

Bakalářská práce



F3

České
vysoké
učení technické
v Praze

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Zařízení pro snímání zrychlení a jeho přenos do PC

Tomáš Šipka

Školitel: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka

Obor: Kybernetika a robotika

Zaměření: Systémy a řízení

Květen 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šipka** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457428**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Systemy a řízení**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zařízení pro snímání zrychlení a jeho přenos do PC

Název bakalářské práce anglicky:

Acceleration scanning device with data transfer to PC

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte autonomní zařízení pro monitorování a záznam zrychlení. Navrhněte jednak hardwarovou část zařízení, tak software pro přenos snímané veličiny do PC, případně chytrého telefonu. Požadované parametry zařízení jsou následující: Snímání zrychlení v rozsahu min. $\pm 4G$ s rozlišením lepším než 1mG, přenos data do PC na vzdálenost min. 15m s min. rychlostí přenosu 100kbps.

Zařízení navrhněte pro bateriové napájení, schopné pracovat min. 48 h bez nutnosti dobití baterie při minimalizaci rozměrů (výška i šířka max. 3cm včetně baterie). Zvažte možnost implementace gyroskopu a celé zařízení podle možností realizujte na funkčním vzorku.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Biswas and M. Chowdhury: Wireless communication: theory and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [2] H. Eren: Wireless sensors and instruments: networks, design, and applications. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- [3] Ripka, P.; Típek: A. Modern Sensors Handbook; ISTE Ltd: Wiltshire, UK, 2007.
- [4] A. Prasad and N. Prasad: 802.11 WLANs and IP networking: security, QoS, and mobility. Boston: Artech House, 2005.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka, katedra teorie obvodů FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi za ochotu a velmi cenné rady při zpracování této práce. Můj dík také patří mé rodině za podporu během studia.

Prohlášení

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

V Praze, 18. května 2019

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení pro snímání zrychlení a jeho přenos do PC. Předpokládanou aplikací je role prostředníka při komunikaci mezi uživatelem a počítačem. Díky implementaci 3-osého akcelerometru a 3-osého gyroskopu, může být zařízení využito jak při rozpoznávání gest daných pohybem ruky, tak jako 3D myš při navigaci v aplikacích využívajících trojrozměrný prostor. Pro demonstrační účely byla naprogramována UWP aplikace pro Windows v jazyce C#, jenž zobrazuje data ze senzoru a zároveň je vykresluje do grafu.

Klíčová slova: Akcelerometr, Gyroskop, Bluetooth LE, C, C#

Školitel: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Katedra teorie obvodů,
Technická 2,
166 27 Praha 6

Abstract

This Bachelor thesis presents the design and realization of an acceleration measuring device with a data transfer to PC. The intended application of the device is to mediate communication between the user and the computer. Thanks to the tri-axial accelerometer and tri-axial gyroscope, it is possible to use this device for hand gesture recognition or as a 3D handheld mouse for applications integrating three-dimensional space. For demonstration purposes, a Windows UWP application was created, using C# language. The application displays a continual flow of data from the device sensor and plots them simultaneously into a 2D chart.

Keywords: Accelerometer, Gyroscope, Bluetooth LE, C, C#

Title translation: Acceleration scanning device with data transfer to PC

Obsah

1 Úvod	1	2.2.7 WiMAX	23
2 Rozbor požadavků na systém	5	2.2.8 ZigBee	24
2.1 Snímání zrychlení	5	2.2.9 WirelessHART	25
2.1.1 Obecný princip	6	2.2.10 Bluetooth	26
2.1.2 Piezoelektrické akcelerometry .	6	2.2.11 6LoWPAN	28
2.1.3 Piezoresistivní akcelerometry .	7	2.2.12 Thread	29
2.1.4 Kapacitní akcelerometry	8	2.2.13 Z-Wave	31
2.1.5 Další typy akcelerometrů	9	2.2.14 LoRaWAN	31
2.2 Komunikační technologie	10	2.3 Vyhodnocení řešerše	33
2.2.1 USB (Universal Serial Bus) ..	11	3 Popis vlastního řešení	35
2.2.2 Ethernet	13	3.1 Hardwarová část	35
2.2.3 CAN (Controller Area Network)	16	3.1.1 Popis zařízení	35
2.2.4 AS-interface	17	3.1.2 Návrh plošného spoje	37
2.2.5 Další kabelové komunikační technologie	18	3.1.3 Soupis součástek	38
2.2.6 Wi-Fi	20	3.2 Softwarová část	40
		3.2.1 Software pro navržené zařízení (server)	40
		3.2.2 Software pro PC (klient)	43

3.3 Splnění požadavků zadání	45
4 Závěr	47
Literatura	49
Seznam příloh	57

Obrázky

2.1	Obecný model akcelerometru	6	3.1	Zjednodušené schéma zařízení . .	36
2.2	Model piezoelektrického akcelerometru	7	3.2	Konečná podoba zařízení	37
2.3	Model piezorezistivního akcelerometru	8	3.3	Návrh plošného spoje v prostředí EAGLE	38
2.4	Model kapacitního akcelerometru	9	3.4	Význam hodnoty charakteristiky Sensor data	41
2.5	USB konektory	13	3.5	Životní cyklus serverové aplikace	42
2.6	Kabel kategorie 5 s konektorem RJ-45	14	3.6	PC aplikace po spuštění	44
2.7	Struktura Ethernetového MAC rámece	15	3.7	PC aplikace po připojení k zařízení	44
2.8	Auto-Negotiation	15	3.8	Graf síly signálu v závislosti na vzdálenosti od přijmače	45
2.9	Struktura MAC rámece protokolu CAN	17	3.9	Spotřeba čipu BGM11S	46
2.10	SERCOS - kruhová topologie . .	19			
2.11	Základní architektura Bluetooth	27			
2.12	6LoWPAN - komprese paketů .	29			
2.13	Thread - protokolový zásobník	30			
2.14	Příklad sítě LoRaWAN.	32			

Tabulky

2.1 IEEE 802.15.4 používaná frekvenční pásma	24
3.1 Citlivost akcelerometru a gyroskopu	39
3.2 Soupis součástí	40

Kapitola 1

Úvod

První počítače nabývaly obrovských rozměrů a jejich údržbu muselo zajišťovat několik techniků. Programovatelnost a komunikace s nimi byla značně omezená, protože jako vstup sloužily hlavně děrné štítky. Jedním z prvních zástupců této tzv. nulté generace počítačů byl počítač MARK1, sestrojený roku 1944 Howardem Aikenem na Harvardské univerzitě. [1]

MARK1 ještě fungoval na základě elektromechanických součástí, ale už o pár let později byl nezávisle na něm sestrojen počítač ENIAC, který byl založen na elektronkové technologii. I ten však stále používal jako vstup děrné štítky, případně několik stovek otočných spínačů. Programování probíhalo ručně, přepojováním různých vodičů na programové desce. Šlo o poměrně složitou záležitost, kterou musela vykonávat skupina několika lidí, přičemž práce mohli trvat i několik dnů. [1, 2]

Velkým krokem ke zjednodušení ovládání počítačů bylo využití klávesnice, která se používala již od 19. století u psacích strojů. Zpočátku byly klávesnice použity pouze nepřímo prostřednictvím přístroje, který dohromady zkombinoval děrné štítky s psacím strojem, v angličtině nazývaný "keypunch". Tento systém byl použit i u výše zmíněného počítače ENIAC. Poté co se zrodila myšlenka připojit klávesnici napřímo, už nic nebránilo jejímu vývoji do takové podoby, v jaké ji známe dnes. [3]

Po vynalezení tranzistoru a integrovaných obvodů docházelo k postupné miniaturizaci počítačů a snižování jejich výrobních nákladů, díky čemuž se stali přístupné i široké veřejnosti, tedy lajkům, kteří potřebovali svá zařízení ovládat pokud možno co nejjednodušším způsobem. K tomu výrazně přispěl vynález myši a použití grafických oken u operačního systému. [1]

Počítačovou myš vynalezl Douglas Engelbart. V roce 1970 na ni získal patent, ve kterém ji nazval "X-Y POSITION INDICATOR FOR A DISPLAY SYSTEM". Pohyb myši se převáděl na pohyb kurzoru pomocí dvou navzájem kolmých koleček, jež nastavovaly elektrický odpor na potenciometrech. Ty byly drátem propojeny s počítačem, který pravidelně kontroloval jejich stav. Kromě potenciometrů, ještě Engelbart navrhoval použití čítače. Kolečka byla později nahrazena kuličkou pracující na obdobném principu. [4] Zařízení představené Engelbartem je součástí PC dodnes, pouze se pro převod používá místo potenciometrů optický princip s LED nebo laserovými diodami.

Obdobou počítačové myši je trackball, který byl hojně využíván u prvních

přenosných počítačů. Na rozdíl od myši jde o statické zařízení. Pohyblivá kulička je v tomto případě zasazena do podložky, kde s ní lze rotovat pomocí prstů ve všech směrech. Trackball byl však brzy nahrazen populárnějšími myšmi nebo touchpady a dnes už se využívá jen výjimečně (např. u přenosných diagnostických ultrazvukových přístrojů).

Touchpad je destička, po které uživatel pohybuje prstem. V místě doteku dochází ke změně kapacity, jež je snímána po celém povrchu destičky a převáděna na polohu kurzoru. Využíván je především u notebooků, neboť do něj lze touchpad jednoduše integrovat a výsledné zařízení je tak lépe přenositelné. U některých modelů je touchpad kombinován s trackpointem, což je malý výstupek uprostřed klávesnice, jehož naklonění je rovněž převáděno na pohyb kurzoru.

Další technologií zjednodušující interakci s počítačem je dotyková obrazovka. Předností dotykových obrazovek je možnost ovládní uživatelského rozhraní přímo pomocí prstů. První skutečná a transparentní dotyková obrazovka byla vynalezena již v roce 1974. [5] Přestože dotykové obrazovky byly široce používány již dříve, tak období jejich zatím zřejmě největší popularity a nejmasovějšího rozšíření přišlo s mobilním telefonem iPhone od firmy Apple. Existuje několik typů obrazovek, uplatňujících různé fyzikální jevy k detekci dotyku. Nejčastější jsou kapacitní a rezistivní displeje, ale lze se setkat i s displeji využívající přerušování infračervených paprsků umístěných do mřížky, nebo detekci akustických vln [6].

Rozvoj v oblasti strojového učení přinesl nový způsob ovládní počítače založený na rozpoznávání gest. Základním principem této metody je snímání pohybů ruky, či jiné části lidského těla a následná konverze tohoto pohybu na smysluplný příkaz. [7] K detekci těchto pohybů se využívá mnoho různých typů senzorů. Jedním z nich je například klasická, či time-of-flight kamera u níž je detekce gest prováděna pomocí analýzy obrazu [8, 9]. Dalším příkladem jsou senzory využívající Dopp lerův efekt u bezdrátových signálů, jako je například Wi-Fi [10]. Tento přístup je velmi praktický, neboť se lidské tělo nemusí nacházet ve stejné místnosti jako snímací zařízení. Jiné práce se zase zaměřují na extrakci gest z dat získaných akcelerometrem [11, 12, 13, 14].

Ze záznamu zrychlení lze kromě gest rozpoznávat i rukou psaný text [15, 16]. Tento přístup patří mezi metody nazývané DCR (Dynamic Character Recognition), a je alternativou k OCR (Optical Character Recognition). Příkladem zařízení využívající akcelerometr k záznamu rukou psaného písma a grafiky je americký patent [17] z roku 1993.

Jednou z dalších použitelných aplikací akcelerometru je 3D polohovací zařízení, neboli 3D myš, popsané například patentem [18]. Své uplatnění nachází detekce gest s akcelerometrem i v systémech s virtuální realitou [19], počítačových hrách [20], nebo robotické manipulaci [21, 22, 23].

Ačkoliv existují technologie, které nepotřebují při interakci s počítačem kontakt se snímacím zařízením, jsou oblasti, kde je použití kontaktního snímače pohodlnější. V takovém případě lze snímací aparát realizovat pomocí akcelerometru. Návrh a konstrukce zařízení, jež zaznamenává zrychlení a následně může být použito při interakci s počítačem je cílem této práce.

Práce je členěna do tří kapitol: Úvod, Rozbor požadavků na systém a Vlastní řešení. Rozbor je důležitou kapitolou, předcházející samotnému návrhu obvodu, ve které jsou rozebrány dostupné technologie pro dvě klíčové části navrhovaného systému: snímání zrychlení a přenos dat.

V dnešní době existuje velké množství akcelerometrů fungujících na různých fyzikálních principech. Každý z těchto principů má své vlastní výhody a nevýhody, jež předurčují akcelerometr pro danou aplikaci. Výběr typu akcelerometru je tedy důležitým krokem a proto je mu věnována první část 2. kapitoly. To stejné platí i pro komunikační technologie zajišťující přenos dat. Věnována jim je druhá část 2. kapitoly.

Třetí kapitola popisuje vlastní řešení elektronického obvodu, jež zajišťuje komunikaci mezi kapacitním MEMS akcelerometrem a počítačem, prostřednictvím Bluetooth LE. Možné uplatnění představeného obvodu je jako vstupní počítačové zařízení.

