSE, tak zde nelze očekávat žádnou logiku na úrovni datové komunikace, což jsme si také ověřili připojením k PC a snahou zachycení komunikace programem Wireshark

Vzhledem k váze a vyhovujícím požadavkům bude zařízení následně využito k měření PD v kapitole 6.

3.3.3 Měření



Obr. 3.6: Logitech po zapojení zátěže



Obr. 3.7: Logitech průběh napětí na nenapájeném páru vodičů

4. PD ZAŘÍZENÍ

4.1 Mikrotik cAP lite

Pro zařízení Mikrotik cAP Lite platí stejné možnosti vzdálené správy, jak bylo uvedeno v kapitole 3.2 u Mikrotik přepínače, s rozdílem že se samozřejmě jedná o PD zařízení namísto PSE, takže nelze očekávat konfiguraci výstupního napětí apod. Zařízení pracuje na frekvenci 2,4 Ghz s maximálním vysílacím výkonem 22 dBm. S tím je spojená maximální spotřeba 4 W celého zařízení. Kombinuje kompatibilitu s PoE pasivním a aktivním a to v rozsahu napájecího napětí 10 až 60 V. [9]

4.1.1 Vlastnosti

- Kódové značení výrobce: RBcAPL-2nD-307
- Rok vydání: 2017
- Verze OS: 6.48
- Kompatibilita PoE: pasivní, 802.3af, 802.3at

4.1.2 Komentář

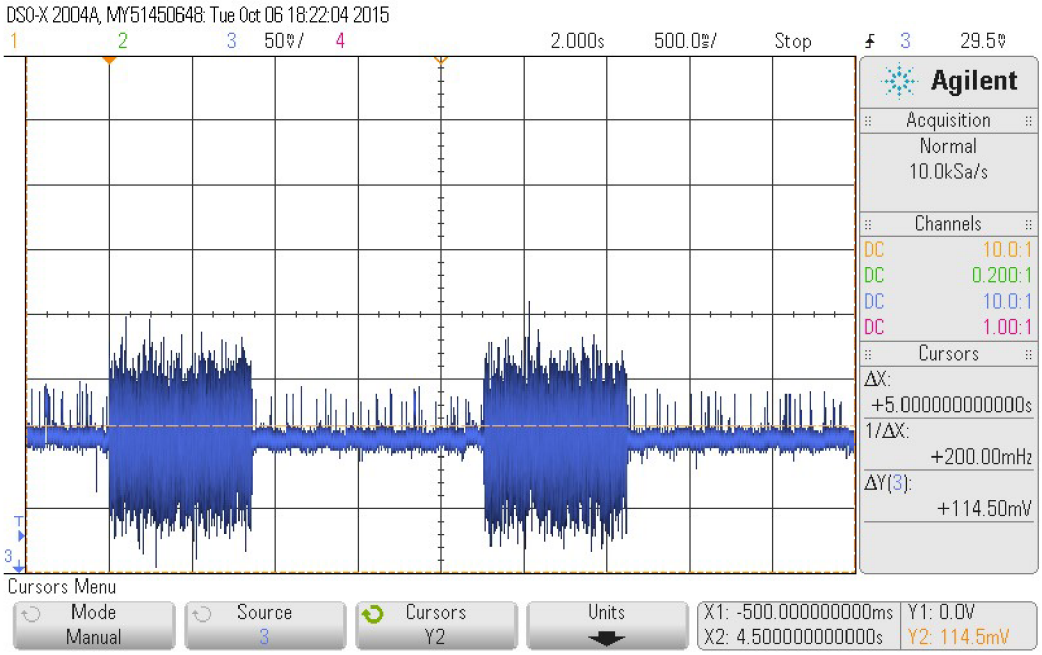
Z prvního obrázku 4.1 není vidět přivedení detekčního napětí a s tím spojený úbytek napětí po průtoku proudu rezistorem, protože při současné zapojení totiž úbytek vycházel v řádech µV. Takovým řádem citlivosti námi použitý osciloskop ale nedisponuje. Tímto faktem se budeme řídit i při dalším měření PD zařízení, protože nelze očekávat významné zvýšení protékajícího proud při klasifikaci při použití stejného PSE od Logitechu. Současně s tím zařízení vynechává implementaci klasifikačního rezistoru, protože jak jsme si uvedli u Logitech injektoru v kapitole 3.3 tak očekáváme klasifikační impulz s délkou 20ms, ale zde jej nevidíme. Můžeme vidět pouze zapnutí zařízení a následné relativní ustálení (obr. 4.2) na hodnotě 114,5 mV přepočtené na proud 20 mA rovnající se spotřebě 1 W. Můžeme také sledovat výkyvy v úbytku napětí. Vzhledem k malé spotřebě zařízení při neaktivitě, byly způsobeny pouhým blikáním LED diod.

Na následujícím obrázku 4.3 můžeme vidět zachycený LLDP rámec, ze kterého můžeme pozorovat propagaci dovedností zařízení a s tím pro nás nejzajímavější položku *Extended Power via MDI-PSE: Capable*, která oznamuje, že se jedná o PD zařízení. Vzhledem k tomu, že nedisponujeme PSE zařízením, které by bylo tyto informace schopno zpracovat, bohužel nemůžeme ověřit jejich využitelnost.

