

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

KOMUNIKACE MEZI ŘÍDICÍMI JEDNOTKAMI V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

COMMUNICATION BETWEEN CONTROL UNITS IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Jurek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Dejdar

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Martin Jurek

ID: 211492

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Komunikace mezi řídicími jednotkami v automobilovém průmyslu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je srovnání technologií pro přenos dat mezi řídicími jednotkami hromadných dopravních prostředků a následný návrh a realizace vlastního testovacího přenosového systému. V práci by měl být srovnán přenos dat pomocí metalického vedení, pomocí optického vlákna a bezdrátových technologií, jako jsou Bluetooth, LoRa, ZigBee atd. Tyto technologie budou srovnány z pohledu nákladů, spolehlivosti, maximálního dosahu, velikosti a dalších parametrů ovlivňujících implementaci přenosového systému do řídicích jednotek. V rámci bakalářské práce budou navržené systémy realizovány a podrobeny testům.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika: Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno :Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] OLENEWA, Jorge. Guide to wirelesscommunication, 2016. 4th edition. New York, NY: Cengage. ISBN 978-130-5958-531.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

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

Tématem této bakalářské práce je komunikace mezi řídicími jednotkami dveřních systémů v hromadné dopravě. Nejprve jsou popsány předpisy, které musí komunikační systém splňovat, aby mohl být nasazen v prostředcích hromadné dopravy. Dále jsou navrženy systémy pro komunikaci po optickém vlákně, metalickém vedení a bezdrátově za využití Bluetooth Low Energy. Použité technologie jsou teoreticky popsány a navržené systémy realizovány s využitím vývojové desky Lolin 32 ESP-WROOM-32 a Arduino Uno. Systémy jsou navrženy tak, aby snímaly vstupy od řidiče či cestujících, které jsou následně zobrazeny na displeji. Vytvořené přenosové systémy jsou v práci blíže popsány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Arduino, Bluetooth Low Energy, ESP32, Ethernet, optické vlákno, řídicí jednotky, SFP modul

ABSTRACT

The topic of this bachelor thesis is communication between control units of door systems in public transport. Firstly, the regulations that a communication system must comply with are described to be used in public transport. Furthermore, systems for communication via optical fiber, metallic lines and wirelessly using Bluetooth Low Energy are designed. The technologies used are theoretically described and the designed systems are implemented using the development board Lolin 32 ESP-WROOM-32 and Arduino Uno. The systems are designed to capture inputs from a driver or passengers that are then shown on a display. The created transmission systems are described in more detail in the thesis.

KEYWORDS

Arduino, Bluetooth Low Energy, ESP32, Ethernet, optical fiber, control units, SFP module

JUREK, Martin. *Komunikace mezi řídicími jednotkami v automobilovém průmyslu*. Brno, 2021, 51 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Petr Dejdar

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Komunikace mezi řídicími jednotkami v automobilovém průmyslu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Dejdarovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	10
1 Řídicí jednotky	11
2 Předpisy upravující používání přenosových technologií v hromadné dopravě	12
2.1 EHK 107	12
2.2 EHK 10	12
3 Technologie	14
3.1 Optické vlákno	14
3.1.1 Základní vlastnosti světla	14
3.1.2 Komunikace po optickém vlákně	15
3.1.3 Optický vysílač	15
3.1.4 Přenosové prostředí	16
3.1.5 Optický přijímač	18
3.1.6 SFP modul	18
3.1.7 Média konvertor	19
3.2 Metalické vedení	19
3.2.1 CAN-Bus	19
3.2.2 Ethernet	19
3.3 Bluetooth Low Energy	20
3.3.1 Bluetooth	20
3.3.2 Základní poznatky	21
3.3.3 Fyzická vrstva	21
3.3.4 Linková vrstva	22
3.3.5 Host Controller Interface (HCI)	24
3.3.6 Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)	24
3.3.7 Attribute Protocol (ATT)	24
3.3.8 Security Manager (SMP)	25
3.3.9 Generic Attribute Profile (GATT)	25
4 Srovnání přenosových technologií	26
4.1 Náklady	26
4.2 Spolehlivost	27
4.3 Dosah	27
4.4 Velikost	27
4.5 Složitost implementace	28

4.6	Řešení poruch	28
4.7	Zhodnocení	28
5	Návrh zapojení	29
5.1	Komunikace po optickém vlákně	30
5.2	Popis zapojení	31
5.2.1	Připojení SFP modulu na ESP-WROOM-32	31
5.2.2	Připojení Ethernet shieldu W5100 R3 na ESP-WROOM-32	32
5.2.3	Připojení SFP modulu na Ethernet shieldu W5100 R3	32
5.2.4	Tlačítka a OLED displej	32
5.3	Ethernet komunikace	33
5.4	Bezdrátová komunikace	34
6	Přenos dat prostřednictvím optického vlákna	35
6.1	SFP modul připojený k ESP-WROOM-32	35
6.2	Média konvertor připojený k ESP-WROOM-32	35
6.3	Média konvertor připojený k Arduino Uno	35
7	Přenos dat technologií Ethernet	37
7.1	Zdrojový kód UDP komunikace	37
7.1.1	Vysílač	37
7.1.2	Přijímač	38
7.2	Zapojení a přenesená data	38
8	Přenos dat prostřednictvím BLE	40
8.1	Programové řešení	40
8.1.1	Zařízení server	40
8.1.2	Zařízení klient	42
8.2	Funkce posílání dat	44
	Závěr	45
	Literatura	47
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	49
A	Přílohy práce	51

Seznam obrázků

2.1	EHK 10	13
3.1	Optika zapojení	15
3.2	Schéma konstrukce optického kabelu	16
3.3	Útlumová charakteristika optického vlákna	17
3.4	Schéma zapojení optika	18
3.5	Scháma BLE protokolu	22
3.6	BLE Pasivní skenování	23
3.7	BLE Aktivní skenování	24
5.1	ESP-WROOM-32	29
5.2	Návrh optické komunikace	30
5.3	Návrh Ethernet komunikace	33
5.4	Návrh BLE komunikace	34
7.1	Zapojení Ethernet komunikace	39
7.2	Přijatá data – Ethernet	39
8.1	Zapojení BLE komunikace	44

Seznam tabulek

4.1	Náklady na přenosová média.	26
5.1	Přehled parametrů LoLin 32 ESP-WROOM-32 [19][20].	29
5.2	Tabulka zapojení – LoLin 32 ESP-WROOM-32 a SFP modul	31
5.3	Tabulka zapojení – LoLin 32 ESP-WROOM-32 a Ethernet shield W5100 R3	32
5.4	Tabulka zapojení – SFP modul a Ethernet shield W5100 R3	32

Úvod

Bakalářská práce pojednává o přenosu dat mezi řídicími jednotkami hromadných dopravních prostředků. Přesněji komunikací mezi řídicí jednotkou zpracovávající vstupy zadané řidičem a jednotkou starající se o ovládání dveřního systému daného dopravního prostředku. V minulosti se na ovládání dveří v autobusech používal mechanismus ovládaný stlačeným vzduchem. Z důvodu pozvolného nástupu elektrických dopravních prostředků a upouštění od používání pneumatických zařízení se začínají používat elektrické dveřní motory. Ty mají kolem sebe další množství systémů, jako například zvukovou a světelnou signalizaci zavírání dveří, které je třeba řídit. Téma řídicích jednotek je rozebráno v kapitole 1.

Hlavní motivací k sepsání této práce je vytvoření systému, který bude splňovat potřebné požadavky na kvalitu přenosu informace a bude jej bezpečné použít v hromadné dopravě. Předpisy upravující použití přenosových systémů v hromadné dopravě popisuje kapitola 2. Mezi další nároky patří cenová nenáročnost a snadná implementace.

Současně je stále jeden z nejběžnějších způsobů komunikace po metalickém vedení. To je v mnoha aplikacích nahrazováno vedeními optickými, které jej předčí v rychlosti přenosu dat a zejména možnosti komunikovat na větší vzdálenosti. Jsou ale také aplikace, kde se natažené vedení nemusí hodit, například z důvodu opotřebení kabelové trasy či složitosti implementace. V takových případech je vhodné použití některé z bezdrátových technologií. Jednotlivé přenosové technologie jsou popsány v kapitole 3 a následně porovnány z hlediska nákladů, spolehlivosti, dosahu a dalších parametrů v kapitole 4.

Cílem této práce je navržení a realizace komunikačních kanálů využívající dané technologie. Návrhu jednotlivých technologií se věnuje kapitola 5 a jejich realizace je popsána v kapitolách 6, 7 a 8.

1 Řídicí jednotky

Pod pojmem řídicí jednotka (anglicky Electronic Control Unit - ECU) si můžeme představit mikroprocesor, jehož funkcí je řízení jednotlivých systémů v moderním automobilu či jiném dopravním prostředku. Vyhodnocuje a zpracovává příchozí signály a podle nejrůznějších algoritmů na ně pak reaguje.

Využití řídicích jednotek bylo dříve značně omezené a používaly se pouze na řízení vstříků či zapalování. Do 90. let bylo běžné, že automobil měl pouze jednu řídicí jednotku. To v této době ale není zcela možné, neboť současné dopravní prostředky obsahují velké množství elektroniky a tu je třeba centrálně řídit. Je proto zcela normální, že moderní automobil má klidně i desítky řídicích jednotek (můžeme se také blížit do řádů stovek). Jejich počet roste zejména kvůli používání většího množství komfortní elektroniky, jako například elektrické ovládání oken, sedaček, vyhřívání, komplexní audio systémy a podobně. Bezpečnostní systémy rovněž požadují velké množství výpočetního výkonu, jelikož neustále monitorují data ze senzorů a v případě potřeby na ně musejí reagovat.

Jednotlivé řídicí jednotky se starají o chod komplexních systémů, jako například ESP, ABS, ASR, emisní systémy nebo jako je téma této práce, elektrické ovládání dveřního pohonu.

2 Předpisy upravující používání přenosových technologií v hromadné dopravě

Než budeme moci začít toto téma rozebírat, je třeba se podívat na předpisy a normy upravující používání komunikačních systémů v hromadné dopravě. Hlavní předpisy, které upravují specifikace použitých elektrických a telekomunikačních zařízení v hromadné dopravě, jsou předpisy EHK 107 a EHK 10.

2.1 EHK 107

Jedná se o předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 107 – Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel kategorie M2 nebo M3 z hlediska jejich celkové konstrukce [2018/237] [3] .