V 3. kapitole je popsána aplikace demonstrující funkčnost zařízení prostým zobrazením dat v PC s operačním systémem Windows. Implementace ovladače v OS, či jiné aplikace, v níž by představené řešení bylo použito jako vstupní zařízení je mimo rozsah této práce.

Kapitola 2

Rozbor požadavků na systém

Protože snímání zrychlení a přenos dat představují dvě stěžejní části navrhovaného zařízení a současně definují aplikovatelnost představeného řešení v cílové oblasti, kterou je ovládání počítače, je jim v této kapitole věnována speciální pozornost.

Formou řešerše jsou diskutovány v současné době nejčastěji používané technologie, jak pro snímače zrychlení (akcelerometry), tak pro standardy v oblasti komunikací.

2.1 Snímání zrychlení

Akcelerometry jsou dnes široce používány v mnoha různých oblastech jako je třeba automobilový průmysl [59], kde slouží k detekci nárazu a následné aktivaci airbagu.

Měření vibrací a akcelerace pohybujících se objektů nachází uplatnění mnoha dalších oborech. Například ve stavebnictví a dalších průmyslových odvětvích při monitorování stavu budov a přístrojů konajících pravidelný pohyb (například motorů). Dále v navigačních systémech, či při kalibraci v metrologii. [59]

Přestože měřenou veličinou u akcelerometrů je primárně zrychlení, lze s jejich pomocí měřit i rychlost a polohu pohybujícího se objektu. Za tímto účelem je často měření zrychlení kombinováno s gyroskopem, jenž poskytuje dodatečnou informaci ke korekci vlivů coriolisovy a gravitační síly. Následnou integrací dostaneme rychlost, případně dvojitou integrací polohu. [59]

Nemalé množství aplikací lze rovněž najít u osobních počítačů, kde jsou využívány v myších a různých typech herních kontrolérů k interakci s uživatelem [20]. Za zmínku také stojí implementace akcelerometrů do senzorů přenášejících pohyb do virtuální reality [19].

V této práci je akcelerometr použit ke konstrukci zařízení, jehož účelem je zprostředkování interakce uživatele s počítačem. Základním principem je záznam pohybu končetiny uživatele, či jiné části těla, právě pomocí akcelerometru. Následným vyhodnocením dat lze pohyb převést na předem definované příkazy [11, 14].

Akcelerometr by v této aplikaci měl splňovat následující požadavky:

- Možnost miniaturizace
- Schopnost pracovat s malými změnami zrychlení
- Nízká cena

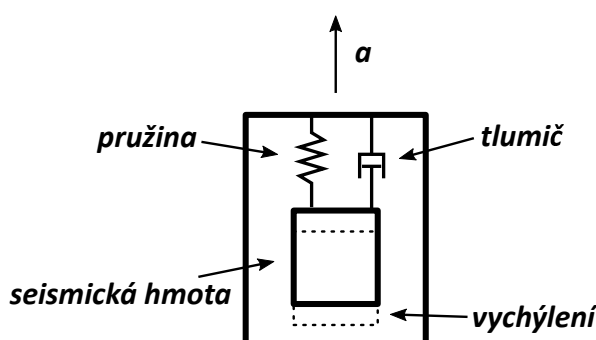
■ 2.1.1 Obecný princip

Obecný princip akcelerometrů spočívá v transformaci zrychlení na sekundární veličinu, jež lze následně dalším měřením převést na elektrický signál. Touto sekundární veličinou může být buď síla, nebo vychýlení (vzdálenost) ze stabilní polohy. Samotné zrychlení a pak může být získáno prostřednictvím 2. Newtonova zákona

$$F = -ma, \quad (2.1)$$

kde F je setrvačná síla působící na objekt o hmotnosti m . [59]

Princip s vychýlením, jako sekundární veličinou, lze demonstrovat na obecném modelu akcelerometru (viz obrázek 2.1). Seismická hmota je spojena prostřednictvím pružiny a tlumiče s tělesem, které se pohybuje se zrychlením a , v důsledku toho dochází k vychýlení seismické hmoty. Toto vychýlení může být měřeno prostřednictvím kapacitních, indukčních, nebo optických snímačů [59]. V případě síly jako sekundární veličiny se nejčastěji využívá piezorezistivní, či piezoelektrický jev [59].



Obrázek 2.1: Obecný model akcelerometru. ¹

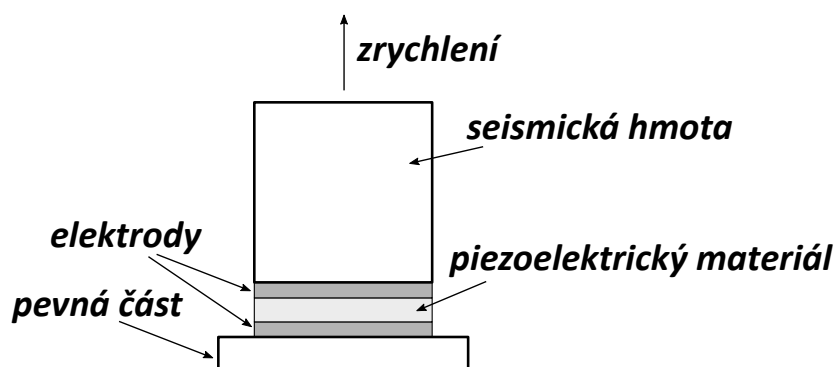
■ 2.1.2 Piezoelektrické akcelerometry

Základním stavebním prvkem tohoto typu akcelerometru je piezoelektrický materiál, který je schopný při deformaci generovat elektrické napětí. [60] Napětí je však generováno pouze v průběhu změny tvaru, nikoliv při statickém stlačování [61].

Piezoelektrický materiál je umístěn mezi dvěma elektrodami. Jedna z nich je připevněna k pevné části akcelerometru a druhá k seismické hmotě (viz obrázek 2.2). Pohybuje-li se pak celý tento systém s určitým zrychlením,

¹zdroj: překresleno a modifikováno podle obrázku 5.2 z [59]

působí seismická hmota na piezoelektrický materiál setrvačnou silou, jenž odpovídá velikosti zrychlení podle 2. Newtonova zákona. Vlivem působící setrvačné síly tak seismická hmota působí na piezoelektrický materiál, který je deformován a v důsledku této deformace, je na elektrodách přítomné elektrické napětí, jenž je svou velikostí úměrné velikosti působící síly. [59]



Obrázek 2.2: Model piezoelektrického akcelerometru. ²

Existují dvě kategorie piezoelektrických materiálů využívaných v akcelerometrech. První kategorií jsou přírodní krystaly, kam patří nejčastěji používaný křemen a turmalín. [59] Výhodou těchto krystalů je, že při výkyvech teploty nedochází ke změně velikosti generovaného napětí [60].

Druhou kategorií jsou feroelektrika, jenž mají spontánní elektrickou polarizaci a piezoelektrickými se stávají až během polarizace, kdy jsou vystaveny elektrickému poli s vysokou intenzitou [60]. Feroelektrické krystaly jsou více náchylné ke změně teplot [59]. Při překročení mezní teploty navíc trvale ztrácí polarizaci [60].

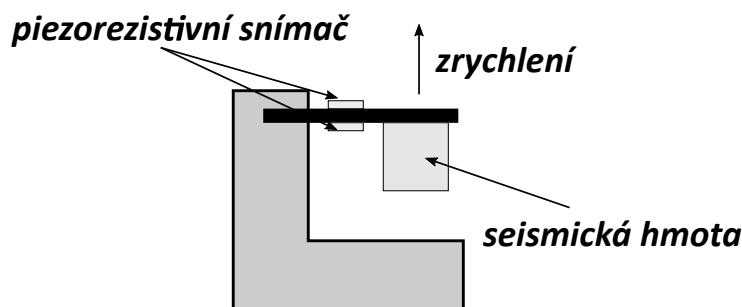
Piezoelektrické akcelerometry jsou vhodné ke snímání rychlých změn zrychlení, používají se tedy primárně jako senzory vibrací. Velkou výhodou je, že samotný princip měření pomocí piezoelektrických materiálů nevyžaduje externí napájení. [60]

2.1.3 Piezoresistivní akcelerometry

Piezoresistivní akcelerometry jsou další skupinou, která využívá k měření zrychlení sílu jako sekundární veličinu [61]. K měření síly jsou tentokrát využity tenzometry u nichž se projevuje tzv. piezoresistivní jev [61], kdy vlivem deformace dochází ke změně rezistivity [62].

Obecně lze tento akcelerometr popsat jako vetknutý nosník, na němž jsou umístěny tenzometry, často zapojené do Wheatstoneova můstku (viz. obrázek 2.3) [62]. Důsledkem zrychlení je setrvačná síla působící na seismickou hmotu, jenž svým pohybem ohýbá vetknutý nosník jedním nebo druhým směrem v závislosti na směru zrychlení a současně deformuje piezoresistivní snímače. Vlivem deformace se mění rezistivita snímačů, jenž je převedena na napětí. [61]

²zdroj: překresleno a modifikováno podle obrázku 9.2 na straně 154 z [61]



Obrázek 2.3: Model piezorezistivního akcelerometru. ³

Nevýhodou těchto akcelerometrů je vysoká náchylnost ke změně citlivosti akcelerometru, při výkyvech teploty v pracovním prostředí (rostoucí teplotou citlivost akcelerometru klesá). Vhodné teplotní podmínky pro práci těchto senzorů se pohybují mezi -50 a 150 °C. [59]

Další nevýhodou je, že impedance připojeného kabelu může ovlivnit výstupní signál. Tomu se lze vyhnout napájením senzoru pomocí konstantního proudu místo napětí. V obou případech však musí být zdroj napájení co nejvíce stabilní. [59]

Mezi výhody patří nízká cena, vysoká citlivost, snadné zpracování dat a možnost miniaturizace. [59]

2.1.4 Kapacitní akcelerometry

U kapacitních akcelerometrů je sekundární veličinou vychýlení z rovnovážné polohy a jak název napovídá, je tato změna měřena pomocí kapacitních snímačů [60].

Obecný princip kapacitních akcelerometrů je demonstrován na obrázku 2.4 vlevo. Snímač se pohybuje s určitým zrychlením. V závislosti na jeho směru působí na seismickou hmotu setrvačná síla, jež ji vychyluje z původní polohy nahoru nebo dolů [61]. Vetknutý nosník zde funguje jako pružina.

Na pohybující se hmotě je umístěna jedna z elektrod kapacitoru, jež se vzdaluje nebo přibližuje od druhé elektrody umístěné na pevné části akcelerometru, čímž dochází ke změně kapacity [61]. Jde-li o deskový kondenzátor s dotatečně malou vzdáleností mezi elektrodami, pak je jeho kapacita dána vztahem [63]:

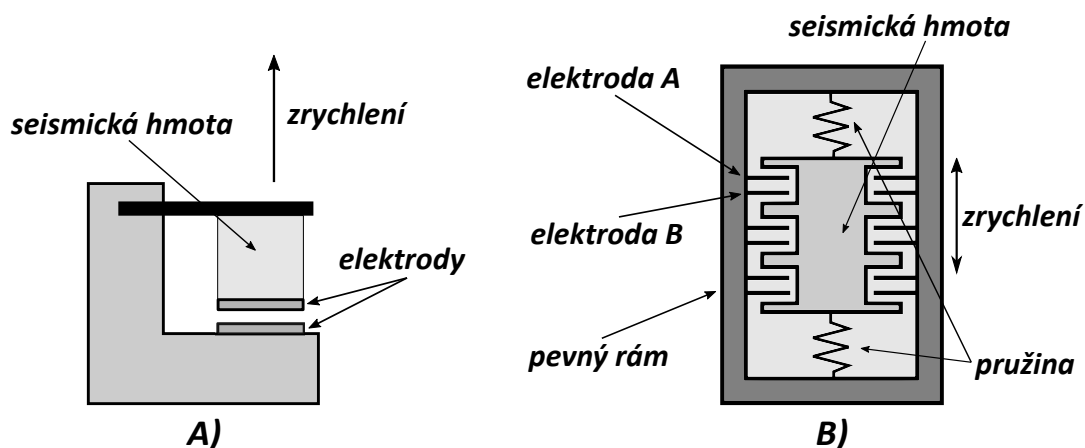
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}, \quad (2.2)$$

kde ϵ_0 je permitivita vakua a ϵ_r relativní permitivita, d vzdálenost mezi deskami kondenzátoru a S je plocha elektrod.

Nejčastěji používanou verzí kapacitního akcelerometru je však senzor využívající diferenční zapojení kondenzátorů [61]. Schéma takového akcelerometru je na obrázku 2.4 vpravo (jde o pohled shora). Seismická hmota je upevněna

³ zdroj: překresleno a modifikováno podle obrázku 9.5 na straně 154 z [59]

⁴A) je překreslen podle obrázku 9.9 na straně 156 z [61].