Při připojení k přepínači Cisco Catalyst bylo možno zachytit navíc rámce protokolu CDP (obr. 4.4), které nebylo možné zachytit při připojení na jiné zařízení. Zde již na rozdíl od LLDP rámce nebo přímo CDP rámce na obrázku 4.3 nelze najít žádné informace ohledně PoE možností daného zařízení.

4.1.3 Měření

Obr. 4.1: cAP Lite zapnutí



Obr. 4.2: cAP Lite průběh napětí

```
> Frame 86: 108 bytes on wire (864 bits), 108 bytes captured (864 bits) on interface \Device\NPF_{2CD85A42-C40F-462D-816D-A2C08B1C924E}, id 0
> Ethernet II, Src: Routerbo_53:6b:90 (c4:ad:34:53:6b:90), Dst: LLDP_Multicast (01:80:c2:00:00:0e)
v Link Layer Discovery Protocol
  > Chassis Subtype = MAC address, Id: c4:ad:34:53:6b:90
  > Port Subtype = Interface name, Id: WLAN/ether1
  > Time To Live = 120 sec
  > System Name = CAP3
  > System Description = MikroTik RouterOS 6.48 (stable) RBcAPL-2nD
  > Capabilities
  v Telecommunications Industry Association TR-41 Committee - Media Capabilities
      1111 111. .... .... = TLV Type: Organization Specific (127)
      .... ...0 0000 0111 = TLV Length: 7
      Organization Unique Code: 00:12:bb (Telecommunications In
      Media Subtype: Media Capabilities (0x01)
    v Capabilities: 0x0009
        .... .... .... ...1 = LLDP-MED Capabilities: Capable
        .... .... .... ..0. = Network Policy: Not capable
        .... .... .... .0.. = Location Identification: Not capable
        .... .... .... 1... = Extended Power via MDI-PSE: Capable

0000  01 80 c2 00 00 0e c4 ad  34 53 6b 90 88 cc 02 07   -------- 4Sk-----
0010  04 c4 ad 34 53 6b 90 04  0c 05 57 4c 41 4e 2f 65   ---4Sk-- --WLAN/e
0020  74 68 65 72 31 06 02 00  78 0a 04 43 41 50 33 0c   ther1--- x-CAP3-
0030  2a 4d 69 6b 72 6f 54 69  6b 20 52 6f 75 74 65 72   *MikroTi k Router
0040  4f 53 20 36 2e 34 38 20  28 73 74 61 62 6c 65 29   OS 6.48  (stable)
0050  20 52 42 63 41 50 4c 2d  32 6e 44 0e 04 00 14 00    RBcAPL- 2nD-----
0060  14 fe 07 00 12 bb 01 00  09 04 00 00               -------- ----
```

Obr. 4.3: cAP Lite LLDP rámec

```
165 193.823756  Routerbo_53:6b:90   CDP/VTP/DTP/PAgP/UDLD   CDP   103 Device ID: CAP3  Port ID: WLAN/ether1

> Frame 75: 103 bytes on wire (824 bits), 103 bytes captured (824 bits) on interface \Device\NPF_{8A872690-49D1-4F13-8BD4-F7CB8498D045}, id 0
> IEEE 802.3 Ethernet
> Logical-Link Control
v Cisco Discovery Protocol
    Version: 1
    TTL: 120 seconds
    Checksum: 0x6e2d [correct]
    [Checksum Status: Good]
  > Device ID: CAP3
  > Addresses
  > Port ID: WLAN/ether1
  v Capabilities
      Type: Capabilities (0x0004)
      Length: 8
    > Capabilities: 0x00000001
  > Software Version
  > Platform: MikroTik

0000  01 00 0c cc cc cc c4 ad  34 53 6b 90 00 59 aa aa   -------- 4Sk--Y--
0010  03 00 00 0c 20 00 01 78  6e 2d 00 01 00 08 43 41   ---- --x n-----CA
0020  50 33 00 02 00 11 00 00  00 01 01 01 cc 00 04 0a   P3------ --------
0030  00 00 07 00 03 00 0f 57  4c 41 4e 2f 65 74 68 65   -------W LAN/ethe
0040  72 31 00 04 00 08 00 00  00 01 00 05 00 11 36 2e   r1------ ------6.
0050  34 38 20 28 73 74 61 62  6c 65 29 00 06 00 0c 4d   48 (stab le)----M
0060  69 6b 72 6f 54 69 6b                               ikroTik
```

Obr. 4.4: cAP Lite CDP rámec

4.2 IP telefon SIP Yealink

IP telefon Yealink nabízí konektivitu přes dva Gigabitové porty, 1. s podporou napájení pomocí PoE a 2. určený připojení k počítači pokud bychom nedisponovali dostatečnou síťovou infrastrukturou v místě pracoviště. Celková konfigurace je možná provádět dvěma způsoby, buď přímo na LCD displeji zařízení po zadání administrátorského hesla anebo pohodlnější grafické rozhraní po připojení na IP adresu v prohlížeči PC. V obou případech nás ovšem zaujaly pouze možnost zapnutí nebo vypnutí protokolů LLDP a CDP a jejich interval odesílání jak je uvedeno na obrázku 6.8. [10]