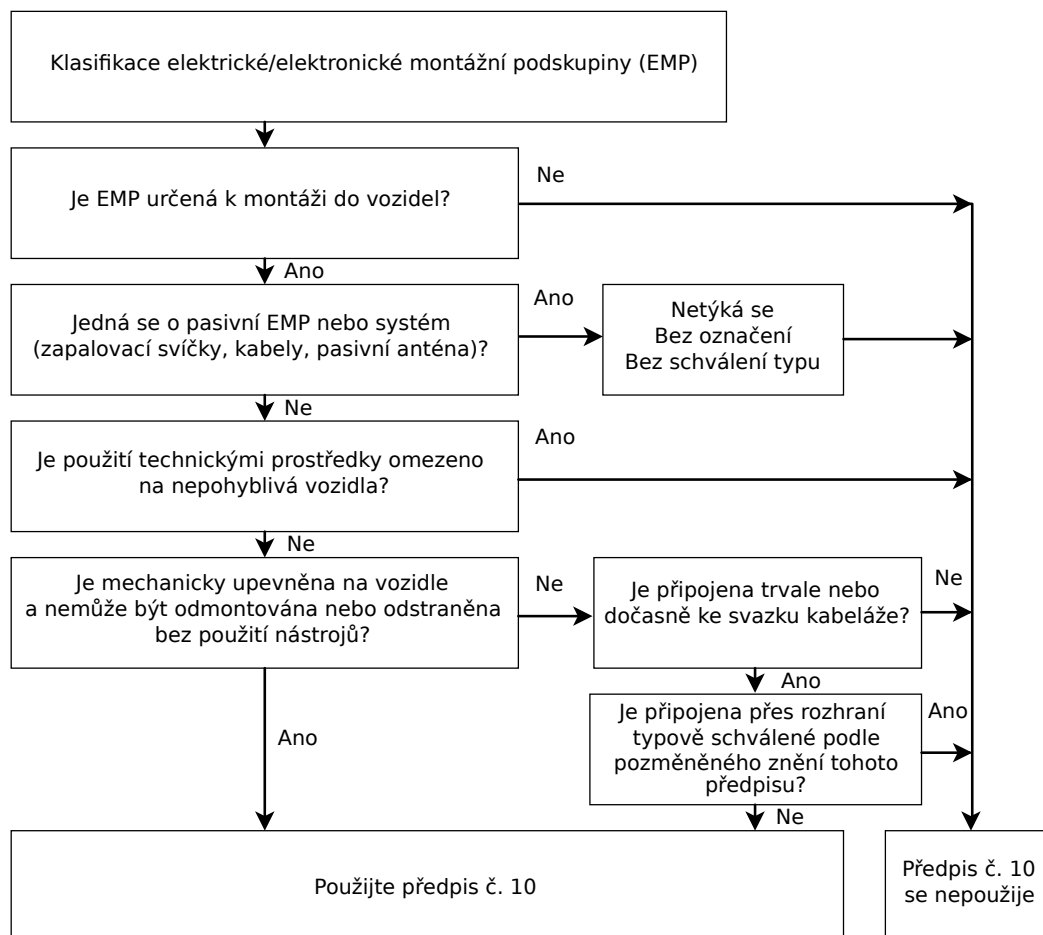
Tento předpis popisuje dovolené parametry pro jednotlivé součásti prostředků hromadné dopravy. Pro nás je důležitá část zabývající se kabeláží (7.5.2. Elektrická zařízení a kabely). Týkat se nás bude předpis 7.5.2.4. *Všechny kabely musí být dobře chráněny a uchyceny bezpečně v takové poloze, aby nemohly být poškozeny přerážnutím, otěrem nebo prodřením* [3].

Jelikož nebudeme používat kabely nesoucí velké množství elektrického proudu, nýbrž optické kabely nesoucí světlo, zbytek předpisů upravující použití kabelů nemusíme brát na zřetel.

2.2 EHK 10

Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN) č. 10 – Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska elektromagnetické kompatibility definuje meze elektromagnetického záření v prostředí hromadné dopravy. Že se tento předpis vztahuje na naši práci můžeme určit z diagramu na obrázku 2.1.

Pro účely této práce je důležitý fakt, že zhotovené řešení nesmí zapříčinit překročení mezních hodnot pro elektromagnetické emise vozidla. Tyto emise jsou stanoveny v kapitole 6.4.2. předpisu [4].



Obr. 2.1: Použitelnost předpisu pro EMP [4].

3 Technologie

Pro komunikaci mezi řídicí jednotkou a elektrickým pohonem dveřního systému můžeme zvolit několik způsobů. Jako první se nabízí komunikace pomocí optického vlákna. Je to v této době vzkvétající technologie, které má velkou propustnost, a tedy by bylo možné tuto technologii použít pro komunikaci většího množství systémů v daném dopravním prostředku.

Další kabelovou technologií, kterou je možno použít, je komunikace po metalickém vedení.

Pokud se ale chceme vyhnout tahání velkého množství kabelů, je vhodné použít bezdrátové technologie. Jako zástupce bezdrátových technologií si představíme Bluetooth Low Energy.

Tyto technologie si teoreticky popíšeme a dále porovnáme.

3.1 Optické vlákno

3.1.1 Základní vlastnosti světla

Komunikace po optickém vlákně využívá jako nosnou složku světlo, neboli elektromagnetické záření. Toto záření se využívá ve vymezených oblastech, a to v nižších kmitočtech ohraničeno mikrovlnným zářením a v oblasti vyšších kmitočtů rentgenovým zářením. Oblast záření sahá od 100 nm do 1 mm a je rozdělena na 7 podoblastí:

- 3 ultrafialové – 100-280 nm; 280 - 315 nm; 315-380 nm,
- světelná oblast – 380-780 nm,
- 3 infračervené – 780 nm-1,4 μm ; 1,4-3 μm ; 3 μm -1 mm.

Důležitým faktorem při komunikaci na optickém vlákně je rychlost světla. Ta je ve vakuu rovna $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato fyzikální konstanta vyjadřuje maximální dosažitelnou rychlost. Pokud se pohybuje světlo v prostředí jiném, než je vakuum, má rychlost nižší:

- vzduch $\approx 225\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,
- sklo $\approx 150\,000 - 200\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Při průchodu světla nehomogenním prostředím mohou nastávat různé jevy, které mohou ovlivnit kvalitu přenášeného signálu.

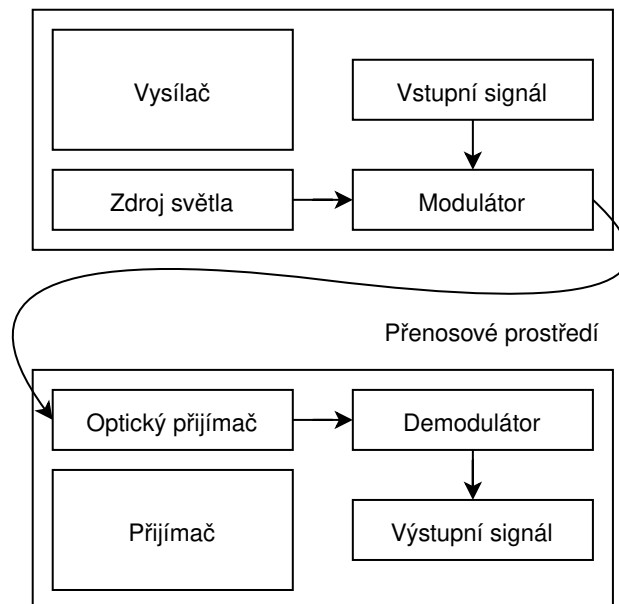
- Absorpce (pohlcení) světla nastává při průchodu světla barevným sklem, kdy projdou jen určité vlnové délky.
- Rozptyl světla nastane na nepravidelném prostředí, jako je matné sklo. To mění směr šíření světla.

- Odraz světla je děj, který se projevuje u lesklých povrchů, jako je například zrcadlo. Světlo jím neprojde, nýbrž se odrazí v závislosti na směru, jakým na něj dopadlo.

3.1.2 Komunikace po optickém vlákně

Optický přenos se uskutečňuje zpravidla pomocí ohebných, nevodivých vláken, vyrobených ze skla či plastu. Přenos není ovlivňován elektromagnetickým rušením.

Optický spoj je tvořen modulovaným zdrojem záření, optickým prostředím a přijímačem záření, viz obr. 3.1. Vysílací a přijímací část obsahuje elektronické obvody pro zpracování signálů. Důvodem je, že vstupní a výstupní signály jsou elektrické. [5], [6]



Obr. 3.1: Zapojení optického spoje [6].

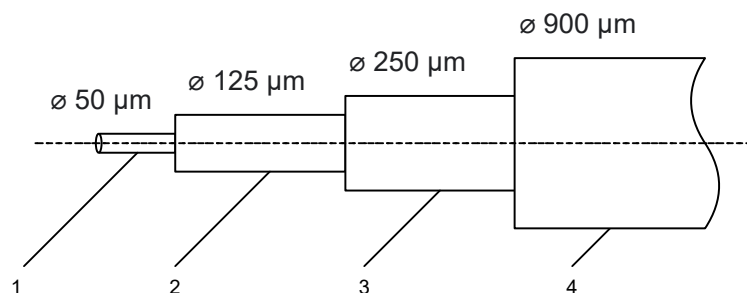
3.1.3 Optický vysílač

Optický vysílač transformuje elektrický signál na optický, čímž se provádí modulace signálu. Druh modulace se poté vybere podle zdroje záření. Nejčastěji se jako optické zdroje používají luminiscenční a laserové diody. Laserové diody nabízí vysoký výkon (desítky mW), vysokou přenosovou rychlost a malou šířku spektra. Kvůli přenosovým vlastnostem optických vláken se zdroje vyrábí pro vlnové délky 870 nm, 1 310 nm a 1 550 nm, které vyplývají z útlumové charakteristiky optického vlákna.

3.1.4 Přenosové prostředí

Optickým prostředím je optické vlákno, popřípadě prostředí umožňující optický přenos, jako je vakuum, atmosféra či kosmický prostor. My se nadále budeme zabývat přenosem po optickém vlákně.

Optický kabel se skládá z jádra, obalu a ochranné vrstvy, viz obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schéma konstrukce optického kabelu: 1 – jádro, 2 – plášť, 3 – primární ochrana, 4 – sekundární ochrana [6].

Přenosové vlastnosti optických vláken jsou závislé na konstrukci a dělíme je na:

- jednovidová (index lomu jádra je konstantní),
- mnohavidová (index lomu jádra je konstantní),
- gradientní (proměnný index lomu jádra).

Vid představuje způsob rozložení elektromagnetického pole v příčném řezu jádra.

Dále je možné dělit optická vlákna podle způsobu komunikace. Ta může být buďto jednosměrná nebo obousměrná [7]. Podle toho dělíme typy optických vláken na:

- simplexní – data mohou téct pouze jedním směrem v daný časový okamžik,
- poloduplexní – data mohou být vysílána a přijímána v obou směrech, ale ne současně,
- duplexní – podporuje plně obousměrný provoz.

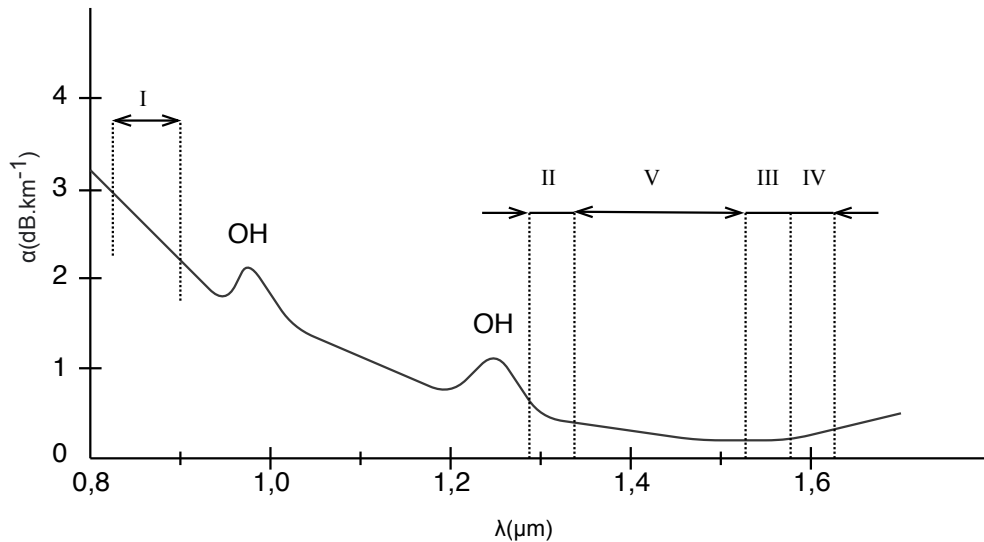
Přenosové vlastnosti optického vlákna ovlivňují také další jevy, které mohou nastat uvnitř vedení.

Útlum optických vláken

Útlum je způsobován absorpcí prostředí, vyzařováním z vlákna či rozptylem na nehomogenitách. Nastává jev, kdy výkon signálu se vzdáleností od zdroje postupně klesá. Je definován jako poměr vstupního a výstupního světelného výkonu, udává se v jednotkách dB/km a představuje měřítko ztrát optické energie ve vlákně.

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (3.1)$$

Útlumovou charakteristiku ovlivňuje také teplota, a to tak, že příliš vysoké či nízké teploty zvyšují hodnotu útlumu.



Obr. 3.3: Útlumová charakteristika optického vlákna [6].

Na obrázku 3.3 můžeme spatřit útlumovou charakteristiku, z níž vyplývají vlnová okna.