Obrázek 2.4: A) Model obecného kapacitního akcelerometru B) Model kapacitního akcelerometru využívající diferenční zapojení kapacitorů ⁴

k pevnému rámu prostřednictvím dvou pružin. V závislosti na směru zrychlení se seismická hmota, jenž je současně elektrodou, přiblíží (nebo oddálí) k elektrodě A a zároveň se oddálí (nebo přiblíží) od elektrody B. Důvodem použití diferenční metody je lepší linearita [61].

Výhodou těchto akcelerometrů je vysoká citlivost a rozlišení [59]. Dalším kladem je velmi jednoduchý mechanický princip, snadno realizovatelný technologií MEMS [60]. Nevýhodou je pak malá linearita a citlivost na změny teploty [59].

■ 2.1.5 Další typy akcelerometrů

Kromě výše uvedených typů akcelerometrů, existuje mnoho dalších, jenž využívají odlišné principy k měření sekundární veličiny. Za zmínku stojí:

Optické akcelerometry. Tyto akcelerometry využívají optická vlákna se světelným zdrojem a hodí se tudíž tam, kde není možné použít elektroniku. Například v silných magnetických polích nebo výbušných prostředích. [61]

Základem akcelerometru jsou dvě optická vlákna. Jedno z nich je připevněno k pohyblivé hmotě, která je spojena s pevnou částí akcelerometru prostřednictvím pružiny. Druhé vlákno je připevněné k pevné části akcelerometru v takové poloze, aby obě vlákna byla při nulovém zrychlení přesně naproti sobě a při přenosu světelného paprsku z jednoho vlákna do druhého docházelo k co nejmenším ztrátám. [61]

Ve chvíli, kdy se senzor pohybuje se zrychlením, vychýlí pohyblivá hmota optické vlákno a při přenosu světelného signálu tak dochází ke ztrátám. Čím větší je zrychlení, tím více je vlákno vychýleno, což má za následek větší ztráty. Na konci druhého vlákna je detektor, který tyto ztráty detekuje a přepočte na zrychlení. [61]

Servoakcelerometry. Tento typ akcelerometrů, na rozdíl od doposud zmíněných, využívá zpětnou vazbu ke kompenzaci vychýlení seismické hmoty

■ 2.2.1 USB (Universal Serial Bus)

USB je standard definující jak fyzickou vrstvu, tak komunikační protokoly. V současnosti jde o nejrozšířenější propojovací technologii mezi osobními počítači a jeho periferiemi. V miliardách zařízení slouží k přenosu dat a jejich napájení. Přístroje používající rozhraní USB jsou nejčastěji paměťová uložení, myši, klávesnice, tiskárny, telefony, herní kontroléry a mnoho dalších. [25]

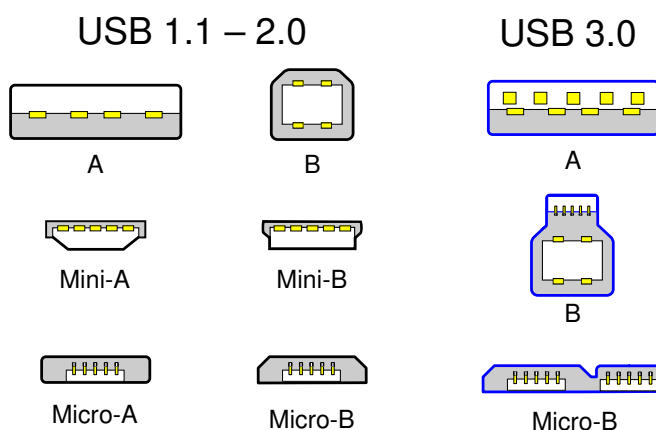
První dvě verze USB (USB 1.0 z roku 1996 a USB 1.1 z roku 1998) podporovaly pouze dvě přenosové rychlosti, označované jako low speed a full speed. Low speed umožňoval komunikaci s propustností 1.5 Mb/s, kdežto propustnost u full speed byla až 12 Mb/s. Specifikaci USB 1.1 nahradila verze USB 2.0, která s novým stupněm high speed navýšila přenosovou rychlost na 480 Mb/s. Standardy USB 3.0 (2008) a USB 3.1 (2013) pak postupně přišly s rychlostmi SuperSpeed (5 Gb/s) a SuperSpeed+ (10 Gb/s). [25] Doposud poslední verze USB 3.2 (z roku 2017) zvýšila přenosovou rychlost SuperSpeed+ na 20 Gb/s. [26] V polovině roku 2019 je však již očekáváno vydání nové specifikace USB4, založené na protokolu Thunderbolt, jež by měla zdvojnásobit propustnost sběrnice ze stávajících 20 Gb/s na 40 Gb/s. [27]

Důležitou vlastností USB je, že zachovává zpětnou kompatibilitu s předchozími verzemi. Přestože USB 2.0 nahradilo specifikaci USB 1.1, tak stále i u tohoto standardu je podporována komunikace rychlostí low speed a full speed. Obě varianty mohou používat stejné kabely a konektory, navíc lze zařízení s podporou USB 2.0 připojit k počítači, jež má pouze USB 1.1. [25] Obdobným způsobem nahrazuje USB 3.2 verzi USB 3.1. To však ale neplatí pro USB 3.x a USB 2.0, kde nedochází k náhradě, nýbrž k doplnění. Zařízení s USB 3.x jsou zpětně kompatibilní s USB 2.0, nicméně rychlosti definované ve verzi 2.0 nemusí plně podporovat. [25] Detailnější informace o zpětné kompatibilitě lze najít v USB specifikaci [26].

Zpětná kompatibilita a nízká cena USB komponent jsou pravděpodobně jednou z hlavních příčin úspěchu této sběrnice. Výhodou je i použitelnost USB u různých tříd zařízení, díky možnosti přenosu jednak časově kritických dat, tak i velkých datových bloků. Tato variabilita má však za následek značnou komplexnost protokolu. Nevýhodou je také design počítačící s komunikací na krátkou vzdálenost, chybí možnost spojení peer-to-peer nebo broadcastového vysílání. Další nevýhodou z pohledu vývojáře může být, že ačkoliv je veškerá dokumentace k USB zdarma a volně přístupná, tak každé USB zařízení musí obsahovat ID výrobce, za jehož přiřazení je nutné zaplatit několik tisíc dolarů. [25]

Topologie. V USB síti figurují tři základní prvky: hostitel (host), rozbočovač (hub) a periferie. Host je hlavní řídicí uzel. Na starost má enumeraci, což je proces, při kterém zjišťuje informace o nově připojeném zařízení (hub nebo periférii), přiřazuje mu adresu a rozhoduje o přenosové rychlosti, na základě podporované verze USB. Kromě enumerace také řídí veškerou komunikaci na sběrnici a poskytuje napájení, pokud to dané zařízení vyžaduje. [26]

Hub umožňuje větvení sítě, detekuje nově připojené zařízení a informuje o tom hostitele, čímž zahajuje proces enumerace. Může být napájen externě



Obrázek 2.5: Porovnání používaných konektorů ve verzi USB 2.0 a USB 3.0. ⁵

power může periferie odebírat kdykoliv 100 mA u verze USB 2.0, nebo 150 mA s verzí USB 3.1. Zařízení označovaná jako high-power mohou odebírat až 500 mA ve verzi 2.0 a 900 mA ve verzi 3.1, musí však být schopná s hostitelem komunikovat i na úrovni low-power, aby si u něj mohla o větší odběr zažádat. Podmínkou pro poskytnutí napájení na úrovni high-power je zapojení periferie do kořenového hubu, nebo rozbočovače s vlastním napájením. Nominální hodnota napětí mezi napájecím vodičem a zemí je 5 V. [25]

Media Agnostic USB. V roce 2015 byla uvolněna specifikace *Media Agnostic Universal Serial Bus Specification*, jejímž cílem je poskytnout USB protokol v technologiích, jež fyzicky nevyužívají USB médium. Zaměřuje se především na podporu bezdrátových technologií Wi-Fi a WiGig. Do budoucna by však měla být podporována i další média, včetně těch využívajících metalické spojení. [30]

2.2.2 Ethernet

Ethernet je standard, spravovaný organizací IEEE pod označením 802.3, definující fyzickou a linkovou vrstvu v ISO/OSI modelu. Od první verze, vydané roku 1985, vzniklo několik modifikací lišících se především fyzickou vrstvou a rychlostí přenosu. Úplně první varianta Ethernetu využívala koaxiální kabel, dnes je nejčastěji používaná kroucená dvojlinka a optická vlákna. [31]

Fyzická vrstva. Nejpopulárnějšími verzemi Ethernetu jsou 10BASE-T, 100BASE-TX (nazývaný Fast Ethernet) a 1000BASE-T (nazývaný Gigabitový Ethernet). Všechny tyto varianty používají kroucenou dvojlinku, liší se však počtem použitých párů a rychlostí komunikace. [31]

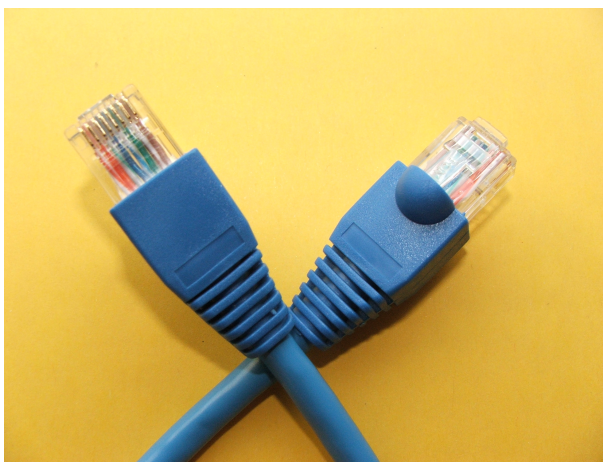
10BASE-T dovoluje komunikaci o rychlosti 10 Mb/s a vyžaduje pro přenos dva kroucené páry, jež musí splňovat požadavky pro třídu D definované ve specifikaci ISO/IEC 11801:1995. Tyto požadavky rovněž splňují komponenty kategorie 5 (kabel zobrazen na obrázku 2.6) specifikované v ANSI/TIA/EIA-568-A. Standard 10BASE-T umožňuje polo-duplexní i plně-duplexní přenos, s délkou kabelu minimálně 100 m, bez nutnosti rozbočovače. [31]

Fast Ethernet podporuje rychlost přenosu 100 Mb/s. Stejně jako 10BASE-T používá i 100BASE-T dva kroucené páry, jenž musí splňovat podmínky definované v ISO/IEC 11801 pro kategorii 5. Podporován je plně-duplexní i polo-duplexní přenos s kabelem dlouhým až 10 m. [31]

Narozdíl od 10BASE-T a 100BASE-T Gigabitový Ethernet používá čtyři kroucené páry, díky tomu lze přenést 8 bitů najednou. Stále podporuje módy half-duplex i full-duplex, některá zařízení však mohou podporovat pouze plně duplexní komunikaci. 1000BASE-T dovoluje přenášet data rychlostí 1 Gb/s, na spojení dlouhém až 100 m. [31]

Dosah ethernetové sítě je možné navýšit pomocí opakovačů, jenž pracují na fyzické vrstvě a přijatý signál pouze zesílí a následně přepošlou dále. Opakovače jsou povoleny jen mezi zařízeními, které podporují poloduplexní komunikaci. Například v případě Gigabit Ethernetu může být mezi dvěma zařízeními jeden opakovač, jestliže podporují polo-duplexní přenos, pokud ho nepodporují, není mezi nimi použití opakovače povoleno. [31]

Kromě výše zmíněných verzí využívá kroucenou dvojlinku i 10GBASE-T s rychlostí přenosu 10 Gb/s, vyžadující kabel alespoň kategorie 6. Nejnovější standardy již většinou kroucenou dvojlinku nepoužívají (kromě 25GBASE-T a 40GBASE-T). Pro 100GBASE-C je definován twinaxiální kabel, zbylé typy 100GBASE používají optická vlákna, stejně jako doposud nejrychlejší 200 a 400 Gigabitový Ethernet.[31]



Obrázek 2.6: Kabel kategorie 5 s konektorem RJ-45. ⁶

Linková vrstva. Linková vrstva je tvořena protkoly LLC (Logical Link Control) a MAC (Media Access Control), zatímco MAC se stará o tok dat, LLC vytváří rozhraní mezi síťovou vrstvou a MAC protokolem. Hlavními funkcemi MAC protokolu je zapouzdření dat, zajištění přístupu k médiu, adresace a detekce chyb způsobených při přenosu. [31]

Kontrolní součet je zajištěn prostřednictvím hashovací funkce CRC (Cyclic

⁶ zdroj: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kroucen%C3%A1_dvojlinka#/media/File:Pkuczynski_RJ-45_patchcord.jpg

redundancy check) s polynomem

$$G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1. \quad (2.3)$$

[31]

K směrování rámců slouží 48bitová MAC adresa, umožňující adresovat i předem definovanou skupinu zařízení (multicast), nebo všechny uzly v LAN najednou (broadcast). [31]

Pro přístup k médiu je využívána metoda CSMA/CD, která se používá především při komunikaci v konfiguraci half-duplex, u plně duplexního přenosu jí není třeba. [31]