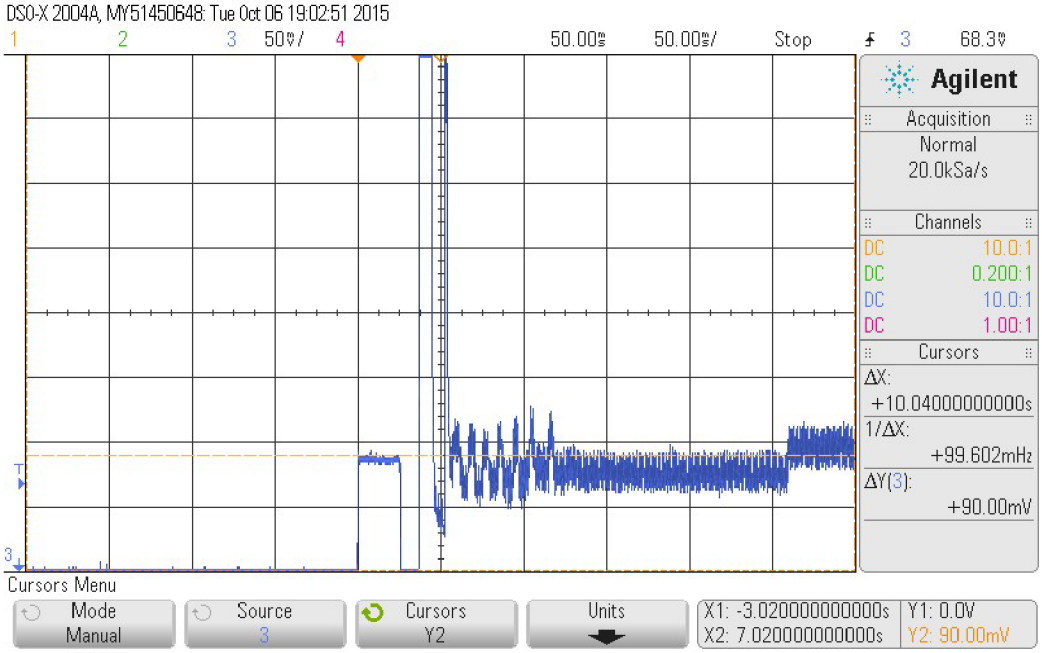
4.2.1 Vlastnosti

- Kódové značení výrobce: SIP-T23G
- Verze OS: 44.82.9.2
- Kompatibilita PoE: 802.3af

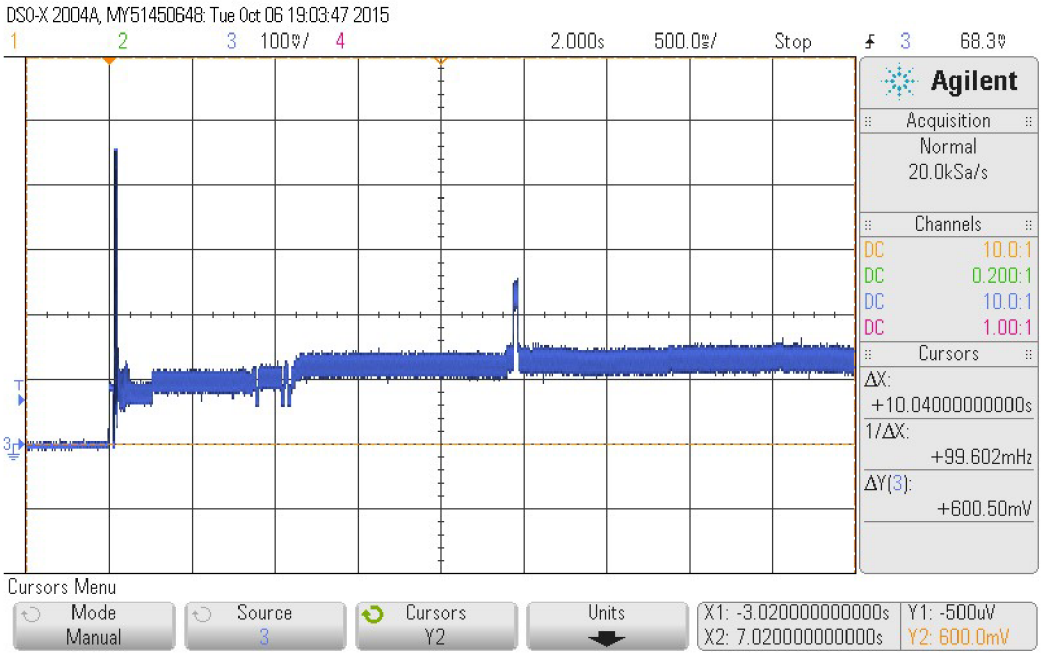
4.2.2 Komentář

Měření pomocí osciloskopu přineslo pozitivní výsledky, jak si můžeme všimnout na obrázku 4.5, protože zde se nám již zobrazuje 25 ms impulz detekčního napětí 90 mV, ze kterého po přepočtení dostaneme hodnotu proudu 16 mA. Díky tomu můžeme zařízení zařadit do třídy 2, jak jsme si jej mohli ověřit po připojení na přepínač Cisco Catalyst v obrázku 3.2. Na obrázku 4.6 můžeme sledovat zapnutí zařízení se špičkovým proudem 80 mA následovaným ustálení úbytku napětí na hodnotě 150 mV a s tím spojený proud 26 mA. Oproti ostatním zařízením zde bylo využité zatím největšího časového měřítka 2 s a to kvůli dlouhé inicializaci systému Linux na kterém telefon pracuje.