- **I. okno** (850 nm) – Mnohavidové šíření, útlumová charakteristika silně klesající.
- **II. okno** (1 280-1 335 nm) – Využíváno pro jednovidový přenos na velké vzdálenosti.
- **III. okno** (1 530-1 565 nm) – Minimální útlum u standardního křemenného vlákna, přenos na velké vzdálenosti.
- **IV. okno** (1 565-1 625 nm) – Nachází se za absolutním minimem útlumu, od III. okna se liší minimálně. Při spojení III. a IV. okna lze u dálkového přenosu téměř zdvojnásobit přenosovou kapacitu.
- **V. okno** (1 335-1 530 nm) – Spojená II. a V. okna vytváří souvislý přenosový kanál o šířce pásma 50 THz.

Disperze

Jedná se o hlavní příčinu zkreslení signálu. Dělí se na 3 hlavní typy, vidová, chromatická a polarizační disperze.

Vidová disperze vzniká kvůli rozdílné délce drah vlákna u mnohavidových vláken. Impulz dorazí na konec vlákna v rozdílných časových okamžicích. Největší vliv má tento jev u dlouhých vláken při komunikaci na velké vzdálenosti.

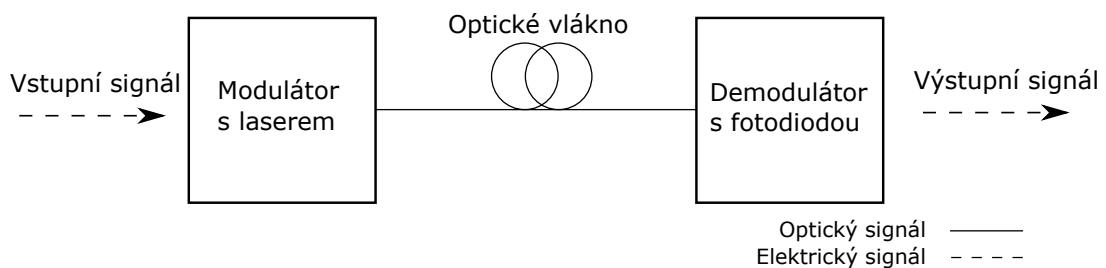
Chromatická disperze vzniká z důvodu, že zdroje záření nejsou monochromatické, nýbrž vydávají záření v určitých spektrech. Složky spekter mají odlišnou rychlost šíření, proto dorazí na konec vedení v různých okamžicích.

Polarizační disperze nastává u jednovidových vláken. Tento jev se projevuje při přenosové rychlosti vyšší než 2,5 Gb/s. Způsobují jej kruhové nesymetrie, které mohly vzniknout při výrobě, montáži či vnějším tlakem.

3.1.5 Optický přijímač

Základní částí optického přijímače je fotodioda. Ta zpracovává přijatý optický signál na elektrický, který putuje do zesilovače. Fotodioda bývá nejčastěji lavinová nebo typu PIN.

Na obrázku 3.4 je znázorněn komunikační kanál skládající se z optického vysílače, přenosového prostředí a optického přijímače.



Obr. 3.4: Schéma zapojení - optika.

3.1.6 SFP modul

Jedná se o modulární vysílač/přijímač, jenž je možné zapojit do SFP portu síťových zařízení, jako server či přepínač. Toto zařízení obstarává dopřednou a zpětnou transformaci elektrického a světelného signálu.

Většina SFP modulů komunikuje přenosovou rychlostí 1 Gbit/s, novější SFP+ moduly dosahují rychlostí až 40 Gbit/s [8].

3.1.7 Média konvertor

Média konvertor [9] je aktivní síťový prvek sloužící k propojení optického kabelu s krouceným párem. Využívají jej zařízení komunikující prostřednictvím Ethernetu.

Komunikace je možná v jedno-režimovém i více-režimovém módu.

Existuje několik typů média konvertorů:

- standardní – bez webového rozhraní, snadná možnost nasazení do provozu,
- spravované – snadná konfigurace pomocí webového rozhraní,
- průmyslové – efektivní konverze dat i v extrémních podmínkách (možné provozovat i venku),
- pasivní – konverze bez nutnosti aktivně napájených prvků.

3.2 Metalické vedení

Metalické vedení [12] představuje jeden z nejběžnějších způsobů přenosu informace. Jsou to vhodně uspořádané soustavy drátových vodičů přenášející stejnosměrné signály i signály s vysokými kmitočty. Kabely metalického vedení jsou vyrobeny z mědi, bronzu, hliníku nebo oceli. Máme dva hlavní druhy uspořádání:

- symetrické vedení – Páry vodičů jsou zakrouceny,
- koaxiální vedení – Dvojice souosých vodičů.

3.2.1 CAN-Bus

Jedná se o sériovou sběrnici, která se používá v automobilovém či leteckém průmyslu, vyvinutá Robertem Boschem. Používá se od roku 1986 a od roku 2008 je CAN-Bus povinným standardem pro přenos dat v automobilovém průmyslu.

Používá se k připojení řídicích jednotek, zařízení a senzorů, zejména alarmů, parkovacích senzorů či tempomatů. Maximální přenosová rychlost této technologie je 1 Mb/s [14].

3.2.2 Ethernet

Ethernet je síťová přenosová technologie zaměřená na přenos dat. Definuje set pravidel umožňující zařízením na stejné síti přijímat a zpracovávat informace. V referenčním modelu ISO/OSI spadá do fyzické a linkové vrstvy, v modelu TCP/IP do vrstvy síťového rozhraní.

Ethernet má dvě hlavní jednotky, pakety a rámce. Rámce obsahují data, MAC adresu, informace o VLAN (Virtuální LAN) a informace o chybě přenosu. Každý rámec je obalen v paketu a obsahuje informace k sestavení spojení a označuje, kde rámec začíná. [11]

Ethernetové kabely

K připojení zařízení komunikující pomocí rozhraní Ethernet se používá ethernetový kabel. Jedná se o zapouzdřený kabel složený z kroucených párů. Na základě různých specifikací se dělí do kategorií „cat“. Další faktory ovlivňující kvalitu ethernetových kabelů je typ stínění. [13]

- **Cat 5**

Jedná se o jeden z nejstarších typů ethernetového kabelu podporující rychlosti 10 a 100 Mb/s. Teoreticky je dosažitelná také rychlost 1 Gb/s, ale jen na krátké vzdálenosti. Podporovaná šířka pásma je 100 MHz. Kromě varianty Cat 5 existuje také vylepšená varianta Cat 5e. Teoreticky je desetkrát rychlejší, tedy podporuje přenosovou rychlost 1 Gb/s a má menší přeslech.

- **Cat 6**

Podporují přenosovou rychlost až 10 Gb/s. Mají větší míru zkrutu, tedy páry jsou pevněji zakroucené. Také existuje vylepšená varianta, Cat 6a. Tyto kabely dokáží pracovat na širší pásma 500 MHz. Podporují rychlost 10 Gb/s na vzdálenost 100 metrů.

- **Cat 7**

Tato varianta má na rozdíl od předchozích stíněné jednotlivé páry. Podporují gigabitové rychlosti na vzdálenost větší, než je 100 metrů na frekvenci až 600 MHz. Cat 7a je navržena pro šířku pásma 1 000 MHz a vysoké rychlosti na krátké vzdálenosti. Přesněji tedy 40 Gb/s na 50 m nebo 100 Gb/s na vzdálenost 15 m.

- **UTP, STP**

STP kabely (Shielded Twisted Pair) oproti UTP kabelům (Unshielded Twisted Pair) nabízejí stínění. To minimalizuje rušení a možnosti přeslechů.

3.3 Bluetooth Low Energy

3.3.1 Bluetooth

Bluetooth je bezdrátový komunikační protokol vyvinut americkou organizací Bluetooth Special Interest Group (SIG). Tento komunikační protokol je pravidelně udržován a aktuálně je ve verzi 5.2. Aktualizace postupně přináší různá zlepšení a nové funkce. Poslední největší novinkou bylo představení Bluetooth Low Energy v rámci specifikace Bluetooth 4.0. V porovnání s klasickým Bluetooth nabízí nízkou energetickou náročnost a další výhody, které budou rozepsány v další podkapitole.

V bezdrátové komunikaci je nejvíce rušivým prvkem interference. Na rozdíl od komunikace pomocí kabelů, bezdrátové technologie navzájem sdílí svůj prostor. Blu-

etooth komunikuje na stejné frekvenci jako Wi-Fi, tedy 2,4 GHz. To může vést k nežádoucímu rušení a ztrátě paketů. Způsob, jak ztrátě informací předejít, je zasílání potvrzovacích zpráv podobně jako je tomu u TCP/IP protokolu. Zařízení, která přijímají data, zasílají zprávy o úspěšném doručení. Tato metoda napomáhá spolehlivosti standardu [15].

3.3.2 Základní poznatky

Bluetooth Low Energy [16] [17] patří do rodiny protokolů Bluetooth. Vyšlo jako součást specifikace Bluetooth 4.0, která byla představena v červnu 2010. Obě technologie jsou popsány v Core Specification, nejsou ale vzájemně přímo kompatibilní.

Hlavním zaměřením tohoto standardu je nízká spotřeba energie, nízká cena, malá šířka pásma, malý vysílací výkon a jednoduchost. Umožňuje komunikaci zařízení na krátkou vzdálenost a je vhodný pro implementaci v různých odvětvích, jako například zdravotnictví, zabezpečení, domácí zábavní systémy, IoT (Internet of Things) a další.

Bluetooth Low Energy má tři základní stavební bloky (Application, Host, Controller), které se skládají z dalších dílčích vrstev viz obrázky 3.5. Application je nejvyšší vrstva, zodpovídá za logiku, uživatelské rozhraní a zpracování dat. Host je zařízení využívající komunikaci a Controller představuje samotné řešení skládající se z fyzické a linkové vrstvy.

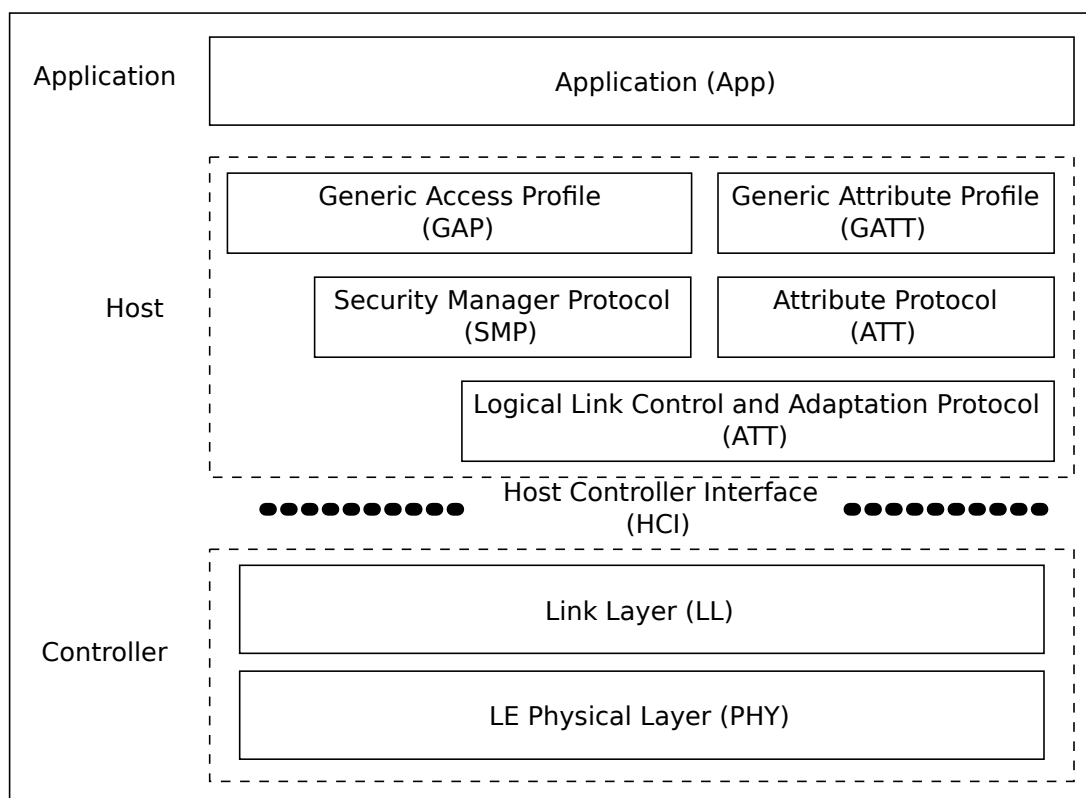
3.3.3 Fyzická vrstva

Fyzická vrstva Bluetooth Low Energy obsahuje analogové komunikační obvody, které jsou schopné modulovat a demodulovat analogové signály na digitální symboly. Používá se šířka pásma 2,4 GHz ISM rozdělena do 40 kanálů od 2,4000 GHz do 2,4835 GHz. Používá 37 kanálů pro datovou komunikaci, zbývající 3 kanály slouží pro navázání spojení a broadcastové vysílání. Dále používá metodu přenosu FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), jejíž princip spočívá v přeskokování mezi několika frekvencemi. Používá následující vztah:

$$f_{n+1} = (f_n + hop) \bmod 37. \quad (3.2)$$

Díky této metodě se minimalizuje možnost rušení a interference na šířce pásma 2,4 GHz. Pracuje zde totiž také Wi-Fi i běžné Bluetooth.