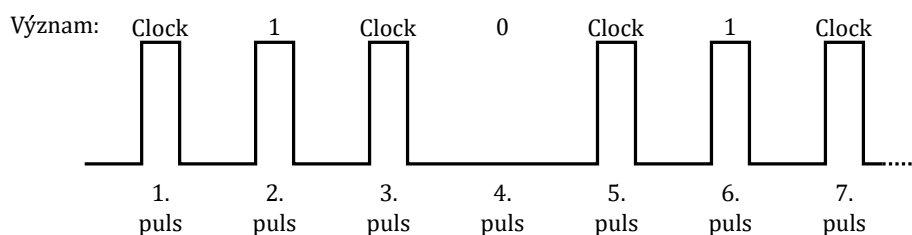
Data z vyšších vrstev jsou zabaleny do rámců a s pomocí fyzické vrstvy odeslány. Struktura rámce je na obrázku 2.7, kde Preamble a SFD (Start Frame Delimiter) slouží k synchronizaci, Délka udává velikost rámce, Data jsou data z vyšších vrstev a Pad zajišťuje minimální velikost rámce. [31]

Preamble	SFD	Cílová adresa	Zdrojová adresa	Délka	Data	Pad	CRC
7 bajtů	1 bajt	6 bajtů	6 bajtů	2 bajty	46 až 1982 bajtů		4 bajty

Obrázek 2.7: Struktura Ethernetového MAC rámce. ⁷

Auto-Negotiation. Auto-Negotiation umožňuje domluvit se s protistranou při jaké rychlosti a jakém duplexním spojení bude komunikace probíhat, tzn. zjistit jaký nejvyšší standard obě zařízení současně podporují. Během výměny informací se však netestuje, zda použité fyzické médium vyhovuje dohodnutému standardu. Pokud je použitý kabel nevyhovující pro daný standard, je nutné ho zakázat ručně. Tato funkce je dostupná pouze pro verze Ethernetu s kroucenou dvojlinkou. [31]

Komunikace probíhá pomocí sledu 100 ns dlouhých pulsů. Jedna sekvence jich obsahuje 33. Liché pulsy (dohromady 17) představují hodinový signál a sudé pulsy (celkem 16) nesou informaci - při logické 1 je puls přítomný a při logické 0 puls chybí. Průběh je znázorněn na obrázku 2.8. [31]

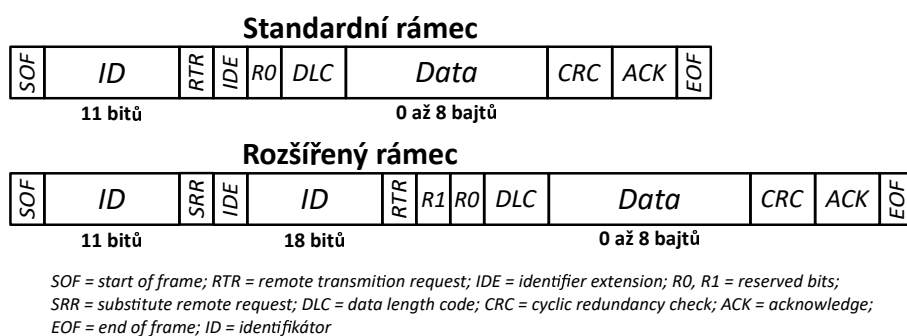


Obrázek 2.8: Auto-Negotiation ⁸

Power over Ethernet (PoE). Díky funkci Power over Ethernet je možné napájet zařízení stejným kabelem, který je použit i pro přenos dat. Napájení

⁷Překresleno a modifikováno podle [31], obrázek 3.1, strana 118, sekce 1, klauzule 3.

⁸Překresleno a modifikováno podle [31], obrázek 28.4, strana 283, sekce 2, klauzule 28.



Obrázek 2.9: Struktura standardního a rozšířeného MAC rámce protokolu CAN.

sběrnici v danou chvíli dominantní stav alespoň jedno zařízení, pak zde bude logická 0, i kdyby všechny zbylé uzly vysílaly logickou 1. [34]

K rozhodnutí o přidělení média dochází při procesu nazývaném bitová arbitráž. Ta probíhá vždy při vysílání nového rámce. Podmínkou je, aby všechna zařízení mající zájem o přidělení sběrnice začla vysílat ve stejnou dobu. Tím je zajištěno, že jednotlivé bity arbitrážního pole, umístěného na začátku každého rámce, se během vzniklé kolize na sběrnici překrývají. Uzly, jenž mají u aktuálně vysílaného bitu identifikátoru logickou 0 přebijí ty s recesivním bitem. Jakmile zařízení detekuje, že stav sběrnice je odlišný od jím aktuálně vysílaného bitu, svůj přenos okamžitě ukončí. Nakonec zůstane na sběrnici přítomný jediný uzel a to ten s nejvyšší prioritou, respektive s nejnižší hodnotou identifikátoru. Například uzel s identifikátorem 00000000101 dostane přednost před uzlem s hodnotou arbitrážního pole 10000000101. Přiřazení priority jednotlivým zařízením v závislosti na hodnotě identifikátoru záleží jen a pouze na tvůrci dané sítě. [34]

Výhody/nevýhody. Obrovskou výhodou je deterministický přenos, který je dán nastavením priorit pro jednotlivé uzly a následnou bitovou arbitráží. Právě díky determinismu je CAN hojně využíván v průmyslových aplikacích. Velmi oblíbený je především v automobilovém průmyslu. Výhodou je taktéž nízká cena a poměrně velká robustnost. [34]

Nevýhodou ale je, že protokoly doplňující CAN o aplikační vrstvu jsou navzájem nekompatibilní. [24]

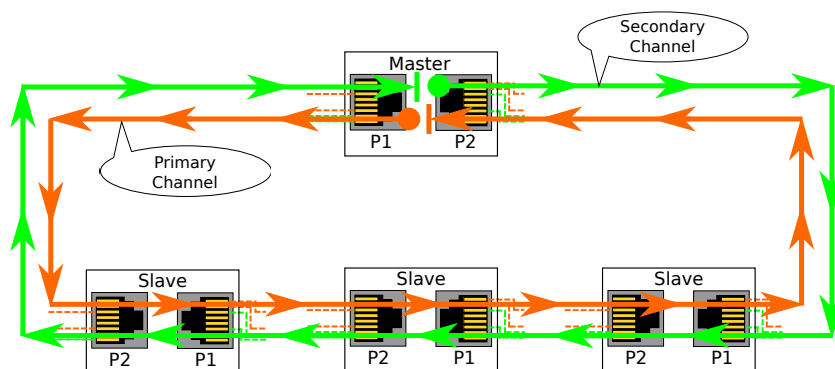
■ 2.2.4 AS-interface

Jde o průmyslový standard pracující na fyzické, linkové a aplikační vrstvě dle ISO/OSI modelu. AS-interface funguje na principu master-slave, přičemž umožňuje připojit až 62 slavy. Master periodicky komunikuje se všemi slavy. Je-li síť plně obsazena trvá jedna perioda 5 ms. Díky pravidelnému dotazování mastra na slavy je celá síť deterministická. [35]

Fyzická vrstva [35]. AS-I používá kabel se dvěma vodiči, které slouží jak k přenosu dat, tak i k napájení. Vodiče nejsou kroucené ani stíněné, nemají

k masterovi) nebo do kruhu (poslední slave je připojen k masterovi - tzv. kruhová topologie), jiná topologie není možná. [36]

Každé zařízení má 2 Ethernetové porty, přes které je kabelem propojeno se svými sousedy. U řadové topologie vzniká jediný primární kanál. Ve chvíli, kdy vyslaný rámec dosáhne poslední periferie, je zaslán stejnou cestou zpět. [36]



Obrázek 2.10: SERCOS - kruhová topologie. ¹⁰

V případě kruhové topologie vznikají propojením mastera s prvním a posledním slavem dva kanály (viz obrázek 2.10): primární (P-kanál) a sekundární (S-kanál). Master data vysílá v obou směrech jak na P-kanál, tak i na S-kanál. Dojde-li někde k přerušení sítě, je tento stav detekován a síť se chová jakoby k masterovi byly připojeny dvě řady slavů (rámce se v místě přerušení otočí a stejnou cestou putují zpět). [36]

Zpoždění rámce, vzniklé zpracováním a přesunem z jednoho portu zařízení na druhý, je konstantní, zhruba 1 μ s. Největší možné zpoždění (za předpokladu, že je využito 511 slavů) je tedy 511 μ s u kruhové topologie a 1022 μ s u řadové topologie. [36]

Vzhledem k využití Ethernetu na fyzické vrstvě, je minimální délka rámce 76 bajtů, maximální 1526 bajtů. [36]

M-Bus. Zaměření sběrnice M-Bus se podstatně liší od ostatních protokolů. Na místo snahy o přenesení velkého množství informací v co nejkratším čase, se zaměřuje na čtení hodnot ze senzorů ve velké vzdálenosti, jenž nevyžadují častou interakci. Příkladem systému splňující tyto podmínky je odečet spotřeby vody nebo elektrické energie v domácnostech. [24]

V síti může být jeden Master, taktéž nazývaný Repeater, a až 250 slavů napájených ze sběrnice. Maximální možná vzdálenost mezi slavem a mastrem je 1 km. Rychlost přenosu u takto dlouhé sítě je 300 b/s, v případě 350 m dlouhého segmentu je to až 9600 b/s. [24]

Při komunikaci mastera s periferiemi se využívá napěťová logika, kde logická 1 je reprezentována 36 V a logickou 0 představuje napětí 24 V. Při přenosu v opačném směru (slave - master) jsou logické úrovně reprezentovány odběrem

¹⁰zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/File:SERCOS_III_Control_Interface_Ring_Topology_diagram.svg

umožňující přenos 6 bitů jedním subkanálem najednou. Dohromady je tak možné přenést skrze jeden kanál 288 bitů naráz. [39]

Následující verze 802.11n (2009) byla první modifikace, jež podporovala MIMO (multiple-input multiple-output) technologii, díky ní dokáže tato varianta dosáhnout přenosové rychlosti až 600 Mb/s. Tak výrazného nárůstu rychlosti oproti předchozí verzi bylo dosaženo pomocí kanálů s šířkou 40 MHz (jde o kombinaci dvou 20 MHz kanálů - tzv. channel bonding), možný je však i přenos kanálem s šířkou 20 MHz. Opět je využívána OFDM modulace, tentokrát s 52 podkanály a 64-QAM modulací na každý subkanál. Navíc, oproti variantě 802.11g, lze použít na každý subkanál jinou modulaci (QPSK, 16-QAM,...). Prostřednictvím jednoho 20 MHz kanálu tak lze dosáhnout maximálně 72 Mb/s. Různou kombinací parametrů a počtu vysílačů (max. 4) je možné získat až 32 různých přenosových rychlostí. [39]

Protokol 802.11n definuje přenos jak ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz, tak i v pásmu 5 GHz a stejně jako předchozí protokoly jsou zpětně kompatibilní se svými předchůdci, tak i 802.11n je kompatibilní s verzemi 802.11a/b/g. Vyskytuje-li se však v síti zařízení podporující pouze starší verzi protokolu, nelze využít všech výhod poskytovaných novým protokolem a dochází tak ke snížení propustnosti. [39]

Roku 2013 byla schválena verze protokolu 802.11ac, jež upravuje specifikaci pouze pro pásmo 5 GHz. Zařízení pracující dle varianty 802.11ac se tak v pásmu 2,4 GHz stále chovají dle normy 802.11n. Protokol 802.11ac přišel s novou technologií nazývanou MU-MIMO (Multi User - MIMO), zvýšil maximální možný počet prostorových kanálů ze 4 na 8, navýšil maximální možnou šířku kanálu z 40 MHz na 160 MHz (pomocí channel bonding) a umožňuje použít 256-QAM modulaci, díky níž lze v jednom subkanálu přenést 8 bitů najednou. Vylepšením zmíněných parametrů je dosaženo maximální rychlosti komunikace 3,47 Gb/s. [40]

Návrh zatím poslední verze protokolu 802.11, s označením 802.11ax, by měla být dle očekávání schválena v průběhu roku 2019. Protokol 802.11ax tentokrát modifikuje specifikaci pro obě frekvenční pásma (2,4 a 5 GHz). Místo OFDM modulace je použita její vylepšená verze OFDMA (Orthogonal frequency-division multiple access), jednotlivé subkanály lze modulovat pomocí 1024-QAM. [41]

Technologie MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Je metoda, poprvé představená u protokolu 802.11n, zvyšující robustnost přenosu. Prvním využitím je tzv. beamforming, který se uplatňuje v situacích, kde má vysílač více jak jednu anténu, zatímco přijímač pouze jednu. Během beamformingu dochází k přizpůsobení fáze vysílaného signálu na vysílačích tak, aby výsledný signál, vzniklý sečtením jednotlivých subsignálů, byl u přijímače ve fázi a tím byl i přijatý signál co nejsilnější. [39]

Beamforming je možné provést jen v případě, že přijímač poskytne zpětnou vazbu o výsledném signálu, navíc musí být tato informace poskytována pravidelně, neboť samotný přijímač se může volně pohybovat. Tím dochází k posunutí fáze, která závisí na vzdálenosti od přístupového bodu, a účinnost

(z více přístupových bodů, se stejným SSID, tvořících jednu síť a jejichž dosah se navzájem překrývá, si klient vybere ten s lepším signálem [38]). Naopak nevýhoda je, že s rostoucí vzdáleností klienta od přístupového bodu klesá síla signálu.