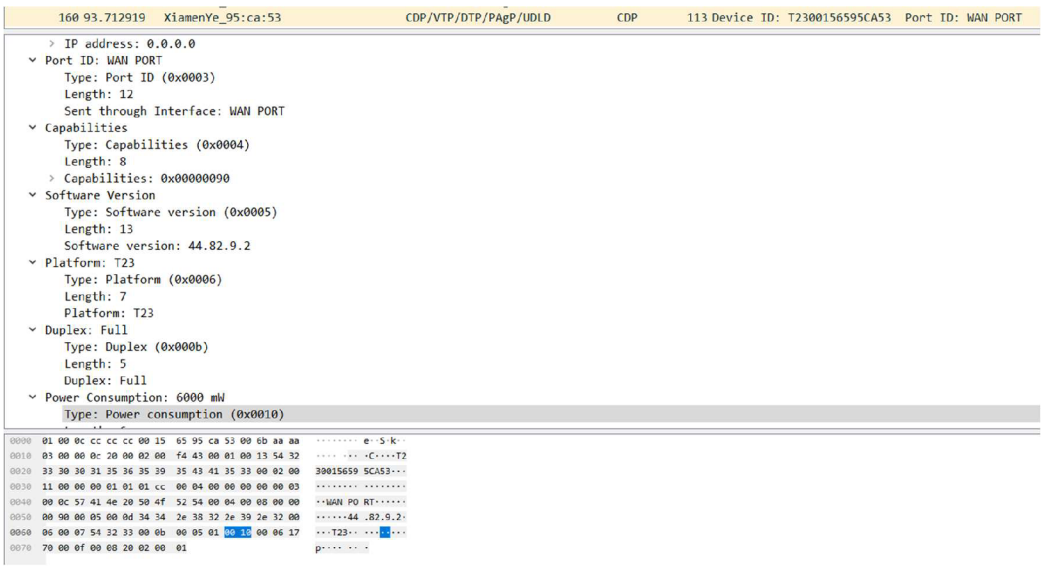
Na následujícím obrázku 4.7 můžeme vidět zachycený CDP rámec a jeho obsahující informace, ale zároveň absenci LLDP protokolu, který je sice povolený a komunikující, ovšem nenese žádné informace ohledně PoE dovedností. Tento stav je avšak vyhovující, protože se stále jedná o zařízení standardu 802.3af který v sobě datovou komunikaci nezahrnuje. Při podrobnějším prozkoumání CDP rámce tak můžeme vidět jméno zařízení a jeho propagovanou maximální spotřebu. Tyto informace jsme již mohli vidět zachycené a použité na výpisu z přepínače Cisco Catalyst z obrázku 3.2.



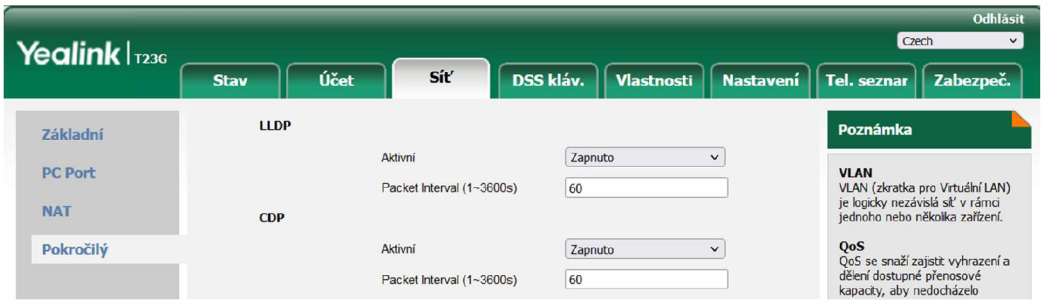
Obr. 4.5: SIP Yealink zapnutí napájení



Obr. 4.6: SIP Yealink stabilizace napětí



Obr. 4.7: SIP Yealink CDP rámec



Obr. 4.8: SIP Yealink webová konfigurace

4.3 Raspberry PI 4B a PoE+ HAT

Rasberry PI je jednoduchý mikropočítač s funkcí mikrokontroleru podobnými, jaké bychom mohli najít na také známé řadě Arduino v lehce větším rozměru, ale s mnohonásobně větším výkonem a s tím související zvýšenou spotřebou. Podobně se pro něj dá zakoupit řada vývojových desek, tzv. HATs. Pro získáni možnosti vzdáleného napájení, jsme zvolili PoE+ HAT. Existuje také základní verze PoE HAT, která je schopna dodávat výkon 12,95 W, ale my jsme zvolili PoE+ HAT ve snaze o zachycení datové komunikace mezi PSE a PD zařízeními. [11]