Ke klíčování signálu se používá metoda GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Jedná se o frekvenční modulaci, u které se přenáší informace pomocí diskrétních změn frekvence nosné vlny. Modulační rychlost je uzamčena na 1 Mbit/s, což je zároveň také maximální propustnost.



Obr. 3.5: Schéma BLE protokolu [16].

3.3.4 Linková vrstva

Linková vrstva přímo komunikuje s vrstvou fyzickou. Zpravidla bývá implementována jako vlastní hardware a software. Vrstva je odpovědná za nalezení, vytvoření a udržení spojení.

Tato vrstva pracuje v reálném čase, je zodpovědná za splnění všech požadavků na časování definovaných ve specifikaci.

BLE zařízení může být master, slave nebo obojí v závislosti na požadavcích. Zařízení iniciující spojení je master a zařízení, která hlásí svou dostupnost a přijímají spojení, jsou typu slave.

Adresa Bluetooth zařízení

O unikátní identifikaci zařízení se stará *adresa Bluetooth zařízení*. Je to 48bitové (6bajtové) číslo udávané v hexadecimálním tvaru. V podstatě se dá přirovnat k Ethernetové MAC adrese. Rozeznáváme dva typy adres [16]:

- *Veřejná adresa zařízení*

Tato adresa je předprogramovaná při výrobě zařízení a musí být certifikována u IEEE Registration Authority. Během životnosti zařízení nemůže být tato adresa změněna.

- *Náhodná adresa zařízení*

Jedná se o adresu buďto předprogramovanou na zařízení, nebo náhodně generovanou během připojení.

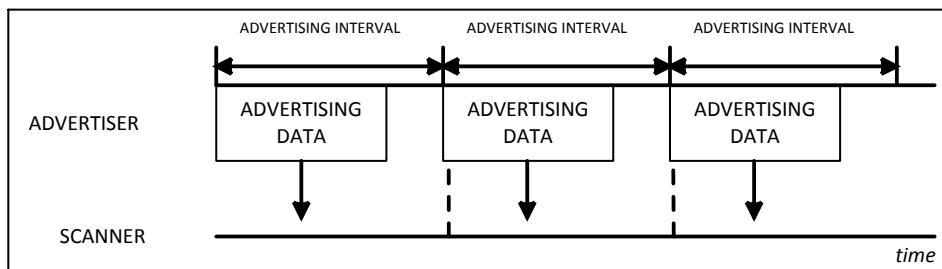
Inzerování a skenování

BLE používá pouze dva typy paketů (*pakety na inzerci a data pakety*) a jeden formát paketu, což napomáhá k jednoduchosti implementace protokolu. Pakety na inzerci nesou až 31 bajtů inzertních dat spolu se základními informacemi ze záhlaví a adresou Bluetooth zařízení. Posílají se v daných intervalech a čím kratší je interval, tím větší je frekvence vysílání těchto paketů. To zvyšuje pravděpodobnost zachycení paketů při skenování, na druhou stranu to zvyšuje množství použité energie. Časové intervaly jsou v mezích od 10 ms do 10,24 s.

Pro skenování dostupných zařízení se používá podobná metoda, jako u inzerování. Zařízení vždy naslouchá po určitou dobu a v určitých intervalech. Tyto intervaly mají vliv na spotřebu energie. Skenování zařízení probíhá dvěma způsoby:

- *Pasivní skenování*

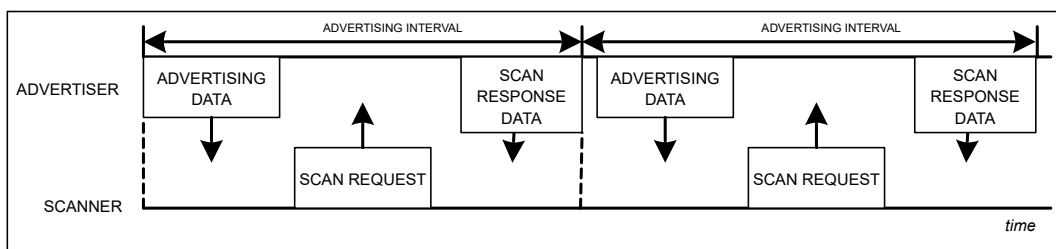
Skener naslouchá a čeká na inzertní pakety. Zařízení, které je poslalo ale není obeznámeno s informací, že pakety byly přijaty. Tento typ skenování můžeme vidět na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Pasivní skenování [16].

- *Aktivní skenování*

Skener po obdržení inzertního paketu zasílá paket Scan Request. Inzertní zařízení jej obdrží a reaguje na něj zasláním Scan Response paketu. Diagram průběhu aktivního skenování je na obr. 3.7.



Obr. 3.7: Aktivní skenování [16].

3.3.5 Host Controller Interface (HCI)

Jedná se o rozhraní umožňující komunikaci mezi hostem (fyzická a linková vrstva) a kontrolérem, viz obr. 3.5. Specifikace definuje soubor pravidel pro komunikaci, jako formát dat a paketů, pravidla řízení provozu, formu příkazů a další.

Linková vrstva vyžaduje zpracování v reálném čase, což klade vysoké nároky na tuto vrstvu. Je proto vhodné ji oddělit od host zařízení a implementovat ji samostatně, což umožňuje použít komplexní sadu protokolů méně náročné na časování a více vhodné pro moderní procesory.

3.3.6 Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)

L2CAP slouží jako protokolový multiplexer, zapouzdřuje protokoly z vyšších vrstev do standardních paketů BLE.

Dalším úkolem této vrstvy je fragmentace a opětovné sestavení paketů. Fragmentace funguje tak, že velké pakety z vyšších vrstev jsou rozděleny na kousky, které se vejdou do limitu 27 bajtů na straně odesilatele. Strana příjemce skládá pakety, které byly dříve rozděleny, do jednoho velkého paketu. Ten je dále poslán do vyšších vrstev protokolu.

3.3.7 Attribute Protocol (ATT)

Protokol typu klient/server sloužící k výměně atributů mezi zařízeními. Protokol nezahájí novou sekvenci, dokud není dokončena ta předchozí – pokud dosud nebylo odpovězeno na čekající žádost, nebudou zpracovány žádné další požadavky.

ATT používá definované operace, jako *Error Handling*, *Server Configuration*, *Find Information*, *Read/Write Operations*, *Queued Writes*, *Server Initiated*. Jsou většinou typu request/response, s výjimkou příkazů z kategorie *server initiated*.

3.3.8 Security Manager (SMP)

Security Manager (SM) je jak protokol, tak sada bezpečnostních algoritmů pro generování a zasílání bezpečnostních klíčů, které zaručují komunikaci po zašifrovaném kanále. Dále zaručuje ověření identity zařízení a skrytí veřejné adresy Bluetooth, pokud je to požadováno.

SM definuje dvě role:

- Initiator – Zařízení typu *master*, jak bylo určeno na linkové vrstvě.
- Responder – Zařízení typu *slave*, jak bylo určeno na linkové vrstvě.

Initiator zahajuje komunikaci, přesto i *responder* může poslat žádost o zahájení některé z bezpečnostních procedur. *Initiator* na tyto žádosti ale nemusí odpovídat.

Bezpečnostní procedury

- Pairing – Generuje se bezpečný šifrový klíč, který není uložen. Je možné jej použít i při dalších připojeních.
- Bonding – Výměna trvalých bezpečnostních klíčů, které jsou uloženy v paměti. Vytvoří se trvalé spojení mezi dvěma zařízeními. To napomáhá rychlému vytvoření bezpečného spojení.
- Encryption Re-establishment – Definuje metody, jak navázat další spojení s uloženými klíči, aniž by bylo nutné znovu provést párování nebo *bonding*.

3.3.9 Generic Attribute Profile (GATT)

Definuje způsob vyměňování uživatelských dat a profilů během Bluetooth spojení. GATT vytváří hierarchii atributů umožňující přístup k informacím mezi klientem a serverem.

Atributy jsou uspořádány do skupiny *services*, kde každá může obsahovat žádnou nebo více skupin *characteristics*. Ty dále mohou obsahovat žádnou nebo více skupin *descriptors*. Tato hierarchie je striktní pro všechny GATT kompatibilní zařízení.

- *Services* slučují koncepčně související atributy do jedné skupiny.
- *Characteristics* jsou kontejnery pro uživatelská data. Obsahují alespoň dva atributy (deklaraci a hodnotu).
- *Descriptors* dále rozvíjejí metadata uložená v *characteristics*. Často obsahují jednu atributu (*characteristic descriptor declaration*).

4 Srovnání přenosových technologií

V této kapitole se podrobněji zaměříme na jednotlivé technologie z hlediska implementace. Budeme porovnávat několik důležitých aspektů, jako například cena, složitost implementace, kvalita přenosu a další.

Pro řešení metalickým vedením a optikou je důležitým parametrem celková délka vedení. U autobusu Dextra LE37, do kterého se mají tyto systémy implementovat, je délka mezi řídicí jednotkou u řidiče a předními dveřmi 4,2 m. K zadním dveřím je to vzdálenost 8,2 m.

4.1 Náklady

Jeden z nejdůležitějších aspektů rozhodující o implementaci systému je výsledná cena.

Je rozdíl, jestli kupujeme kabely přímo na požadovanou vzdálenost, anebo po velkých baleních, která vyjdou výhodněji. Pokud ale koupíme celé balení, musíme mít potřebné vybavení. U řešení pomocí technologie Ethernet potřebujeme krimpovací kleště, které stojí pár set korun. U optiky ale podobné vybavení není tak levné. Na připojení koncovek je nutná svářečka optických vláken, jíž cena se může vyšplhat do desítek tisíc korun.

Pomineme-li vstupní náklady a podíváme se na cenu samotného vedení, cena kabelů se pohybuje vždy v nějakém rozmezí a odvíjí se od délky, jakou kupujeme. Z toho důvodu budeme udávat průměrnou cenu za metr. Vzdálenost budeme uvažovat 12,4 m.

U realizace pomocí bezdrátového přenosu se cena vztahuje jen na dva mikrokontroléry ESP32. Porovnáváme ale ceny za přenosové médium, a jelikož BLE používá vzduch, cenu uvedeme 0 Kč.

Tab. 4.1: Náklady na přenosová média.

Přenosová technologie	Cena [Kč]
Optika	310
Ethernet	186
CAN-Bus	496
Silikonové vodiče	3826
BLE	0

Obsah položky *cena*:

- Optika – Optická vlákna bez převodníku.

- Ethernet – Kabely typu Cat5e. Cena nezahrnuje aktivní prvky (přepínač).
- CAN-Bus – Vodiče CAN-Bus.
- Silikonové vodiče – Jednotlivě tažené vodiče mezi řídicí jednotkou a připojenými zařízeními.
- BLE – Nepoužívá přenosová média.

4.2 Spolehlivost

Za spolehlivé přenosové technologie můžeme považovat takové technologie, které se postarají o bezpečné doručení informace z bodu A do bodu B. Během přenosu nedojde k ovlivnění kvality informace ani jejího obsahu.

Optická vlákna nejsou nijak ovlivňována okolním vedením. Metalická vedení jsou naopak náchylná na rušení při souběžném vedení většího množství kabelů. Proti tomuto jevu bojují například vyšší třídy kategorie „cat“ u ethernetových kabelů.