Další výhodou je podpora portability (zařízení mohou měnit svou polohu, ale během komunikace je jejich poloha fixní) a mobility (během komunikace se může zařízení pohybovat).

2.2.7 WiMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) je bezdrátová komunikační technologie určená pro použití v sítích typu WMAN (Wireless Metropolitan Area Network), založená na protokolu IEEE 802.16. Komunikace probíhá na frekvencích od 2 do 66 GHz, v licencovaných i volně dostupných pásmech. [44]

Existují dvě základní služby, jenž se liší svými vlastnostmi a využitím. První služba se nazývá Non-Line-of-Sight (NLoS) a pracuje na frekvencích v rozsahu 2-11 GHz. V tomto módu se WiMAX podobá Wi-Fi s malou anténou integrovanou do PC. Anténa nemusí být směřována přímo k vysílači. V druhém režimu Line-of-Sight (LoS) WiMAX využívá vyšší frekvence od 10 do 66 GHz. V takovém případě musí být anténa natočena na vysílač. Služba LoS dosahuje, díky krátkým vlnám podstatně vyšších přenosových rychlostí než NLoS. [44]

Přestože maximální doporučený dosah je 10 km, teoreticky lze dosáhnout komunikace na vzdálenosti až do 50 km. Díky velkému dosahu může být WiMAX využit k poskytnutí internetového připojení pro domácnosti a kanceláře, nebo bezdrátovému propojení budov v rámci jedné sítě. WiMAX rovněž podporuje roaming a přenosná zařízení, u nichž může být anténa zabudována přímo do notebooků, či jiných přístrojů. [44]

Dle normy 802.16e WiMAX používá pro přenos OFDMA technologii s 2048 podkanály. V závislosti na síle signálu lze na každý subkanál aplikovat BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, nebo 256-QAM modulaci tak, aby byl přenos rychlý v případě silného signálu, ale dostatečně robustní u slabého signálu. Šířku kanálu je možné nastavit v rozmezí 1,25 a 20 MHz. Samotná komunikace probíhá jako full-duplex. [44]

Nechybí podpora beamformingu k zesílení signálu ve směru příjemce, nebo MIMO (vysílání a příjem prostřednictvím více antén). WiMAX také integruje HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) technologii, jenž umožňuje nejen detekovat chyby v přijatých datech, ale také je opravit a to prostřednictvím Reed-Solomonových kódů. Bezpečnost komunikace je zajištěna šifrou 3DES, nebo AES algoritmem. [44]

WiMAX je primárně navržen pro venkovní aplikace, má velmi široké využití v městských i vesnických oblastech a v podnikových i obytných prostorách. [44]

2.2.8 ZigBee

ZigBee je bezdrátový komunikační protokol pro sítě typu WPAN (Wireless Personal Area Network), vyvíjený organizací ZigBee Alliance, s cílem poskytnout komunikační rozhraní na krátké vzdálenosti v aplikacích, kde je klíčová nízká cena, dlouhá životnost baterie a naopak není vyžadován vysoký datový tok. Takovou aplikací může být třeba přenos dat ze senzorů, jež monitorují zdravotní stav osob, nebo vlhkost a teplotu v obytných prostorech. Uplatnění také nachází u propojování periférií, jako jsou například myši, klávesnice a herní kontroléry, s počítačem. [45]

Protokolový zásobník je tvořen čtyřmi vrstvami, založenými na ISO/OSI modelu. Jsou to: fyzická vrstva, MAC (Medium Access Control) vrstva, síťová vrstva a aplikační vrstva. První dvě vrstvy jsou vyvíjeny zvláště v rámci standardu IEEE 802.15.4, zatímco síťová a aplikační vrstva jsou definovány ZigBee standardem. [45]

Dle specifikace IEEE 802.15.4 uvolněné v září roku 2006, jsou používána tři frekvenční pásma. První pásmo 868 MHz je pro Evropu, zatímco druhé pásmo 915 MHz je pro Severní Ameriku a poslední pásmo 2,4 GHz je využíváno celosvětově. Každé zařízení musí podporovat buď obě frekvence 868 a 915 MHz současně, nebo ani jednu z nich. Tato pásma jsou tedy společně spjata. Existuje několik verzí dvojice 868/915 MHz s různými přenosovými rychlostmi, jak je zobrazeno v tabulce 2.1, přičemž pásma označená hvězdičkou jsou volitelná a v případě jejich integrace je nutné podporovat i první dvě. [45]

Frekvence (MHz)	Počet kanálů	Modulace	Bit rate (kb/s)
868-868,6	1	BPSK	20
902-928	10	BPSK	40
868-868,6*	1	ASK	250
902-928*	10	ASK	250
868-868,6*	1	Q-QPSK	100
902-928*	10	Q-QPSK	250
2400-2483,5	16	Q-QPSK	250

Tabulka 2.1: Přehled frekvenčních pásem používaných standardem IEEE 802.15.4. Frekvence označené hvězdičkou (*) jsou volitelné. ¹¹

Zařízení v sítích, využívajících technologii ZigBee, mohou být zformovány do různých topologií. Jednou z nich je hvězdicovitá struktura, ve které jedno centrální zařízení komunikuje s ostatními, jež ho obklopují. Další strukturou je peer-to-peer topologie, v níž může každé zařízení komunikovat se všemi ostatními v jeho dosahu. Pomocí určitých restrikcí lze z peer-to-peer topologie vytvořit stromovou strukturu. [45]

Nezávisle na topologii je vždy síť kontrolována jedním zařízením, označova-

¹¹Uvedená data jsou přejata ze zdroje [45], z tabulky 1.1 na straně 7.

ným jako PAN koordinátor. Ten přiřazuje jednotlivým uzlům adresy, zajišťuje směrování zpráv a vybírá unikátní identifikátor sítě. [45]

Jak je u bezdrátových sítí obvyklé, používá i ZigBee pro přístup k fyzickému médiu metodu CSMA/CA. Zjištění zda je kanál volný probíhá v režimu přijímače změřením energie signálu v daném frekvenčním pásmu. Aby bylo možné detekovat obsazení kanálu i od jiných technologií a zdrojů rušení, není daný signál dekódován a v potaz je brána jen jeho energie. [45]

Kromě metody CSMA/CA, u které začne vysílat první zařízení, jenž vidí volný kanál, je možné použít i jiný přístup, využívající centrální zařízení. U tohoto mechanismu PAN koordinátor, přiřazuje zařízením časové sloty, během kterých mohou vysílat. Nevýhodou této metody je nutnost pravidelného vysílání rámce nazývaného beacon, jenž slouží k synchronizaci všech uzlů v síti. S tím je spojena větší spotřeba baterie, neboť se zařízení musí během synchronizace probudit z úsporného režimu. [45]

K adresaci zařízení je možné použít 16-bitovou nebo 64-bitovou adresu. S kratší z nich lze adresovat v rámci jedné sítě a v kombinaci se síťovým identifikátorem je možná i komunikace ze sítě ven. [45]

Směrování paketů má na starost síťová vrstva, starající se i o počáteční formování sítě, které probíhá zcela automaticky. První zařízení, jenž začne komunikovat může samo sebe ustanovit koordinátorem a postupně připojovat další zařízení. [45]

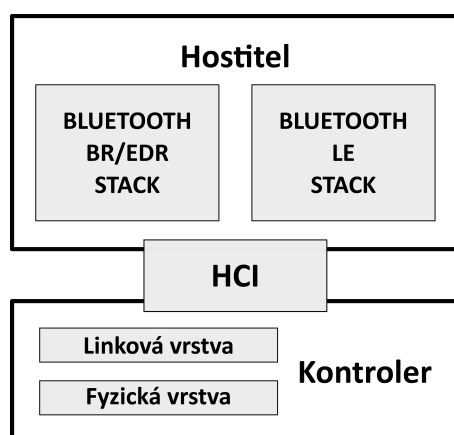
Ve chvíli kdy je síť zformována může v důsledku neočekávaných událostí dojít k narušení, některé z komunikačních cest. V takovém případě je vyhledána nová cesta, přes kterou může být zpráva doručena. [45]

2.2.9 WirelessHART

WirelessHART specifikuje protokol pro bezdrátový přenos dat, určený především pro průmyslové aplikace, kde cílí na komunikaci se senzory a akčními členy. Do jisté míry je ovlivněný protokolem HART, využívající metalické vedení (viz sekce 2.2.5). Technologie WirelessHART a HART jsou navzájem zpětně kompatibilní, mají stejnou aplikační vrstvu. Kromě aplikační vrstvy je WirelessHART také definován fyzickou, linkovou, síťovou a transportní vrstvou. Na fyzické a linkové vrstvě adoptuje protokol IEEE 802.15.4. Oproti tomu síťová a transportní vrstva je definována přímo standardem WirelessHART. [46]

Jediným frekvenčním pásmem u WirelessHART je ISM pásmo 2,4 GHz s 11 až 25 kanály. Během vysílání je aplikována technologie channel hopping, jenž mění vysílací kanál po každém přenosu. Přestože standard IEEE 802.15.4 je navržen pro komunikaci v sítích typu WPAN, jenž mají dosah typicky okolo 10 m, je WirelessHART schopný přenosu na vzdálenosti až 100 m v případě, že mezi vysílačem a přijmačem není, žádná překážka. Přenosová rychlost může dosahovat až 250 kb/s. [46]

V síti se vždy vyskytuje jeden správce sítě a jedna gateway. Správce zajišťující konfiguraci a připojování nových zařízení do sítě, sleduje dění v síti a na základě získaných informací upravuje její topologii a řídí a plánuje



Obrázek 2.11: Základní architektura Bluetooth, tvořená hostitelem, kontrolerem a komunikačním rozhraním HCI.

Rychlejší přenos je možný pomocí verze EDR, která je při použití modulace $\pi/4$ DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift Keying) schopná dosáhnout propustnosti 2 Mb/s a s modulací 8DPSK až 3 Mb/s. Rozšíření EDR je ale volitelné a nemusí ho proto podporovat všechna zařízení Bluetooth. [48]

Jedinou přípustnou topologií u této verze je Point-to-Point (P2P) připojení a je optimalizováno pro přenos audia. Aplikaci tedy nachází mimo jiné u mikrofونů a různých druhů reproduktorů. [49]

LE. Hlavním cílem Bluetooth Low Energy není, narozdíl od BR/EDR, spojitý přenos, místo toho se zaměřuje na vysílání dat v krátkých dávkách. Komunikace probíhá pomocí metody FHSS se 40 kanály v pásmu 2,4 GHz, přičemž jednotlivé kanály jsou od sebe vzdáleny 2 MHz. Tři ze 40 kanálů slouží k propagaci, zbylé k přenosu dat. [47]

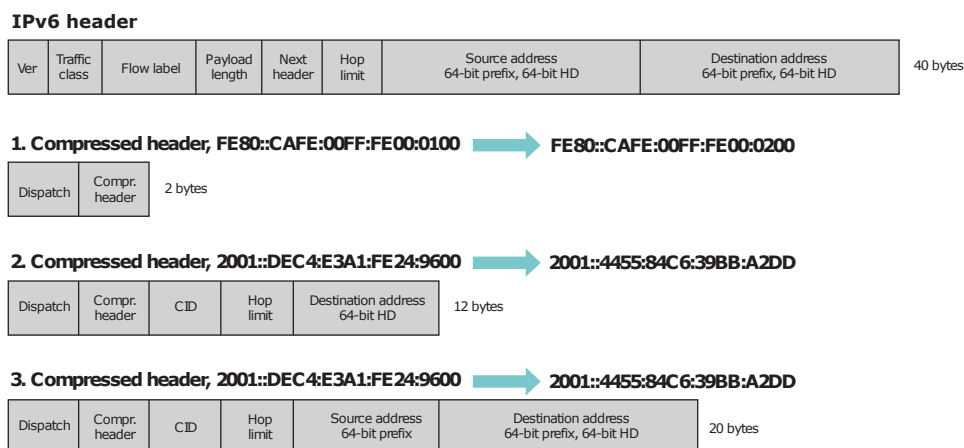
Podporovány jsou 4 rychlosti 125 kb/s, 500 kb/s, 1 Mb/s a 2 Mb/s, poslední nejvyšší rychlost byla přidána ve verzi Bluetooth 5.0 a je volitelná. Kvůli zachování jednoduchosti protokolu používá LE pouze jeden typ modulace (GFSK). [47]

Stejně jako u BR/EDR, je i u LE možné použít Point-to-Point topologii. [49] Zde je však P2P určena především pro přenos dat s velmi nízkou spotřebou, nacházející uplatnění ve fitness zařízeních, jako třeba monitoring srdečního tepu. Kromě toho je LE možné použít k propojení periférií (myš, klávesnice,...) s počítačem. [50]

Bluetooth Low Energy navíc také podporuje broadcast (zařízení vysílá pro všechna zařízení v okolí formou majáku) a síťovou topologii, v níž se může nacházet maximálně 32 767 uzlů a 4096 podsítí. V rámci sítě nechybí podpora unicastu, multicastu a broadcastu. [49]

Pakety jsou v síti směrovány pomocí záplavového algoritmu, to znamená, že daný paket obdrží všechna zařízení v okolí a ty ho stejným způsobem posílají dál. Výhodou je, že se v síti nemusí nacházet žádný router, který by řídil směrování a při výpadku jedné z cest dojde paket do cíle jinými trasami. Aby nedošlo k zacyklení paketů, obsahují jejich hlavičky pole označované Time

této kompresi má hlavička velikost 12 bajtů. Poslední varianta komprese má velikost 20 bajtů a je použita při odesílání paketu do externí sítě s neznámým prefixem. [52]



Obrázek 2.12: 6LoWPAN - demonstrace komprese paketů.¹²

Vzhledem k velké minimální velikosti IPv6 paketů, je nutné jejich rozdělení pomocí fragmentace do menších celků, jenž se vlezou do rámců IEEE 802.15.4. V závislosti na typu routování mohou být pakety složeny až v cílovém zařízení, nebo jsou skládány a opět rozkládány v každém uzlu, jenž je mezi odesílatelem a příjemcem. Pokud při složení některá část rámce chybí, musí být odeslán znovu celý rámec.