4.3.1 Vlastnosti

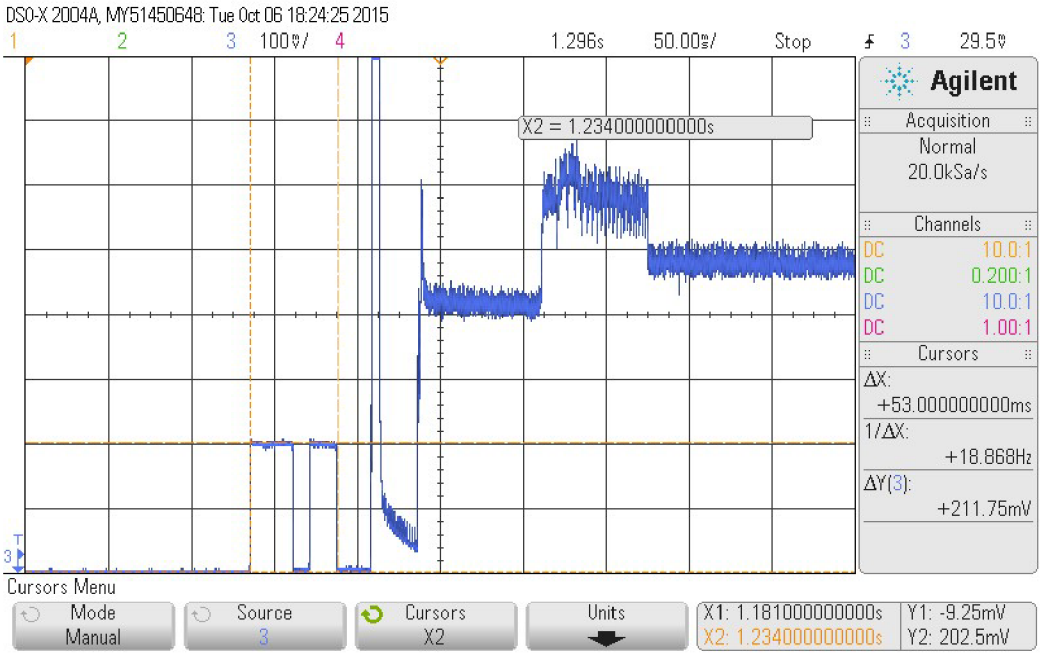
- Rok vydání: 2019(PI 4B)/2021(PoE+ HAT)
- Verze OS/firmware: Raspbian GNU/Linux 10 (buster)/ 71bd3109023a0c8575585ba87cbb374d2eeb038f
- Kompatibilita PoE: 802.3at třída 4

4.3.2 Zhodnocení

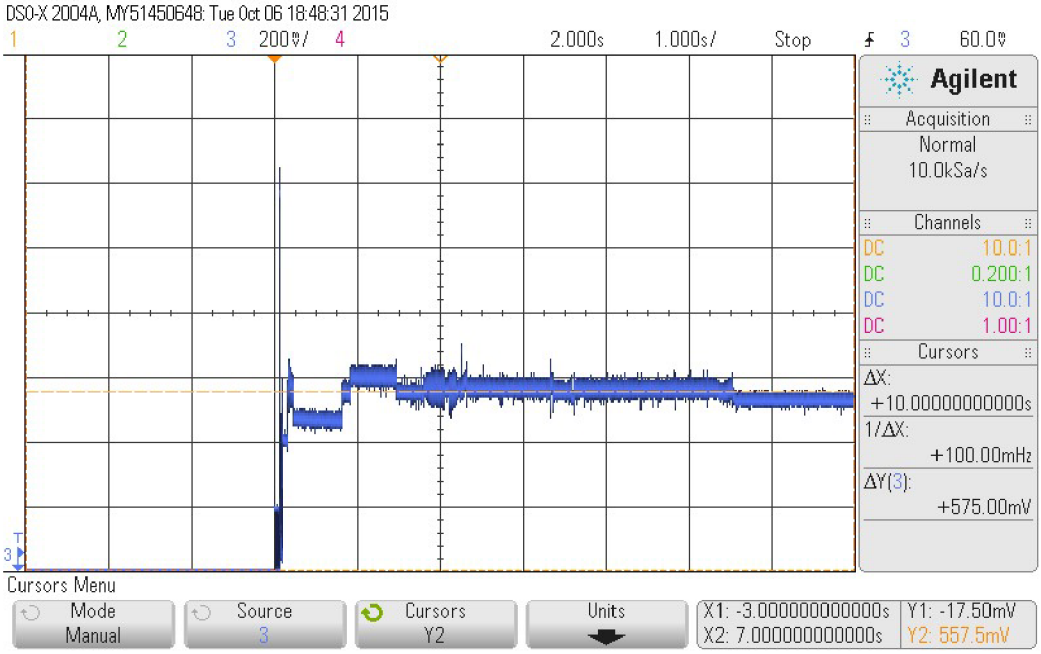
Z obrázku 4.9 můžeme pozorovat průběh napětí a to v podobě 2 klasifikačních pulzů spojených s vyšším standardem 802.3at a následném zapnutí zařízení. V případě klasifikace dosahovala hodnota úbytku napětí 202,5 mV, jež po přepočtu na proud vychází 36 mA. S touto hodnotou můžeme zařízení spolehlivě zařadit do třídy napájení 4, jak jsme si tomu mohli ověřit při připojení na přepínač Cisco Catalyst a výpisu z obrázku 5.2, kdy zařízení bylo připojeno na Gi0/11. Následuje zapnutí a s tím špičkový proud 210 mA a jeho opětovné ustálení na 82 mA.