Dále do této kategorie mohou spadat vlastnosti ovlivňující odolnost vůči prostředí. U optických vláken je omezující křehkost kabelů. Není možné je libovolně ohýbat a je třeba dodržovat určitý poloměr ohybu. V porovnání s metalickými kabely je to značná nevýhoda, ty taková omezení nemají a jsou podstatně méně náchylné na ohyby.

Co se spolehlivosti u bezdrátového přenosu týče, důležitými parametry jsou rušení a interference při přenosu na stejných frekvencích. BLE s tímto jevem bojuje a minimalizuje tyto nežádoucí efekty metodou FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), viz popis fyzické vrstvy BLE [3.3.3].

4.3 Dosah

Komunikace po metalickém vedení bývá v rámci desítek či stovek metrů. Technologie Ethernet díky precizní výrobě kabelů dosahuje vysokých rychlostí při komunikaci na několik kilometrů. Optické přenosy jsou přímo vyvinuty na komunikaci na dlouhé vzdálenosti. Přímý dosah u BLE se udává 50 m.

4.4 Velikost

Při implementaci systému je také důležité, jak velké místo zabírá. Nejtlustší kabely jsou u Ethernetu, mají průměr 5-6 mm. Při vedení velkého množství kabelů velikost svazku velmi rychle narůstá. Na opačné straně spektra stojí optická vlákna s tloušťkou pouhých 0,2-0,9 mm podle typu ochrany.

Velikost implementace pomocí BLE se odvíjí od velikosti mikrokontroléru, který se bude nacházet v přímé blízkosti řídicí jednotky. Kontrolér je vhodné vložit do primární ochrany tvořené z nějakého nevodivého materiálu. I s ochranou ale velikost tohoto řešení nepřesáhne rozměry: 60 mm na délku, 30 mm na šířku a 10 mm na výšku.

4.5 Složitost implementace

Řešení realizovaná pomocí kabelového vedení jsou náročná na implementaci hlavně z důvodu instalace. Vedení je nutné umístit tak, aby splňovalo normu EHK OSN č. 107 (viz kapitola 2.1).

Z tohoto hlediska má návrh řešení pomocí BLE. Proběhne totiž pouze napojení mikrokontroléru na řídicí jednotku a připojení dalších potřebných prvků, jako jsou tlačítka či LED diody na signalizaci. Nevýhodou se může jevit nutnost mikrokontroléry naprogramovat.

4.6 Řešení poruch

V každém systému se mohou postupem času objevit chyby. Ať je to poškození vedení vlivem teplotní roztažnosti či mechanické narušení, oprava kabelového vedení je obtížná. Řešením je totiž požadovaný spoj vyměnit a protáhnout vedení nové. To je mnohem časově náročnější, než výměna kontroléru BLE.

4.7 Zhodnocení

Současná řešení realizovaná v autobusech na ovládání elektrického pohonu dveří jsou pomocí silikonových vodičů a CAN. Jak můžeme vidět, je to velmi drahé řešení. Jako vhodná náhrada se jeví ethernetové vedení, jehož nevýhodou je nutnost aktivních prvků a složitost implementace zapříčiněná adresací. Díky skvělým přenosovým vlastnostem zrealizujeme přenos optickými kabely a podrobíme ho testům, spolu s přenosem bezdrátovým, který nabízí značné výhody bez nutnosti protahování kabelů.

5 Návrh zapojení

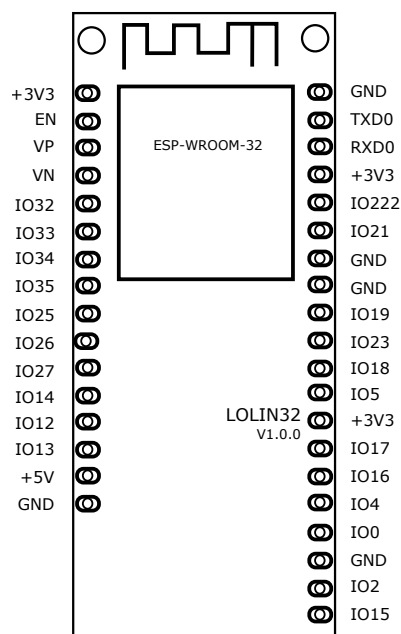
Výstupem této práce je komunikace mezi řídicími jednotkami realizovaná pomocí optického vlákna, Ethernetu a Bluetooth Low Energy.

Pro implementaci je využita vývojová deska LoLin 32 ESP-WROOM-32 2.4GHz Dual-Mode WiFi+Bluetooth od společnosti WEMOS, disponující čipem ESP-32. Desku je možno programovat pomocí softwaru Arduino IDE. Důležité parametry nalezneme v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Přehled parametrů LoLin 32 ESP-WROOM-32 [19][20].

Mikrokontrolér	ESP-32
Maximální frekvence procesoru	240 MHz
Paměť	4 MB
Počet I/O pinů	26
Počet analogových vstupů	12
Konektory	microUSB
Kompatibilita	Arduino IDE, NodeMCU
Platformy	Windows/Linux/MacOS/...

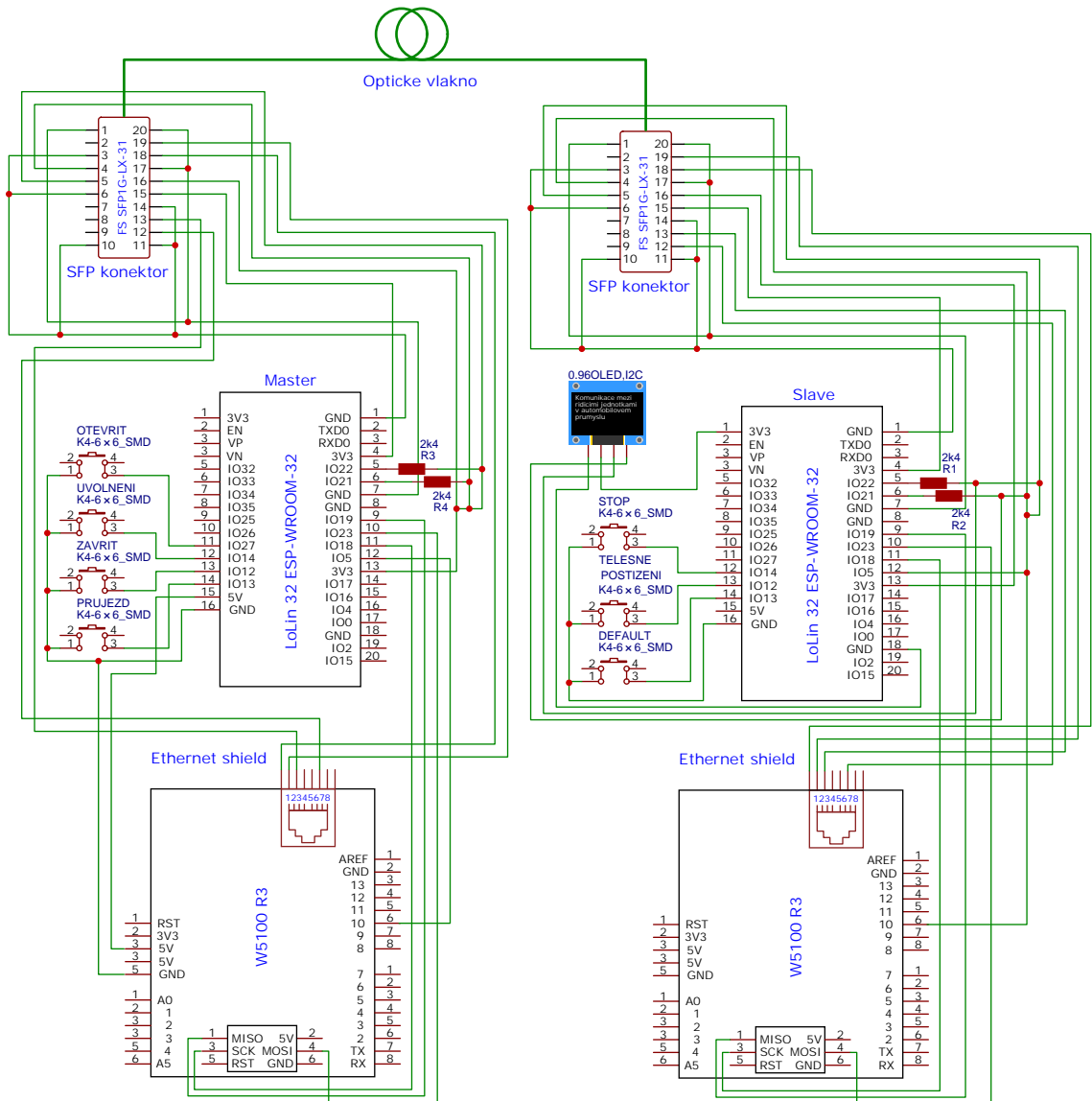
Vývojovou desku ESP-WROOM-32 vidíme na obr. 5.1, kde jsou vyobrazeny všechny piny.



Obr. 5.1: Schéma ESP-WROOM-32 [19][20].

5.1 Komunikace po optickém vlákně

Pro komunikaci po optickém vlákně je využita vývojová deska LoLin 32 ESP-WROOM-32. Pro tuto komunikaci používáme desky dvě, jedna bude označována jako Master a druhá jako Slave. Master se nachází u řidiče autobusu a snímá vstupy z tlačítek pro otevření a zavření dveří, jejich uvolnění a zastávku na znamení. Následně posílá příslušnou hodnotu na Slave zařízení, které pro demonstraci přenesené hodnoty vypisuje na OLED displej. Samotné zařízení Slave také snímá vstupy z tlačítek a danou hodnotu vypisuje na displej. Tyto vstupy mohou používat lidé pro interakci s ovládacím systémem dveří či s řidičem.



Obr. 5.2: Návrh optické komunikace.

Pro převod dat z podoby elektrického signálu do světelného záření jsou použity SFP moduly. Prostřednictvím SFP modulů ale není možná sériová komunikace, tedy není možné zapojit datové piny přímo na desku ESP-WROOM-32. Do modulů je třeba poslat Ethernet data, z toho důvodu je použit Ethernet shield W5100 R3.

Pro komunikaci mezi SFP moduly je použit optický kabel 9/125 Single Mode Fiber Patch Cable s konektorem LC/UPC-SC/UPC Duplex.

5.2 Popis zapojení

Výsledné schéma zapojení je patrné z obrázku 5.2. Jednotlivé části zapojení budou popsány na následujících řádcích.

5.2.1 Připojení SFP modulu na ESP-WROOM-32

V tabulce 5.2 je možné vidět zapojení SFP modulu na vývojovou desku ESP-WROOM-32. Zapojení je stejné pro zařízení Master i Slave. SFP modul pro své fungování potřebuje připojení I²C sběrnice. Proto je na piny IO22 (SCL) a IO21 (SDA) desky ESP-WROOM-32 přes pull-up rezistory o hodnotě 2,4 kΩ přivedeno kladné napětí 3,3 V.

SFP modul [10] je napájen napětím o velikosti 3,3 V a jmenovitý proud nesmí přesáhnout hodnotu 300 mA (ESP-WROOM-32 má maximální výstupní proud 100 mA, tedy nemůže dojít k překročení této hranice). V modulu je zvlášť napájen vysílač a přijímač prostřednictvím pinů VccT a VccR.

Z tabulky zapojení můžeme také vidět, že zbytek pinů je přiveden na zem. Jedná se zejména o VeeR a VeeT, tedy země vysílače a přijímače. Důležité je ale také přivést na zem (nebo na napětí menší, než 0,8 V) pin TX Disable. Pokud je tento pin ve vysoké úrovni (nad 2,2 V) nebo je odpojen, je vysílač vypnut.