Pro zabezpečení komunikace využívají 6LoWPAN sítě 128-bitovou šifru AES definovanou linkovou vrstvou IEEE 802.15.4. Další zabezpečení může být přidáno transportní vrstvou.

2.2.12 Thread

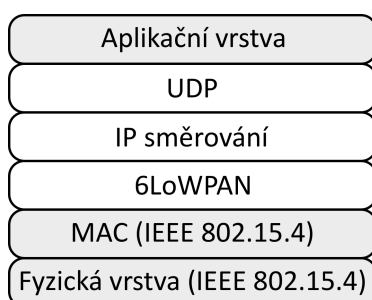
Thread je bezdrátový komunikační standard, cílící na zařízení napájené z baterie s nízkou spotřebou. Jeho první verze byla vydána organizací Thread Group v roce 2015. Skrze 6LoWPAN je na síťové vrstvě podporován protokol IPv6, trasportní vrstva využívá UDP protokol a fyzická vrstva je společně s linkovou definována standardem IEEE 802.15.4-2006. Hlavní aplikací jsou chytré domácnosti, kde je Thread využíván v zařízeních jako termostaty, detektory kouře a oxidu uhličitého, senzory pohybu, alarmy a mnoho jiných. [53]

Síť využívající Thread může obsahovat čtyři základní prvky: okrajový router, router, REED (router-eligible end device) a koncové zařízení. [54]

Okrajový router tvoří rozhraní mezi lokální sítí implementující Thread a externími sítěmi založenými na jiných technologiích (Wi-Fi, Ethernet,...). Oproti obyčejným routerům, jenž obstarávají routování pouze v rámci lokální sítě, směřují okrajové routery pakety ze sítě ven. Obou typů routerů může být

¹²zdroj: [52], strana 7, obrázek 3.

¹³Překresleno a modifikováno podle obrázku 1.1 na straně 3 z [53].



Obrázek 2.13: Protokolový zásobník standardu Thread. ¹³

v síti více. Koncová zařízení mohou mezi sebou komunikovat pouze skrze směrovače. [54]

REED je zařízení, jenž za normálních okolností není routem a nevykonává žádnou z jeho povinností. Pokud to však stav sítě, vyžaduje je automaticky, bez nutnosti zásahu uživatele, povýšen na router. [54]

V síti se může nacházet až 32 aktivních směrovačů, jenž si udržují směrovací (routovací) tabulku, podle které je daný paket odeslán na sousední router, přes nějž vede nejkratší cesta do cíle. Aby byla tabulka neustále aktualizovaná, vyměňují si směrovače zprávy, jenž obsahují informaci o ceně odeslání paketu na ostatní routery v síti. Tyto zprávy se označují jako MLE (Mesh Link Establishment) a mimo jiné slouží také k detekci sousedních zařízení a navázání bezpečného spojení. [53]

Z horních bitů adresy cílového zařízení je router schopný jednoznačně určit rodičovský směrovač, k němuž je daný koncový uzel připojen a na základě routovací tabulky tak může vybrat optimální cestu. Cena cesty je odvozena z kvality spojení (síly signálu) mezi sousedními routery a je převedena na hodnotu v rozmezí 0 a 3, kde 0 znamená, že cena není známá. [53]

Detekce nových zařízení v radiovém dosahu začíná odesláním paketu MLE discovery request. Následně je očekáváno přijetí odpovědi MLE discovery response od všech uzlů v dosahu. [53]

Topologie sítě s technologií Thread může být buď hvězdicovitá, pokud se v ní nachází pouze jeden směrovač, a nebo síťová, obsahuje-li více jak jeden router. [53]

Vzhledem k zaměření standardu Thread na chytré domácnosti, je zde klíčová otázka bezpečnosti. Je nutné zajistit, že žádná nepovolaná osoba nebude schopna například vypnout alarm. Jako hlavní zabezpečovací mechanismus je použita autentizace a šifrování definované standardem IEEE 802.15.4. Navíc lze použít libovolný internetový zabezpečovací protokol. [53]

Thread pracuje v ISM pásmu 2,4 GHz. Umožňuje přenos rychlostí do 250 kB/s. Radiový dosah zařízení je takový, aby pokryl průměrně velkou domácnost. Celý protokol je navržen tak, aby vyřazení jednoho uzlu nevyřadilo celou síť. Nicméně při použití jediného směrovače v celé síti, ochromí jeho výpadek i zbytek sítě. [54]

■ 2.2.13 Z-Wave

Z-Wave je bezdrátová technologie pro chytré domácnosti pracující na frekvencích pod 1 GHz. V různých zemích se tyto frekvence mohou lišit, nicméně všechny se pohybují okolo 900 MHz, například v Evropě jsou používána dvě frekvenční pásma 868,4 a 869,85 MHz. Výhodou těchto frekvenčních pásem je malá interference s jinými technologiemi. [55]

Technologie Z-Wave je vhodná pro zařízení napájená z baterie a vyžadující malou spotřebu. V celé síti může být maximálně 232 uzlů, jež společně vytváří síťovou topologii. Rádiový dosah je 100 metrů bez vyskytujících se překážek mezi vysílačem a přijímačem. Celkový dosah v síti však může být podstatně větší, neboť uzly jež nejsou napájeny z baterie jsou využívány jako opakovače. Přenosová rychlost se pohybuje v rozmezí 40 a 100 kb/s. [55]

V síti se vždy nachází jeden primární kontroler a až 231 dalších uzlů označovaných jako slave. Primární kontroler má na starost sestavování routovací tabulky, s jejíž pomocí jsou řízeny cesty mezi jednotlivými uzly. Na základě směrovací tabulky pak primární kontroler přiřadí všem slavům, kromě těch napájených z baterie (kvůli zachování co nejdelší životnosti baterie), mapu sítě. [56]

K odlišení od ostatních je každé síti při vytvoření přiřazený 32 bitový identifikátor Home ID. Navíc má každý uzel v rámci jedné sítě svůj vlastní identifikátor Node ID, jež mu přiřadí primární kontroler při vstupu do sítě. [56]

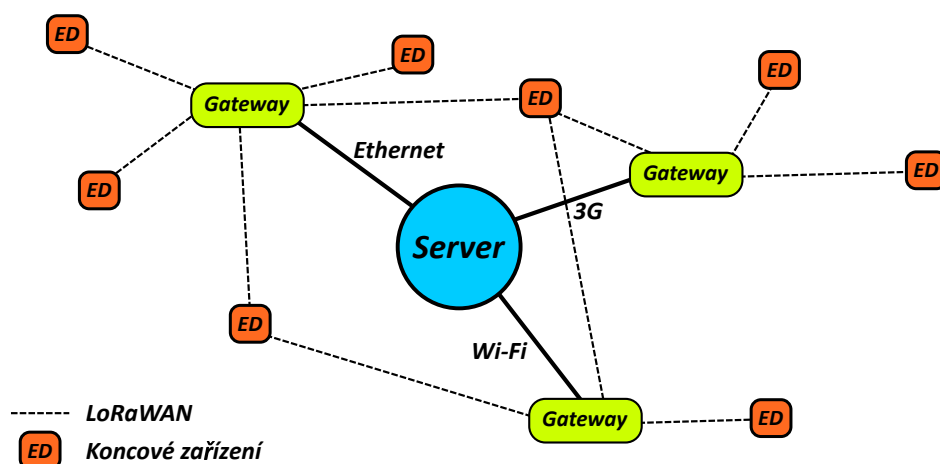
■ 2.2.14 LoRaWAN

LoRaWAN je síťový protokol spravovaný organizací LoRa Alliance, navržený pro aplikace v oblasti Internet of Things (IoT) a sítích typu WAN (Wide Area Networks). Klade důraz na malou spotřebu, takže je vhodný pro zařízení napájené z baterie. Dle zdrojů na webu LoRa Alliance by zařízení, s baterií o kapacitě 2000 mAh, mělo být plně funkční 105 měsíců bez nutnosti nabití, nebo výměny baterie. [58]

Jak naznačuje využití v sítích WAN, je LoRaWAN určen pro komunikaci na větší vzdálenosti (umožňuje pokrýt celá města). K tomu používá bezdrátovou modulaci LoRa (Long Range), jež je založena na technologii chirp spread spectrum (CSS). Přenosovou rychlost lze nastavit v rozmezí 290 b/s a 50 kb/s [57]

Uplatnění tedy nalézá především v zařízeních jako jsou senzory, jež vyžadují odeslat krátké datové rámce v dlouhých časových intervalech a na velké vzdálenosti. [57]

Síť má hvězdicovitou strukturu. V jejím středu se nachází síťový server, mající na starost zpracování paketů z koncových zařízení. Ty nekomunikují se síťovým serverem přímo, ale přes gateway. Koncová zařízení a gateway jsou propojeny protokolem LoRaWAN, nicméně se síťovým serverem může být gateway spojena prostřednictvím Ethernetu, či jiného média. Příklad takové struktury je na obrázku 2.14. [57]



Obrázek 2.14: Příklad jednoduché struktury sítě využívající technologii LoRaWAN.

Komunikace mezi gatewayí a koncovým zařízením probíhá asynchronně metodou Aloha (každé zařízení vysílá ve chvíli, kdy je k tomu připraveno). Vysílaný signál může přijmout více gatewayí najednou. To v praxi znamená, že stejný paket může síťovému serveru dorazit vícekrát. Filtrace je ponechána na samotném serveru. Vzhledem k tomuto principu není třeba implementovat roaming pro mobilní zařízení, jenž jsou podporována stejně jako ta s fixní polohou. [57]

V rámci sítě jsou rozlišované tři třídy koncových zařízení A, B, C. Třída A je výchozí a musí být implementována u všech koncových uzlů. Jde o neúspornější mód, neboť se zařízení může probouzet z úsporného režimu a komunikovat se serverem, pouze tak často, jak definuje jeho aplikace. Samotný server nemůže komunikaci se zařízením zahájit a pokud mu chce odeslat nějaká data, musí počkat, až zařízení naváže spojení. [58]

Třída B umožňuje deterministický přenos pomocí periodických beaconů. Díky nim server přesně ví, kdy zařízení naslouchá a může mu tak zaslat potřebná data nebo příkazy. Tento mód má oproti třídě A větší spotřebu kvůli pravidelnému probouzení. [58]

Zařízení řadící se do třídy C dovolují serveru navázat spojení kdykoliv nevysílá samotné zařízení. Důsledkem je poměrně větší spotřeba než u tříd A a B. Mód C je tedy vhodný pro zařízení napájená jinak než z baterie. Při příležitostném přenosu většího množství dat je možné zkombinovat třídy A a C dohromady. [58]

Ochranu proti připojení neautorizovaných zařízení má na starost síťová vrstva. Zabezpečení na úrovni aplikační vrstvy pak zajišťuje, že k datům nebude mít přístup síťový operátor vlastníci centrální server. [57]

2.3 Vyhodnocení rešerše

Akcelerometr. Jak již bylo zmíněno v sekci 2.1, při výběru akcelerometru je v této práci důležitá velikost, nízká cena a schopnost pracovat s malými změnami zrychlení.

Piezelektrické akcelerometry jsou vhodné především k měření rychlých změn a spíše než pro námi požadovanou aplikaci se hodí k měření vibrací. Optické akcelerometry a servoakcelerometry nesplňují požadavek na nízkou cenu. Potenciometrické snímače jsou levné, ale nejsou příliš spolehlivé. Dále akcelerometry s magnetickou detekcí jsou drahé a náchylné na parazitická magnetická pole a tudíž také nejsou vhodnými kandidáty.