Naměřené hodnoty můžeme ještě přepočítat na výkon 4,3 W. Při klidovém režimu, použití originálního napájecího zdroje, připojeném monitoru a základních periferií by ale měla klidová spotřeba dosahovat hodnoty pouze 3,5 W. V našem případě, kdy bylo do Raspberry PI připojen pouze PoE+ HAT tak je značně vyšší. Ztracený výkon je poznat značným zahříváním HAT, který je kvůli tomu vybaven ventilátorem o průměrů 25 mm k odvodu tepla produkovaného samotným RPI a PoE+ HAT.

S pomoci programu Wireshark nebylo možno zachytit jakoukoliv komunikaci protokolů CDP či LLDP.



Obr. 4.9: RPI Pi zapnutí napájení



Obr. 4.10: RPI Pi ustálení napětí

4.4 Aruba AP-225

Bezdrátový přístupový bod umožňuje maximální rychlost přenosu 600 Mbit/s na frekvencích 2,4 GHz a až 1300 Mbit/s v pásmu 5 GHz. S maximálním vysílacím výkonem 23 dBm na pásmo může zařízení dosahovat spotřeby až 17 W při napájení přes PoE+ a 15,5 W po použití 12 V DC adaptéru. PD zařízení je také zpětně kompatibilní se standardem 802.3af, kdy zařízení omezí svoji spotřebu na 13,5 W a s tím spojený vysílací výkon. [12]

4.4.1 Vlastnosti

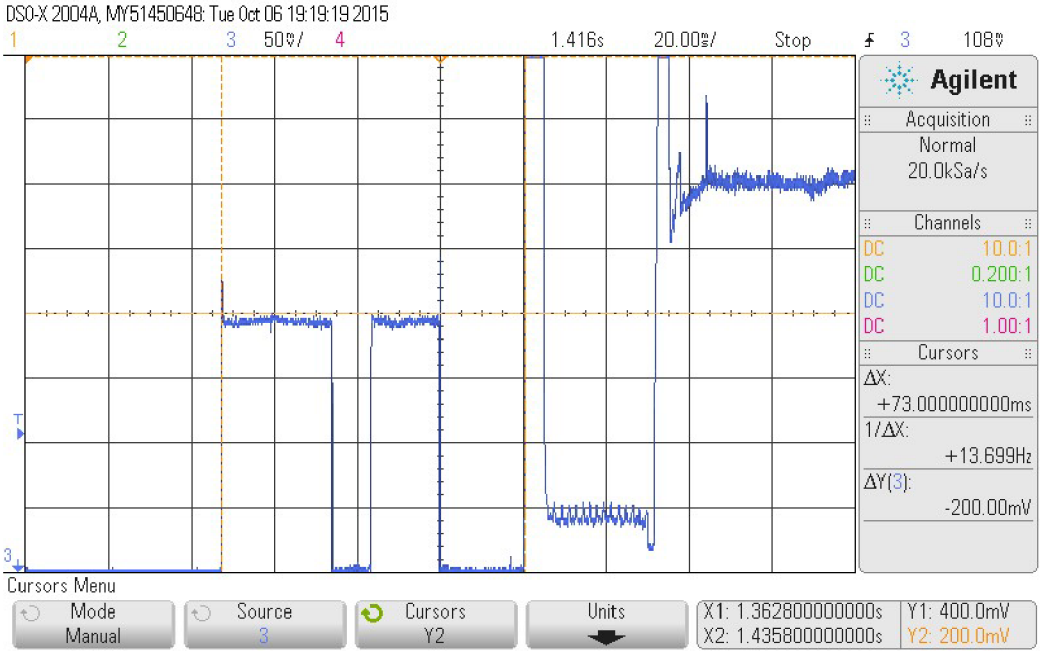
- Kódové značení výrobce: APIN0225
- Verze OS: Aruba Access Points v6.5
- Kompatibilita PoE: 802.3at