Tab. 5.2: Tabulka zapojení – LoLin 32 ESP-WROOM-32 a SFP modul

LoLin 32 ESP-WROOM-32			SFP modul	
Číslo Pinu	Název	Funkce	Číslo Pinu	Název
1	GND	Země	3, 6, 10, 11, 14	TX Disable, MOD-DEF-0, VeeR
4	3V3	Napájení	15	VccR
5	IO22	SCL	5	MOD-DEF-1
6	IO21	SDA	4	MOD-DE-2
7	GND	Země	1, 17, 20	VeeT
13	3V3	Napájení	16	VccT

5.2.2 Připojení Ethernet shieldu W5100 R3 na ESP-WROOM-32

Ethernet shield je připojen k oběma zařízením Master i Slave. Data jsou z desky ESP-WROOM-32 posílána prostřednictvím SPI protokolu. Jsou tedy připojeny piny MISO, MOSI, SCK a SS, viz tabulka zapojení 5.3. Data jsou posílána s využitím UDP protokolu. Takto vyslaná data pokračují do SFP modulu, kde jsou následně modulována na optický signál.

Tab. 5.3: Tabulka zapojení – LoLin 32 ESP-WROOM-32 a Ethernet shield W5100 R3

LoLin 32 ESP-WROOM-32			Ethernet shield W5100 R3	
<i>Číslo Pinu</i>	<i>Název</i>	<i>Funkce</i>	<i>Číslo Pinu</i>	<i>Název</i>
9	IO19	MISO	1	MISO
10	IO23	MOSI	4	MOSI
11	IO18	SCK	3	SCK
5	IO5	SS	10	SS

5.2.3 Připojení SFP modulu na Ethernet shieldu W5100 R3

Data jsou z Ethernet shieldu vysílána konektorem RJ-45. Datové piny RJ-45 konektoru jsou přivedeny na datové piny SFP modulu, jak je znázorněno v tabulce 5.4.

Tab. 5.4: Tabulka zapojení – SFP modul a Ethernet shield W5100 R3

RJ45 konektor		SFP modul	
<i>Pin</i>	<i>Název</i>	<i>Číslo Pinu</i>	<i>Název</i>
1	TX+	18	TD+
2	TX-	19	TD-
3	RX+	13	RD+
6	RX-	12	RD-

5.2.4 Tlačítka a OLED displej

Vstupy z tlačítek využívají obě desky ESP-WROOM-32. V tomto návrhu se z demonstračních důvodů používají tlačítka 6x6x8 mm. Jelikož má deska ESP-WROOM-32 zabudované pull-up rezistory, jsou tlačítka zapojena jen na GPIO pin a na zem.

U Master zařízení jsou k ovládání použity piny IO27, IO14, IO12 a IO13, u Slave zařízení jsou to piny IO14, IO12 a IO13.

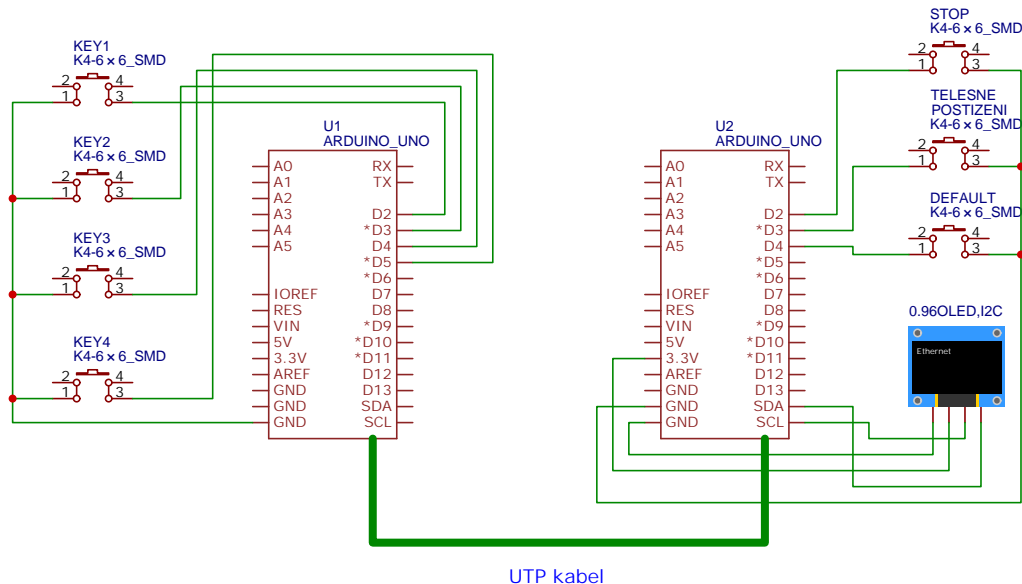
Slave zařízení zobrazuje přenesená data na OLED displeji. Ten má rozlišení 128x64 pixelů a úhlopříčku 0,96 palce. Komunikace je zajištěna prostřednictvím I²C sběrnice. Na displej je přivedeno napájení 3,3V, GND, dále piny SCL a SDA na IO22 a IO21. Displej má již zabudované pull-up rezistory, jejich připojení je tedy nadbytečné. V zapojení už ale jsou kvůli komunikaci s SFP moduly.

5.3 Ethernet komunikace

V návrhu komunikace za použití optické trasy byl použit Ethernet shield W5100 R3 v kombinaci s deskou ESP-WROOM 32. Pro návrh komunikace za využití technologie Ethernet je tento shield použit s Arduinem Uno kvůli zaručené kompatibilitě.

Výsledné zapojení se skládá ze dvou zařízení Arduino Uno s Ethernet shieldem spojené UTP kabelem. UTP kabel používá křížové zapojení, aby byla vyslaná data doručena správně. To je nutné při přímé komunikaci dvou zařízení bez použití aktivního síťového prvku.

Komunikace probíhá za využití UDP protokolu. Obdobně jako u optické komunikace, máme dvě zařízení posílající data v závislosti na vstupu z tlačítek. Ty jsou připojeny na řídicí pin a druhou nožičkou na zem. Ovládány jsou za pomoci zabudovaných pull-up rezistorů. Přenesené informace jsou zobrazeny na OLED displeji, který je připojen na I²C sběrnici.

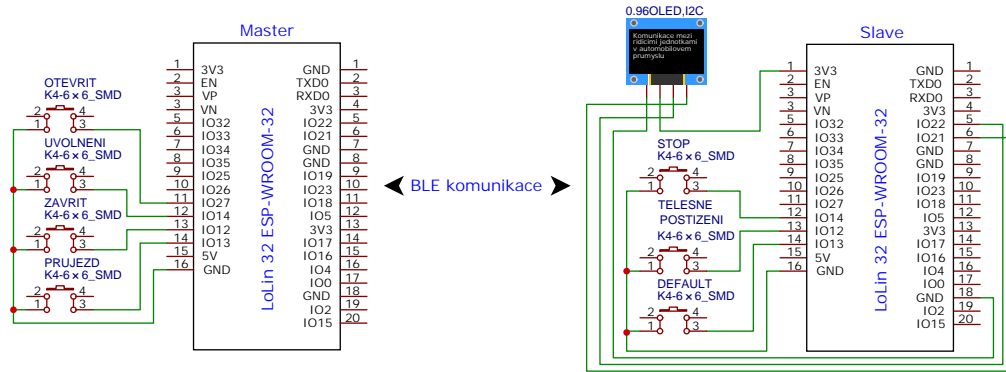


Obr. 5.3: Návrh Ethernet komunikace.

5.4 Bezdrátová komunikace

Bezdrátové komunikace je docíleno použitím protokolové sady BLE a vývojové desky LoLin 32 ESP-WROOM-32 2.4GHz Dual-Mode WiFi+Bluetooth.

Pro tento návrh jsou použity dvě vývojové desky, jedna pracuje v režimu Master a druhá v režimu Slave.



Obr. 5.4: Návrh BLE komunikace.

Na obr. 5.4 můžeme vidět návrh komunikačního kanálu používající tyto mikrokontroléry. K Master zařízení jsou připojena tlačítka sloužící ke snímání vstupů od řidiče. Zařízení Slave má připojena tlačítka a OLED displej na zobrazování přenesených dat. K přenosu dochází podle specifikace Bluetooth LE, data se zapíší do vytvořené charakteristiky a na opačné straně jsou vyčtena. Spolehlivost doručení je zajištěna samotnou specifikací Bluetooth.

6 Přenos dat prostřednictvím optického vlákna

Realizace komunikace po optickém vlákně byla zprvu realizována podle návrhu, (viz kapitola 5.1). Po přehodnocení situace byl do trasy implementován média konvertor. Následně byla nahrazena vývojová deska ESP-WROOM-32 Arduinem Uno. Výsledný postup realizace je popsán na následujících řádcích.

6.1 SFP modul připojený k ESP-WROOM-32

Realizace přenosového systému nejprve vychází čistě z návrhu v kapitole 5.1. Obě desky ESP-WROOM-32 jsou napájeny na pájivé pole spolu s tlačítky a OLED displejem dle schématu 5.2. Následně jsou také patřičně propojeny SFP moduly a Ethernet shieldy s deskou.

Připojení SFP modulu k ESP-WROOM-32 je realizováno pomocí klece na konektory. Jedná se o konektor, jenž má všechny piny vyústěny do patice. Z této patice jsou vyvedeny potřebné piny a přivedeny na desku [21].

Na ESP-WROOM-32 je zkompilován kód pro zaslání dat pomocí UDP protokolu, jenž je dále využíván v kapitole 7. S použitím tohoto kódu nedocházelo k přijímání žádných dat na Slave zařízení. Problém byl diagnostikován až později, (viz kapitola 6.3). (K poslání dat nedošlo ani při vynechání optické trasy a zapojení pouze přes metalické vedení.)

6.2 Média konvertor připojený k ESP-WROOM-32

Jelikož za pomoci klece na SFP konektory nebyla komunikace zprovozněna, byla tato část zapojení vyměněna za média konvertory. Hlavním důvodem bylo minimalizace chyby v zapojení.

Ethernet shield je propojen UTP kabelem s média konvertorem. Data byla opět zaslána neúspěšně, jelikož se nepodařilo rozjet ani komunikaci mezi Ethernet shieldy.

6.3 Média konvertor připojený k Arduinu Uno

Předchozí dva způsoby komunikace byly neúspěšné z důvodu, že deska ESP-WROOM-32 nebyla schopná komunikovat prostřednictvím Ethernet shieldu. Tento problém byl diagnostikován pomocí Arduina Uno. Shield byl připojen pomocí vodičů k Arduinu. Bylo zapojeno minimální množství vodičů, tedy jen napájení a vodiče pro SPI protokol. Ve chvíli, kdy Arduino nemělo připojeno SS vodič (Slave select), vykazovalo stejné chování, jako ESP-WROOM-32. Vždy po zkompilování kódu obsadilo

IP adresu na maximální možnou hodnotu a komunikace nebyla zahájena. Z toho důvodu se dá usoudit, že deska ESP-WROOM-32 má zřejmě chybu v knihovně, kde je chybně definovaný pin pro SPI komunikaci. Tento problém se nepodařilo vyřešit a dále se pokračovalo se zařízením Arduino Uno vybaveno Ethernet shieldem.

V kapitole 7 je popsáno zasílání dat pomocí technologie Ethernet. Média konvertory nebyly schopny přeložit přijaté informace a úspěšně je poslat po optické trase. Důvodem bude zřejmě stejná chyba, která brání přímé komunikaci bez síťového přepínače.

7 Přenos dat technologií Ethernet

Komunikační kanál je sestaven za pomoci dvou zařízení Arduino Uno osazenými Ethernet shieldem W5100 R3 [22].

Po komunikačním kanálu nejprve nebylo možno číst zasláná data. Zapojení bylo realizováno použitím běžného UTP kabelu s přímým zapojením. Ani po použití křížného kabelu ale nebyla komunikace zprovozněna. Až při použití síťového přepínače se podařilo zasláná data na druhé straně přečíst. Tento problém mohl zavinit nemožnost doručení dat při komunikaci po optickém vlákne za pomoci média konvertorů.

7.1 Zdrojový kód UDP komunikace

Jak již bylo zmíněno, pro zasílání dat je použit UDP protokol. V kódu je nejprve definována IP adresa, MAC adresa a port. Pokud komunikujeme uvnitř jisté sítě, je důležité zadat adresu z daného rozsahu.

Pro ověření funkce přenosu dat je program napsán tak, že Arduino U1 periodicky zasílá data a Arduino U2 je čte a tiskne do sériového monitoru.