Ze všech představených technologií se tedy nabízí piezorezistivní, nebo kapacitní akcelerometry. Oba typy se vyznačují relativně nízkou cenou, lze je snadno miniaturizovat a jsou schopné měřit pomalé změny zrychlení. Nicméně většina akcelerometrů využívá spíše kapacitní princip a proto bude využit právě tento typ senzoru.

Komunikační protokol. Technologie využívající kabelové spojení se vyznačují především velkou rychlostí přenosu a lepší bezpečností v porovnání s bezdrátovou komunikací. Na druhou stranu nutnost fyzického spojení omezuje v pohybu a při použití většího množství kabelů přestává být vzniklá struktura přehledná.

Jelikož typická vzorkovací frekvence kapacitních MEMS akcelerometrů se pohybuje ve stovkách až jednotkách tisíc Hz, není třeba vysokých přenosových rychlostí. Například pro 3-osý akcelerometr se vzorkovací frekvencí 1 kHz a 16-bitovým výstupem na každé ose, bude potřeba každou sekundu přenést $3 \times 16 \times 1000 = 48000$ bitů (za předpokladu, že chceme využít všech tisíc vzorků). V případě kombinace akcelerometru s gyroskopem to bude 96 000 bitů, odtud požadovaný přenos rychlostí alespoň 100 kb/s.

Protože není požadována vysoká přenosová rychlost můžeme výběr omezit pouze na bezdrátový přenos, neboť nevyžaduje žádné kabely a manipulace se zařízením je tak pohodlnější. Výběr můžeme dále zúžit na sítě typu WPAN, neboť není nutná komunikace na velké vzdálenosti a navíc požadujeme co nejmenší spotřebu. Ze seznamu přípustných technologií tak můžeme vyřadit Wi-Fi a WiMAX. LoRaWAN a Thread nejsou vyhovující z hlediska topologie sítě, Z-Wave splňuje požadavek na přenosovou rychlost jen velmi těsně a WirelessHART je primárně určen pro průmyslové aplikace.

Zbývají tedy technologie ZigBee, a dvě verze Bluetooth - Classic a LE, kde pro účely této práce se spíše hodí verze LE. Jak ZigBee, tak i Bluetooth LE splňují požadavky na nízkou spotřebu, dosah a přenosovou rychlost. Avšak Bluetooth LE může komunikovat o něco rychleji a proto byl upřednostněn právě tento protokol.

Kapitola 3

Popis vlastního řešení

Cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat zařízení pro snímání zrychlení, jehož primární aplikací bude zprostředkování komunikace mezi uživatelem a počítačem. Dle zadání by mělo zařízení mít dosah alespoň 15 m s přenosovou rychlostí minimálně 100 kb/s, rozsahem ± 4 g a rozlišením lepším než 1 mg. Navíc by měl být obvod napájen z baterie, jež umožní používat zařízení na jedno nabití minimálně 48 hodin.

Za účelem splnění těchto požadavků byl v předchozí kapitole vybrán kapacitní akcelerometr ke snímání zrychlení a protokolový zásobník Bluetooth LE pro přenos naměřených dat mezi akcelerometrem a počítačem.

Obsahem této kapitoly je popis navrženého elektronického obvodu a softwarové aplikace vytvořené za účelem demonstrovat jeho funkčnost.

3.1 Hardwarová část

Nejdůležitějšími částmi obvodu je akcelerometr a radiový vysílač, jež ovlivňují většinu parametrů zařízení. Výběru technologie pro tyto segmenty byla proto věnována celá druhá kapitola.

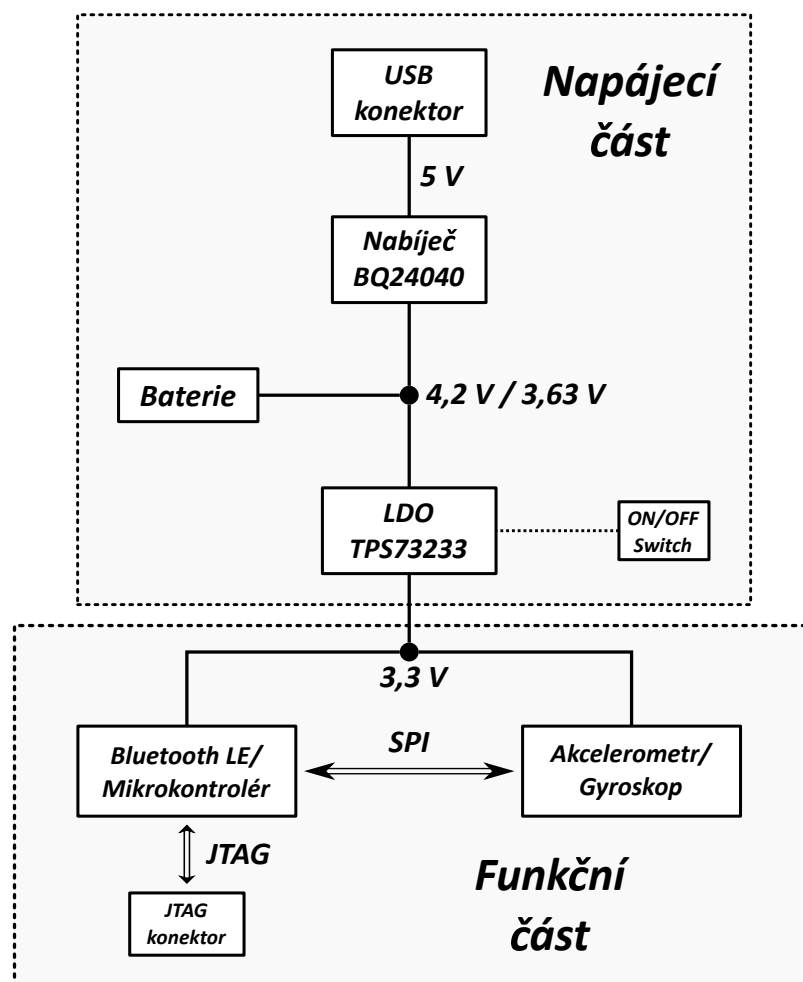
V této části jsou již popsány přímo použité čipy využívající vybrané technologie (kapacitní akcelerometr a Bluetooth LE). Zmíněny jsou i další významné části obvodu a funkce zařízení jako celku.

3.1.1 Popis zařízení

Navržené zařízení se skládá ze dvou částí: napájecí a funkční (viz schéma obvodu na obrázku 3.1). Nejdůležitějším segmentem napájecí části je lithium-iontová baterie s kapacitou 2600 mAh. Je-li baterie vybitá, je možné ji nabít připojením kabelu s mikro USB konektorem verze 2.0. V obvodu jsou využité pouze napájecí vodiče USB konektoru, datové vodiče nejsou zapojeny.

Protože USB používá k napájení 5 V, je toto napětí i vstupním napětím do nabíječe BQ24040, jež nabíjí baterii výstupním napětím 4,2 V. Během nabíjení je toto napětí současně na vstupu regulátoru TPS73233, jehož výstup 3,3 V napájí funkční část zařízení, a pokud je spínač ovládající regulátor v sepnutém stavu, je výstupní proud z nabíječe rozdělen dle potřeby mezi baterii a zbytek obvodu. Maximální výstupní proud čipu BQ24040 je 1000 mA.

Vzhledem k tomu, že maximální vstupní proud čipu BQ24040 činí 1,25 A, je nutné dát pozor, aby připojený USB adaptér nenabíjel vyššími hodnotami proudu.



Obrázek 3.1: Zjednodušené schéma navrženého zařízení.

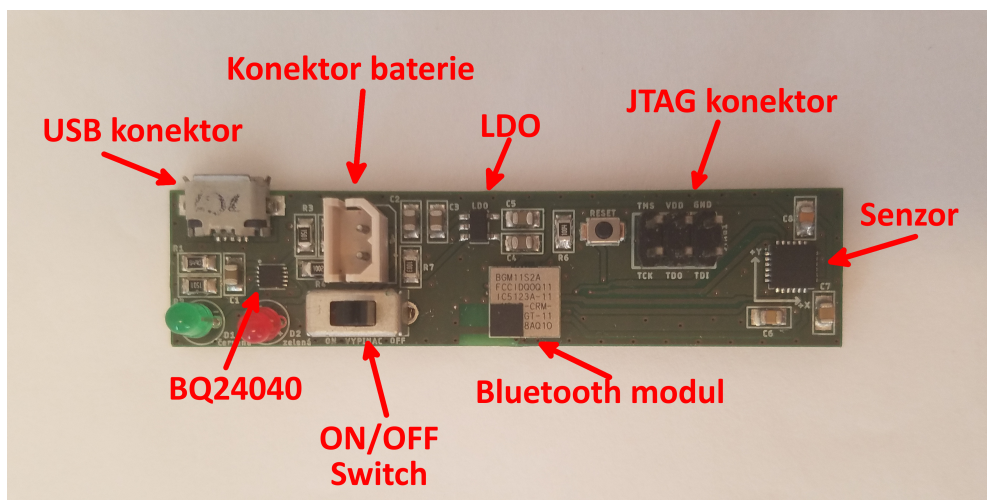
Funkční část zařízení se skládá z modulu BGM11S, jenž obsahuje radiový vysílač Bluetooth Low Energy s mikrokontrolérem ARM Cortex-M4 a senzoru MPU-6000 obsahující akcelerometr s gyroskopem v jednom čipu. Stejně tak jako Bluetooth modul, i senzor je napájen výstupem z regulátoru TPS73233. Bluetooth modul je programovatelný přes rozhraní JTAG.

Komunikace mezi mikrokontrolérem a senzorem probíhá pomocí čtyřvodičové SPI sběrnice, přes kterou mikrokontrolér v režimu master posílá do jednotlivých registrů senzoru příkazy pro čtení a zápis. Senzor pracuje v režimu slave.

Vzhledem k tomu, že navržené zařízení je primárně určeno k ruční manipulaci, byla při návrhu snaha minimalizovat jeho výšku a šířku (oboje dle zadání max. 3 cm) tak, aby jeho uchopení, s palcem v opozici vůči ostatním prstům, bylo pohodlné. Délka zařízení může dosahovat i několikanásobně

větších rozměrů, než jeho výška a šířka. Vhodné je, aby zařízení bylo delší než je průměrná šířka lidské dlaně, neměla by však být výrazně delší. Navržený plošný spoj má šířku 1,5 cm, výšku 1 cm a délku necelých 7 cm. S baterií uloženou vedle plošného spoje je výška a šířka zařízení 1,8 cm, délka pak dosahuje 14 cm (z toho baterie zabírá zhruba 7 cm).

Na obrázku 3.2 je zobrazeno hotové zařízení s popisem částí, které lze najít i ve schématu na obrázku 3.1.



Obrázek 3.2: Konečná podoba zařízení.

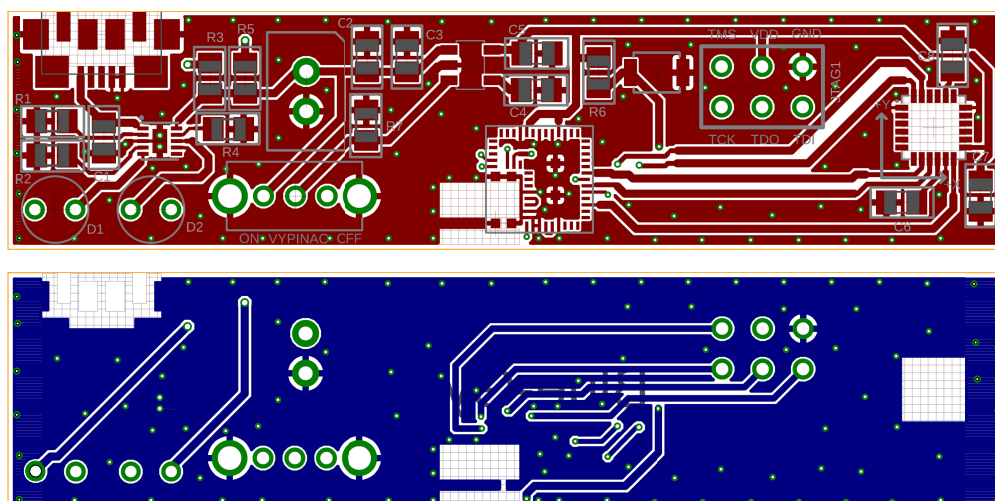
3.1.2 Návrh plošného spoje

Navržená DPS je tvořena dvěma vrstvami (viz obrázek 3.3). Horní vrstva slouží k umístění SMD součástek a spojů, zatímco spodní vrstva je pouze pomocnou vrstvou pro křížící se spoje. Navíc je druhá vrstva vyžadována pro správnou funkčnost antény integrované uvnitř Bluetooth modulu. U obou vrstev vyplňuje prázdnou plochu rozlitá zem.

Minimální mezera mezi jednotlivými spoji je 0,15 mm, a přesně tato vzdálenost je udržována i od rozlité mědi a ostatních objektů. Veškeré napájecí spoje jsou nataženy s minimální šířkou 0,508 mm (až na malé výjimky), datové vodiče pak mají minimální šířku 0,3048 mm. Nicméně tam, kde to dostatek místa dovoluje, mají šířku větší.