4.4.2 Komentář

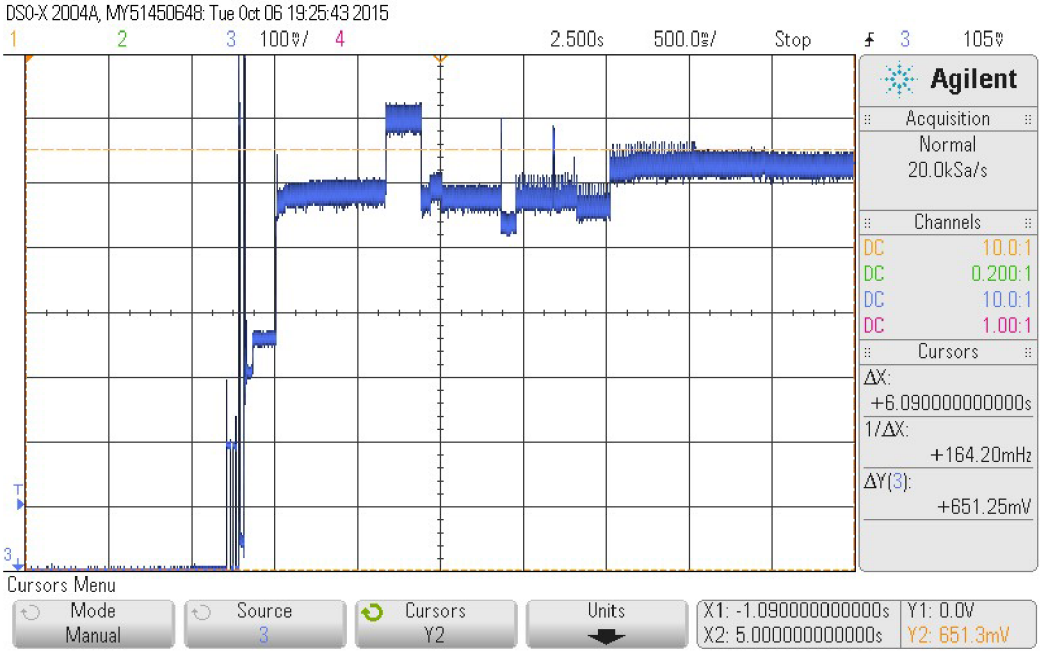
Z měření na obrázku 4.11 můžeme vidět 2 klasifikační pulzy s hodnotou napětí 200 mV a s tím spojený přepočet na 35,7 mA. Z měření můžeme zařízení zařadit do napájecí třídy 4. Tento fakt jsme si mohli ověřit v obrázku 3.2 na portu Gi0/13 přepínače Cisco Catalyst.

Následuje zapnutí zařízení a s tím spojený špičkový proud 200mA, po přepočtu napětí 1,12 V. Následném ustálení na 651 mV, které můžeme vidět na obrázku 4.12, a proudu 116 mA nám vychází spotřeba v klidové režimu 6 W.

4.4.3 Měření



Obr. 4.11: AP-225 zapnutí napájení



Obr. 4.12: AP-225 ustálení napětí

5. ZÁVĚR

V bakalářské práci jsme si nejdříve popsali a porovnali rozdíly mezi pasivním a aktivním PoE. Podrobně jsme probrali nejnižší a nejstarší verzi aktivního PoE 802.3af. Jejich možnost využití byla teoreticky popsaná na více PSE a PD čipech s odlišným výrobcem a způsobem aplikace.

Pokračovali jsme v praktické části bakalářské práce, kterou jsme započali vysvětlením použité metodiky měření. V případě PSE zařízení jsme se zaměřili na dodržování 2 úrovní detekčního napětí v rozsahu 2,8 V až 10,1 V s maximální délkou 500 ms a dalším klasifikačním napětím s rozsahem 14,5 V až 20,5 V a délkou do 75 ms. Z této skupiny jsme měřili 3 zařízení, 2 typu Endpoint PSE: přepínače Cisco Catalyst 3560G a Mikrotik CRS 328 a jedno zařízení type Midspan PSE: injektor napájení Logitech. Při porovnání jejich průběhů napětí určených k detekci PD zařízení jsme mohli pozorovat zásadně rozdílně výsledky. Pro měření se jevil nejvhodnější Mikrotik CRS, kdy při otevřeném obvodu stále odesílal detekční pulzy, kdy ostatní zařízení vyžadovaly připojení zátěže před započtením detekce. Mikrotik s jeho absolutní délkou 302 ms a napětím 6,375 V a 12,75 V ale překračuje mez 10 V určenou standardem. Cisco Catalyst s obdobnou délkou 300 ms maximální napětí 10 V dodržel, ale jeho úroveň byla značně kolísavá a s rozsahem 0 až 7 V, respektive 5 až 10 V. Zde tak klesala minimální hodnota po hranici 2,8 V určenou standardem. Jako jediný standard dodržel injektor od Logitechu s napětím 4,25 V, 7 V a jejich délkou 179 a 159 ms. Toto zařízení jsme následně využili k dalšímu měřen PD. V případě klasifikace všechna zařízení vyhověla standardu. Užitečnou komunikaci jsme ale mohli vidět pouze na přepínači Cisco Catalyst pomocí proprietárního protokolu CDP, který ale není součásti standardu 802.3af, na kterém přepínač pracuje.