7.1.1 Vysílač

Ve funkci `setup` dochází k zahájení sériové komunikace rychlostí 115 200 Bd. Dále je spuštěna Ethernet a UDP instance, čímž se zařízení přiřadí zadaná IP a MAC adresa a zahájí se komunikace na daném portu.

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200);  
  // Start the Ethernet and UDP  
  Ethernet.begin(mac, ip);  
  Udp.begin(localPort); }  

```

K zaslání dat dochází periodicky ve funkci `loop`, kdy se každou sekundu zašle jedna hodnota.

```
void loop() {  
  Udp.beginPacket(remote_IP, remote_Port);  
  Udp.write("otevrit");  
  Udp.endPacket();  
  delay(1000);  
  Udp.beginPacket(remote_IP, remote_Port);  
  Udp.write("uvolneni");  
  Udp.endPacket();  
}
```

```

delay(1000);
Udp.beginPacket(remote_IP, remote_Port);
Udp.write("zavrit");
Udp.endPacket();
delay(1000);
Udp.beginPacket(remote_IP, remote_Port);
Udp.write("prujezd");
Udp.endPacket();
delay(1000); }

```

7.1.2 Přijímač

Funkce **setup** je totožná, jako na vysílacím zařízení. K výčtu dat dochází ve funkci **loop**. Přijímací zařízení čeká na UDP datagramy přichozí ze vzdálené IP adresy a portu. Data jsou následně vložena do proměnné **packetBuffer**. Přečtená data jsou zobrazena v sériovém monitoru.

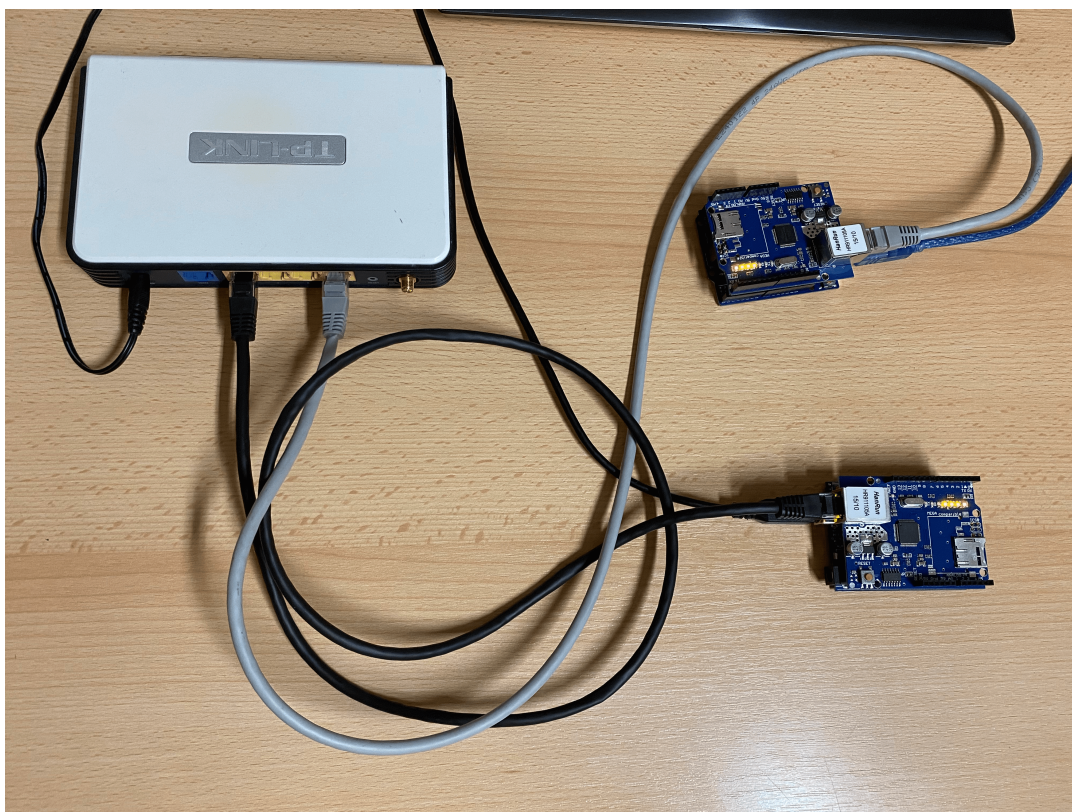
```

void loop() {
  Udp.beginPacket(remote_IP, remote_Port);
  int packetSize = Udp.parsePacket();
  Udp.read(packetBuffer, UDP_TX_PACKET_MAX_SIZE);
  Serial.print("Recieved data: ");
  Serial.println(packetBuffer);
  // Empty array with old data
  for (int i = 0; i < ARRAY_SIZE; i++)
    packetBuffer[i] = '\0';
  delay(1000); }

```

7.2 Zapojení a přenesená data

Výsledné zapojení je k vidění na obrázku 7.1. Dvě zařízení Arduino Uno jsou připojena ke směrovači, který slouží jen jako přepínač. Ukázka přenesených dat je k vidění na obrázku 7.2.



Obr. 7.1: Zapojení Ethernet komunikace.



Obr. 7.2: Přijatá data – Ethernet.

8 Přenos dat prostřednictvím BLE

Zasílání dat s pomocí technologie Bluetooth LE je realizována dle návrhu (viz kapitola 5.4). K desce Master operujícím v režimu serveru jsou připájena 4 tlačítka snímající vstupy řidiče. Přenášejí následující informace:

- otevřít,
- uvolnění,
- zavřít,
- průjezd.

Zařízení Slave je nastaveno jako klient a má k sobě připojena tlačítka a OLED displej. Tlačítka slouží k zaslání informace o zastavení či indikace přítomnosti člověka s tělesným postižením. Na OLED displej jsou zobrazena přenesená data.

Zařízení s rolí server má deklarovanou službu. Služba u BLE může mít několik charakteristik, v tomto případě bude v charakteristice nastavena statická hodnota, která se v závislosti na vstupu z tlačítek přepisuje. Master spouští advertising a čeká na připojení klienta.

Díky znalosti UUID služby a charakteristiky se klientské zařízení připojí k serveru.

8.1 Programové řešení

Vývojová deska ESP-WROOM-32 je programována ve vývojovém prostředí Arduino IDE. Dále budou popsány nejdůležitější části kódu.

8.1.1 Zařízení server

Nejprve definujeme UUID pro službu a charakteristiku. Tyto hodnoty jsou náhodně generovány na adrese <https://www.uuidgenerator.net/>. UUID generujeme náhodně z důvodu, že budeme používat unikátní službu, tedy žádnou z již předdefinovaných.

```
#define SERVICE_UUID           "6d8be263-5a15-43b5-8ae8-ac6bdf419246"

#define CHARACTERISTIC_UUID    "88408aef-33ee-4af4-9afb-f0aebb238f5c"
```

Ve funkci `setup` jsou nejprve definována tlačítka a zahájena sériová komunikace. Dále je nastaveno jméno zařízení, vytvořen server, služba a charakteristika. Služba je poté spuštěna a zapnuta viditelnost. Zařízení tak čeká na připojení klienta.

```

void setup() {
    pinMode(button1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(button2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(button3, INPUT_PULLUP);
    pinMode(button4, INPUT_PULLUP);
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("Establishing connection");

    BLEDevice::init("Master");
    // Creating server, service and characteristic.
    BLEServer *pServer = BLEDevice::createServer();
    BLEService *pService = pServer->createService(SERVICE_UUID);
    pCharacteristic = pService->createCharacteristic(
        CHARACTERISTIC_UUID,
        BLECharacteristic::PROPERTY_READ |
        BLECharacteristic::PROPERTY_WRITE
    );
    pCharacteristic->addDescriptor(new BLE2902());
    pCharacteristic->setValue("bluetooth_LE"); // Writing
    a value to characteristic.
    pService->start();
    BLEAdvertising *pAdvertising = BLEDevice::getAdvertising();
    pAdvertising->addServiceUUID(SERVICE_UUID);
    pAdvertising->setScanResponse(true);
    pAdvertising->setMinPreferred(0x06); // Functions that
    // help with iPhone connections issue.
    pAdvertising->setMinPreferred(0x12);
    BLEDevice::startAdvertising();
    Serial.println("Advertising");
}

```

Ve funkci **loop** dochází k načítání hodnot do charakteristiky v závislosti na vstupu z tlačítek.

```

void loop() {
    // Scanning for a button press on Master device
    //and writing appropriate value to characteristic.
    if (digitalRead(button1) == LOW) {
        pCharacteristic->setValue("Otevrit");
    }
}

```

```

    if (digitalRead(button2) == LOW) {
        pCharacteristic->setValue("Uvolneni");
    }
    if (digitalRead(button3) == LOW) {
        pCharacteristic->setValue("Zavrit");
    }
    if (digitalRead(button4) == LOW) {
        pCharacteristic->setValue("Prujezd");
    }
    delay(200);
}

```

8.1.2 Zařízení klient

Klientské zařízení je nejdříve třeba připojit k serveru. Ve funkci **setup** je zahájeno skenování okolí.

Dále jsou zde definována tlačítka na příslušném GPIO pinu pomocí zabudovaného pull-up rezistoru. Kromě tlačítek se zde také inicializuje OLED displej komunikující po I²C sběrnici.

```

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(button1, INPUT_PULLUP);
    pinMode(button2, INPUT_PULLUP);
    pinMode(button3, INPUT_PULLUP);
    if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
        Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
        for(;;);
    }
    display.display();
    delay(1000);
    display.clearDisplay();
    display.drawBitmap(0, 0, myBitmap, 128, 64, WHITE);
    display.display();

    BLEDevice::init("Slave");

    // Active scanning for 60 seconds
    BLEScan* pBLEScan = BLEDevice::getScan();
    pBLEScan->setAdvertisedDeviceCallbacks(new

```

```

MyAdvertisedDeviceCallbacks());
pBLEScan->setInterval(1349);
pBLEScan->setWindow(449);
pBLEScan->setActiveScan(true);
pBLEScan->start(60, false);
}

```

Jakmile je nalezeno zařízení s hledaným UUID služby a charakteristiky, je klient připojen k serveru. O to se stará funkce **connectToServer**.

V této funkci je zařízení definováno jako klient a připojeno k vyhledanému serveru.

```

BLEClient* pClient = BLEDevice::createClient();
Serial.println("Created-client");
pClient->connect(myDevice);
Serial.println("Connected-to-server");

```

Zařízení je nyní připojeno a je možné vyhledat službu a charakteristiku, jenž byly vytvořeny na serveru.

```

// Loading service from remote server
BLERemoteService* pRemoteService=pClient->
getService(serviceUUID);
// Loading characteristic from remote server
pRemoteCharacteristic=pRemoteService->
getCharacteristic(charUUID);

```

Ve funkci **loop** jsou zaznamenávány vstupy z tlačítek. Obdobně jako u serveru, v případě stisku tlačítka je změněna hodnota uvnitř charakteristiky.

```

if (digitalRead(button1) == LOW) {
    pRemoteCharacteristic->writeValue("Stop"); }
if (digitalRead(button2) == LOW) {
    pRemoteCharacteristic->writeValue("Telesne postizeni");}
if (digitalRead(button3) == LOW) {
    display.clearDisplay();
    display.drawBitmap(0, 0, myBitmap, 128, 64, WHITE);
    display.display();
    delay(3000);
    pRemoteCharacteristic->writeValue("VUT FEKT");}

```

Ve funkci **loop** probíhá čtení dat z charakteristiky a vypisování její hodnoty na OLED displej.


```

// Reading a value from characteristic and printing it
// on OLED display.
pRemoteCharacteristic->readValue();
std::string value = pRemoteCharacteristic->readValue();
display.clearDisplay();
display.setTextSize(2);
display.setTextColor(WHITE);
display.setCursor(10,23);
display.println(value.c_str());
display.display();

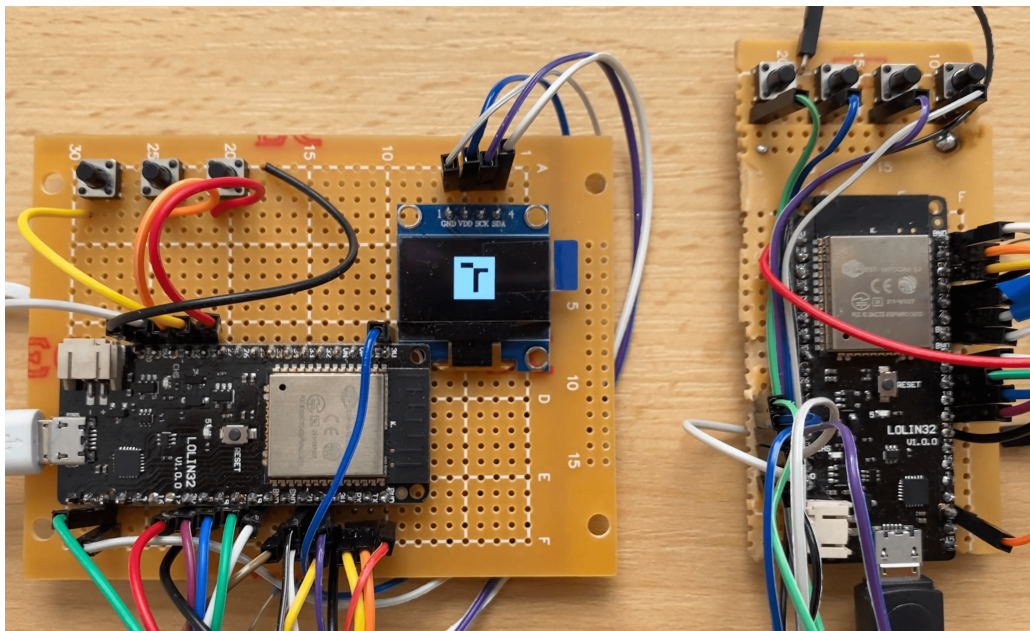
```

8.2 Funkce posílání dat

Po zkompilování kódu na deskách dojde nejprve k zobrazení loga. Při úspěšném navázání spojení se začnou ihned na displeji zobrazovat hodnoty charakteristiky. Reakce systému na vstupy tlačítek je téměř okamžitá.

Systém je otestován na vzdálenost přibližně 10 m, kdy každé zařízení bylo umístěno v jiné místnosti (simulace umístění zařízení v dopravním prostředku mimo dosah cestujících).

Spojení bylo vždy bez problémů navázáno a zasláné zprávy byly doručeny při každém vyslání. Realizované zapojení je k vidění na obrázku 8.1.



Obr. 8.1: Zapojení BLE komunikace.

Závěr

Cílem této práce bylo porovnání technologií na přenos dat mezi řídicími jednotkami hromadných dopravních prostředků a následný návrh technologie přenosu po optickém vlákně, metalickém vedení a bezdrátové technologie využívající Bluetooth Low Energy.

Jednotlivé technologie byly teoreticky popsány a následně porovnány v oblasti nákladů, spolehlivosti, dosahu, velikosti, složitosti implementace a řešení obtíží. Bezdrátová komunikace je cenově nejdostupnější a nabízí nejsnadnější implementaci. Za kabelovými technologiemi pokulhává co se týče dosahu a spolehlivosti, neboť může podléhat nežádoucímu rušení. To může být způsobeno velkým množstvím mobilních zařízení účastníků hromadné dopravy, jež také komunikují na pásmu 2,4 GHz. Realizace komunikace pomocí optického vlákna je velmi náročná na implementaci. Pro své fungování vyžaduje použití technologie Ethernet jakožto datový vstup.

Součástí práce jsou tři návrhy komunikačních kanálů. První návrh popisuje zapojení optického vedení, druhý komunikaci pomocí technologie Ethernet a třetí bezdrátovou komunikaci pomocí dvojice vývojových desek LoLin 32 ESP-WROOM-32. Všechny návrhy jsou koncipovány tak, aby splňovaly předpisy, které se vztahují na systémy užívané v hromadné dopravě. Kromě použité technologie přenosu informace se návrhy ničím neliší. Jedno zařízení vždy snímá vstupy od řidiče, který plánuje interakci s dveřním systémem. Po přenesení této informace na druhé komunikující zařízení dojde k zobrazení hodnoty, která by se jinak poslala do řídicí jednotky starající se o chod dveří.

Implementace komunikace pomocí optického vlákna byla zprvu realizována dle návrhu. Objevily se ale nečekané obtíže s komunikací pomocí technologie Ethernet s deskou ESP-WROOM-32. Ta nebyla schopná vyslat data pomocí SPI rozhraní zřejmě kvůli chybě v knihovně. Následně byla deska nahrazena zařízením Arduino Uno, na které byl připevněn Ethernet shield W5100 R3. Data byla vyslána přímo do média konvertoru, který se stará o překlad dat a zasílá je do optického kabelu. Na zaslání dat do média konvertoru byl použit kabel s přímým i kříženým zapojením. Přes veškerá snažení se ale komunikaci nepodařilo zprovoznit. Problém může mít souvislost s tím, že samotná přímá Ethernetová komunikace fungovala pouze s využitím aktivního síťového prvku, tedy nefungovala při přímém zapojení pomocí UTP kabelu.

Jak již bylo popsáno, komunikace pomocí technologie Ethernet byla vytvořena pro zprovoznění optické komunikace. Zprovozněna byla pouze za použití síťového směrovače, který pracoval v režimu přepínače. V tomto případě byla data bez problému přenesena a vyčtena na druhé straně přijímacím zařízením.

Pro implementaci návrhu bezdrátové komunikace byly použity zařízení LoLin 32

ESP-WROOM-32. Návrh byl v plné míře realizován a odzkoušen. Zadané vstupy z tlačítek jsou předány na druhé zařízení s minimální časovou prodlevou. Spolehlivost doručení je podle provedených testů zaručená. V případě odpojení zařízení dojde k opakovanému vyhledání a následnému spojení. Tento systém je vhodný k implementaci do hromadné dopravy jak pro svou jednoduchost, cenovou dostupnost, tak i pro své malé rozměry. Není nutné vést kabelové trasy, stačí spojení s příslušnou řídicí jednotkou.

Literatura

- [1] *ECU (Electronic Control Unit)* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <<https://www.autolexicon.net/cs/articles/ecu-electronic-control-unit/>>
- [2] *Řídicí jednotka motoru* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <<https://ecude.cz/dc-jednotka-motoru-83.htm>>
- [3] *(EHK OSN) č. 107: Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 107 – Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel kategorie M2 nebo M3 z hlediska jejich celkové konstrukce [2018/237]*. In: . 2018. Dostupné také z: <<https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=42018X0237>>
- [4] *(EHK/OSN) č. 10: Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN) č. 10 – Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska elektromagnetické kompatibility*. In: . 2008. Dostupné také z: <[https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=42010X0508\(01\)](https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=42010X0508(01))>
- [5] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Code Creator, 2014 [cit. 2020-11-27]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <<https://publi.cz/eknihy/?book=185-optoelektrotechnika>>
- [6] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [7] *Simplex vs Duplex fiber optic cables* [online]. [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: <<https://community.fs.com/blog/simplex-vs-duplex-fiber-optic-cables.html>>
- [8] *Everything You Should Know About the SFP Module* [online]. [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: <<https://www.versitron.com/blog/everything-you-should-know-about-the-sfp-module>>
- [9] *The Media Converter | A Quick Guide for The Networking Newcomer* [online]. [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: <<https://planetechusa.com/the-media-converter-a-quick-guide-for-the-networking-newcomer/>>
- [10] *User manual | SFP1G-LX-31 10km*. MANUALZZ [online]. [cit. 2021-5-29]. Dostupné z: <<https://manualzz.com/doc/42561766/sfp1g-lx-31-10km>>
- [11] *Ethernet* [online]. březen 2020 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <<https://searchnetworking.techtarget.com/definition/Ethernet>>

- [12] *Metalická vedení* [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <<https://ackoo.estranky.cz/clanky/metalicka-vedeni.html>>
- [13] *Typy ethernetových kabelů a nákupní průvodce* [online]. 11. dubna 2019 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <<http://cz.opticalpatchcable.com/news/ethernet-cable-types-and-buying-guide-24300652.html>>
- [14] *CO JE TO CANBUS?* [online]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <<https://www.levnearmy.cz/recenzie-a-clanky/slovník-pojmu/co-je-to-canbus.html>>
- [15] *Reliability Bluetooth. Bluetooth® Technology Website* [online]. [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/reliability/>>
- [16] CUFÍ C., TOWNSEND K., AKIBA a DAVIDSON R. *Getting Started with Bluetooth Low Energy*, 22. května 2014. O'Reilly Media, 2014, 180 s. ISBN 978-1491949511.
- [17] *Bluetooth and BTLE. Adafruit* [online]. 2021 [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <<https://learn.adafruit.com/alltheiot-transport/bluetooth-btle>>
- [18] *LoLin 32 ESP-WROOM-32* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <<https://www.laskarduino.cz/lolin-32-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-cp2102-nabijeni-baterie/>>
- [19] *Sch_lolin32_v1.0.0* [online]. In: . [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1TXSaPMfRdSQEcbv8VxH33X5o_x109pTQ/view>
- [20] *ESP32 WeMos LOLIN32 high resolution pinout and specs. Renzo Mischianti* [online]. 2021 [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <<https://www.mischianti.org/2021/02/21/esp32-wemos-lolin32-high-resolution-pinout-and-specs/>>
- [21] *Cage and PT connector assembly. Docs.rs* [online]. 2020 [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <<https://docs.rs-online.com/fc1c/0900766b80ed4c14.pdf>>
- [22] *INTRODUCTION TO ARDUINO ETHERNET SHIELD. Microcontrollerslab* [online]. 2019 [cit. 2021-5-30]. Dostupné z: <<https://microcontrollerslab.com/arduino-ethernet-shield/>>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

ATT	Atributový protokol – Attribute Protocol
BLE	Bluetooth Low Energy
EHK	Předpis Evropské hospodářské komise
FHSS	Spectrum s frekvenčním skákáním – Frequency Hopping Spread Spectrum
GATT	Obecný profil atributů – Generic Attribute Profile
GFSK	Klíčování podle Gaussovy frekvence – Gaussian Frequency Shift Keying
GPIO	Univerzální vstup / výstup – General-purpose input/output
HCI	Rozhraní hostitelského řadiče – Host Controller Interface
I2C	Interintegrovaný obvod – Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství – Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internetový protokol – Internet Protocol
L2CAP	Ovládání logickým spojem a adaptační protokol – Logical Link Control and Adaptation Protocol
MAC	Řízení přístupu k médiím – Media Access Control
MISO	Master In, Slave Out
MOSI	Master Out, Slave In
OLED	Organická dioda emitující světlo –Organic light-emitting diode
RX	Přijímač – Reciever
SCK	Sériové hodiny – Serial clock
SCL	Synchronní hodiny – Synchronous clock
SDA	Synchronní data – Synchronous Data

SFP	Small form-factor pluggable
SIG	Special Interest Group
SM	Bezpečnostní manažer – Security Manager
SMP	Protokol bezpečnostní manažer – Security Manager Protocol
SPI	Sériové periferní rozhraní – Serial Peripheral Interface
SS	Slave Select
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
TD	Přenášení data – Transmit data
TX	Vysílač – Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
UTP	Kroucená dvojlinka – unshielded twisted pair
UUID	Univerzální unikátní identifikátor – Universally Unique Identifier
VLAN	Virtuální LAN – Virtual Local Area Network
Modulační rychlost	[Bd]
Frekvence	[Hz]
Koruna česká	[Kč]
Napětí	[V]
Objem počítačových dat	[B]
Odpor	[Ω]
Proud	[A]
Přenosový rychlost	[b/s]
Útlum	[dB]
Vzdálenost	[m]

A Přílohy práce

Přílohou této práce jsou zdrojové kódy kompatibilní s vývojovým prostředím Arduino IDE. Ve složce BLE se nacházejí kódy pro desku Lolin 32 ESP-WROOM-32. Tyto zdrojové kódy zajišťují komunikaci s využitím Bluetooth Low Energy. Ve složce UDP se nacházejí zdrojové kódy pro desku Arduino Uno. Zprostředkovávají komunikaci s využitím technologie Ethernet.

Všechny kódy byly napsány v Arduino IDE 1.8.13.