Při porovnání měřící metodiky PD s PSE zařízeními jsme se zaměřili právě na odpovědi vůči detekčnímu a klasifikačnímu napětí. Vzhledem k použité metodice měření a měřících přístrojů, jsme ale nebyli schopni dosáhnout požadované přesnosti tak, abychom mohli efektivně měřit úbytek napětí na rezistoru po přivedení detekčního napětí. Dalším krokem byla právě odpověď na vyšší klasifikační napětí přivedeném na rezistor s hodnotou odporu takovou, aby jeho odpověď zařadila zařízení do požadované třídy napájení. V případě námi 4 zvolených zařízení jsme mohli sledovat pozitivní odpověď u Raspberry Pi 4B, Aruba AP-225 a IP telefonu SIP Yealink. Zklamáním nám zde může být pouze Mikrotik cAP Lite, který jako jediný požadovaný rezistor zcela vynechává a je tak zařazen do třídy napájení CL0. Jakožto jediný ale implementuje funkci datové komunikace ze standardu 802.3at, kdy pomocí LLDP packetu informuje protilehlé zařízení, že je možné ho napájet pomocí PoE. Využitelnost této informace jsme však nemohli ověřit z důvodu postrádání zařízení, které by mohlo nesené informace zpracovat. Zařízením, které se ale aktivně snažilo o komunikaci s jejím reálným využitím, byl IP telefon SIP Yealink. IP telefon pomocí protokolu CDP komunikoval v případě propojení s přepínačem Cisco Catalyst, jenž obsažené informace zaznamenal a správně zobrazoval po vypsání přehledu napájení.

Z bakalářské práce můžeme vyvodit závěr, že požadavky na správnou funkčnost PSE zařízení jsou vyšší oproti PD. PSE by měla dodržovat správné úrovně napětí, délku jednotlivých pulzů a jejich načasování. Zde můžeme označit pouze Logitech injektor, jakožto 1 ze 3 zařízení vyhovující standardu, přičemž žádné s vyšším standardem nezahrnovalo do své funkcionality datovou komunikaci. I přes tyto nedostatky docházelo ke zdánlivě správné funkčnosti PD zařízení. V případě vyšší úrovni odchylky od standardu by mohl dojít k problémů s kompatibilitou.

Oproti tomu k funkci PD napájení stačí připojení rezistoru mezi příslušné páry vodičů. Zařízení se bude takto jevit jako kompatibilní s napájením pomocí datových kabelů, ale nebudeme moct správně zařadit jeho třídu, přiřadit dostatečný dedikovaný výkon a sledovat jeho základní parametry.

LITERATURA

[1] 802.3af-2003 - IEE Standard for Information Technology - elecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements – Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Data Terminal Equipment (DTE) Power Via Media Dependent Interface (MDI) [online]. 17. června 2003. 2003 [cit. 2022-05-27]. ISBN 978-0-7381- 3697-4. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/1213877

[2] 802.3at-2009: IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 3: Data Terminal Equipment (DTE) Power via the Media Dependent Interface (MDI) Enhancements [online]. 2009 [cit. 2022-05-27]. ISBN 978-0-7381-6042-9. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/5306743

[3] 802.3bt - 2018 IEEE StandardforEthernetAmendment 2:Physical Layer and Management Parameters forPower over Ethernet over 4 pairs [online]. 1-316,. 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997USA, 2018 [cit. 2022-05-27]. ISBN 978-1-5044-4827-7. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/8329042

[4] LTC4257: Linear Technology: IEEE 802.3af PDPower over EthernetInterface Controller [online]. 1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA, USA, 2003, 2003(4257), 20 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4257fb.pdf

[5] LTC4258: Linear Technology: Quad IEEE 802.3afPower over Ethernet Controllerwith Integrated Detection [online]. 1630 McCarthy Blvd., Milpitas, CA, USA, 2004, 2004(4258), 28 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4258fb.pdf

[6] MAX5922: MAXIM: +48V, Single-Port Network Power Switch For Power-Over-LAN [online]. Gabriel Drive, Sunnyvale, CA, USA, 2003, 2003(19-2708), 21 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX5922.pdf

[7] *Cisco Catalyst 3560 Series Switches Catalogue Datasheet* [online]. USA, 2009 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://ciscodata.com/wp-content/uploads/2018/05/cisco-catalyst-3560-switch-catalogue-datasheet.pdf

[8] *CRS328-24P-4S+RM* [online]. Lotyšsko, 2020 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://mikrotik.com/product/crs328_24p_4s_rm

[9] *CAP lite* [online]. Lotyšsko, 2017 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://mikrotik.com/product/RBcAPL-2nD-307

[10] *Yealink SIP-T23G: Professional IP Phone with 3 Lines & HD Voice* [online]. Čína, 2018 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://www.yealink.com/upfiles/products/201909/1569400260043.pdf

[11] *Raspberry Pi PoE+ HAT* [online]. Spojené království Velké Británie a Severního Irska, 2021 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://datasheets.raspberrypi.com/poe/poe-plus-hat-product-brief.pdf

[12] *ARUBA INSTANT 225/ HP 225 INSTANT ACCESS POINT* [online]. USA, 2015 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://www.arubanetworks.com/assets/ds/DS_IAP225.pdf

[13] IEEE 802.3af PoE POWERED DEVICE CONTROLLERS [online]. Texas, USA, 2004, 28 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2375.pdf?ts=1653661301313&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS2375

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

VUT - Vysoké učení technické v Brně

PoE - Power over Ethernet

PD - Powered Device

PSE - Power Sourcing Equipment

LLDP - Link Layer Discovery Protocol

CDP - Cisco Discovery Protocol