Nejdůležitější částí návrhu je volná plocha bez vodičů a rozlité mědi (obrázek 3.3 - u jednotlivých vrstev mřížkovaná bílá oblast dole uprostřed), nutná pro správnou funkci antény. Na této ploše nesmí být umístěny žádné další kovové objekty a musí být i s čipem umístěna maximálně 1 mm od okraje DPS. Dále musí být co nejbližší k této ploše umístěny prokovy propující země obou vrstev a je doporučeno umístit je také okolo celého plošného spoje s maximálním rozestupem 5 mm. Přesné rozměry "čisté" oblasti a její zarovnání vzhledem k Bluetooth modulu lze nalézt v datasheetu k čipu BGM11S.

Čip BGM11S je třeba umístit doprostřed některého z okrajů DPS, umístěním do rohu se značně snižuje dosah zařízení. Ten je optimální, při umístění



Obrázek 3.3: Návrh plošného spoje v prostředí EAGLE. Horní část obrázku (červeně) ukazuje vrchní vrstvu, zatímco spodní část dolní vrstvu navrženého obvodu. Obě vrstvy jsou zobrazeny pomocí pohledu shora na DPS (stejná orientace jako na obrázku 3.2).

na střed okraje o velikosti 45 mm. Dle datasheetu by při této konfiguraci měl být dosah zařízení 400 m, za jakých podmínek však není uvedeno.

3.1.3 Soupis součástek

Soupis všech použitých součástek je v tabulce 3.2. Dále je uveden podrobnější popis těch nejvýznamějších:

Akcelerometr.¹ Z velkého množství dostupných akcelerometrů využívajících kapacitní princip, byl vybrán senzor **MPU-6000** od společnosti InvenSense. Jde o 3-osý akcelerometr a 3-osý gyroskop v jednom čipu. Díky tomu je možné zaznamenávat všech šest stupňů volnosti, které jednoznačně určují orientaci zařízení v prostoru.

U akcelerometru lze nastavit měřicí rozsah ± 2 , ± 4 , ± 8 a ± 16 g, u gyroskopu pak ± 250 , ± 500 , ± 1000 a ± 2000 °/s. Na výstupu obou senzorů je 16-bitový AD převodník, jenž současně definuje citlivost pro jednotlivé rozsahy (viz taulka 3.1). Vzorkovací frekvenci převodníku lze nastavit v rozmezí 4-8000 Hz pro gyroskop a 4-1000 Hz pro akcelerometr.

Pro komunikaci s mikrokontrolérem je možný výběr mezi I²C a SPI sběrnici, přičemž I²C umožňuje komunikovat rychlostí až 400 kb/s, zatímco SPI má bitrate 1 Mb/s.

Při současném využití gyroskopu a akcelerometru je maximální spotřeba senzoru okolo 3,9 mA. Napájecí napětí se může pohybovat v rozsahu 2,375-3,46 V.

¹Informace o akcelerometru byly čerpány z [64]

Senzor	Rozsah	Citlivost
Akcelerometr	± 2 g	16 384 LSB/g
Akcelerometr	± 4 g	8 192 LSB/g
Akcelerometr	± 8 g	4 096 LSB/g
Akcelerometr	± 16 g	2 048 LSB/g
Gyroskop	± 250 °/s	131 LSB/(°/s)
Gyroskop	± 500 °/s	65,5 LSB/(°/s)
Gyroskop	± 1000 °/s	32,8 LSB/(°/s)
Gyroskop	± 1000 °/s	16,4 LSB/(°/s)

Tabulka 3.1: Citlivost akcelerometru a gyroskopu pro jednotlivé rozsahy.

Bluetooth modul. Vzhledem k tomu, že jedním z cílů je navrhnout co nejmenší zařízení, byl vybrán Bluetooth LE modul **BGM11S** s mikrokontrolérem a radiovým vysílačem v jednom čipu. Rozměr modulu je pouhých 6,5x6,5x1,4 mm, a to včetně antény.

Součástí modulu je 32-bitový mikrokontrolér ARM Cortex-M4, pracující na frekvenci 38,4 MHz, flash paměť o velikosti 256 kB, 32 kB RAM a radiový vysílač, podporující protokolový zásobník Bluetooth LE ve verzi 4.2. Navíc Modul BGM11S obsahuje spoustu dalších periférií. Více informací lze najít v [65].

Baterie. ² Baterie byla vybrána tak, aby výška a šířka vyhovovala zadání nepřekročit 3 cm a současně mohla napájet zařízení co nejdéle.

Veškeré požadavky byly splněny baterií s označením **VKB 56637 201 014**. Tato baterie je válcového tvaru s průměrem 19 mm a výškou 71 mm. Kapacita baterie je 2600 mAh, s jmenovitým napětím 3,63 V.

Nabíječ Li-Ion baterií. ³ Jelikož je nutné baterii nějakým způsobem nabíjet, byl pro tyto účely zvolen čip **BQ24040**. Ten může kromě nabíjení baterie napájet i celý obvod.

Nabíjení baterie probíhá ve třech fázích. První před-nabíjecí fáze je určená k zotavení plně vybité baterie. Druhá rychlo-nabíjecí fáze nabíjí baterii konstantním proudem a při poslední fázi je regulováno napětí pro dosažení plné kapacity. Velikost nabíjecího proudu v prvních dvou fázích lze nastavit velikostí odporu rezistoru, připojeného mezi příslušný terminál čipu a zemnicí vodič.

Napěťový regulátor. ⁴ Pro převedení napětí z baterie na napájecí napětí 3,3 V je použit lineární regulátor **TPS73233** s poklesem 40 mV a maximálním výstupním proudem 250 mA.

²Informace o baterii čerpány z <http://www.farnell.com/datasheets/2026379.pdf>

³Informace o čipu čerpány z <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24040.pdf>

⁴Informace o čipu čerpány z <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps732.pdf>

Součástka	Hodnota	Počet	Pouzdro
Rezistor	549 Ω	1	0805
Rezistor	1,5 k Ω	3	0805
Rezistor	10 k Ω	1	0805
Rezistor	100 k Ω	1	0805
Rezistor	1 M Ω	1	0805
Rezistor	100 k Ω	1	0805
Kapacitor	1 μ F	5	0805
Kapacitor	0,1 μ F	2	0805
Kapacitor	2,2 nF	1	0805
TLLR4400	LED zelená	1	
TLLR4400	LED červená	1	
BQ24040	Battery charger	1	WSO10
TPS73233	LDO	1	SOT-23
BGM11S	BLE modul	1	
MPU-6000	Senzor	1	QFN-24
B3U-1000P	Switch	1	
OS102011MS2QN1	Switch	1	
ZX623-B-5P(30)	USB konektor	1	
S2G20	6PIN konektor	1	
22035025	Molex 2PIN konektor	1	
VKB 56637 201 014	Baterie	1	

Tabulka 3.2: Úplný soupis součástek použitých při konstrukci zařízení.

3.2 Softwarová část

Software vytvořený v rámci této práce je složen ze dvou segmentů. Prvním segmentem je aplikace běžící na mikrokontroléru ARM Cortex-M4, jenž je součástí, v předchozí sekci popsaného, zařízení. Na starost má komunikaci s akcelerometrem a gyroskopem přes SPI sběrnici. Dále zajišťuje přenos dat ze senzoru pomocí Bluetooth protokolu, kde vystupuje jako server.

Druhý segment je aplikace pro Windows vytvořená v jazyce C#. Tato aplikace běží na PC a v Bluetooth komunikaci vystupuje jako klient. Jejím hlavním účelem je zobrazit data z akcelerometru a gyroskopu v PC a ověřit tak funkčnost navrženého zařízení popsaného v sekci 3.1.

3.2.1 Software pro navržené zařízení (server)

Tato aplikace vychází ze vzorového příkladu SOC-Empty v jazyce C (dostupný přes vývojové prostředí Simplicity Studio od Silicon Labs), poskytnutého

společností Silicon Labs jako počáteční bod pro vývoj vlastní aplikace využívající jejich čipy s podporou Bluetooth LE. Tento vzorový příklad inicializuje základní periférie mikroprocesoru včetně protokolového zásobníku Bluetooth. Dále obsahuje GATT databázi se základními službami.

GATT (Generic Attribute Profile) je hierarchická datová struktura sloužící jako databáze v zařízeních, jenž při Bluetooth LE komunikaci vystupují v roli serveru. Tato databáze je vystavena připojeným klientům, kteří do ní mohou zapisovat, číst, nebo se mohou u dané položky v databázi registrovat pro zaslání notifikací při každé změně její hodnoty. Zda-li je možné danou položku v databázi číst, zapisovat do ní, nebo se registrovat pro notifikace, je určeno ve chvíli vytváření databáze (psaní zdrojového kódu) a později ji není možné změnit. [47]

V hierarchii databáze je nejvýše profil (ang. profile), který obsahuje služby (ang. services), ty představují specifickou funkci daného zařízení jako třeba čtení dat ze senzoru. Každá služba obsahuje jednu či více charakteristik (ang. characteristics), které reprezentují jednu danou hodnotu. Tato hodnota může být čtena, přepisována, nebo zaregistrována pro notifikace. Notifikace funguje jako nespolehlivá služba, to znamená, že klientem přijatá data nejsou potvrzena. [47]

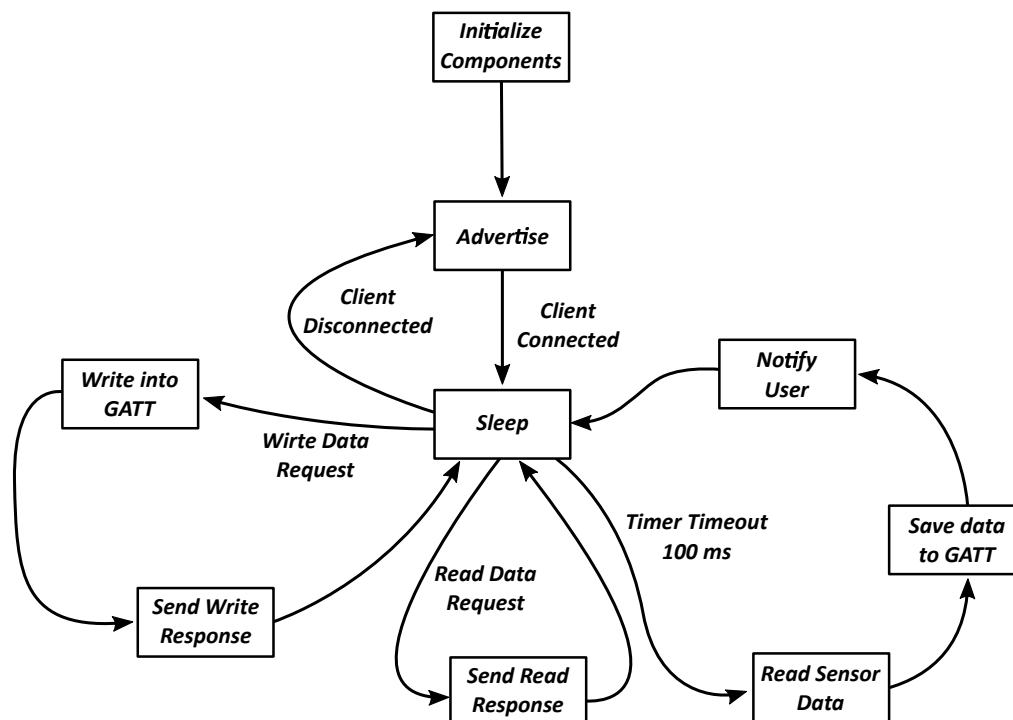
Protože SOC-Empty obsahuje pouze základní GATT databázi, byla původní databáze rozšířena o službu nazvanou Sensor Data Service obsahující jednu charakteristiku Sensor Data. Hodnota charakteristiky Sensor Data je dlouhá 13 bajtů a její význam je vysvětlen pomocí obrázku 3.4. Tato charakteristika je pouze ke čtení, to znamená, že klient může zažádat o zaslání hodnoty, nebo se registrovat pro zaslání notifikací. Cílem atributu Sensor Data je poskytnout klientovi ke čtení data z akcelerometru a gyroskopu.

4 bity	4 bity	2 bajty	2 bajty	2 bajty	2 bajty	2 bajty	2 bajty
Accelerometer Range	Gyroscope Range	Accelerometer X-axis Data	Accelerometer Y-axis Data	Accelerometer Z-axis Data	Gyroscope X-axis Data	Gyroscope X-axis Data	Gyroscope X-axis Data
0000 - $\pm 2^\circ/s$	0000 - $\pm 250^\circ/s$						
0001 - $\pm 4^\circ/s$	0001 - $\pm 500^\circ/s$						
0010 - $\pm 8^\circ/s$	0010 - $\pm 1000^\circ/s$						
0011 - $\pm 16^\circ/s$	0011 - $\pm 2000^\circ/s$						

Obrázek 3.4: Obrázek vysvětluje význam hodnoty charakteristiky Sensor data. První bajt dává informaci o tom v jakém rozsahu pracoval akcelerometr a gyroskop v době čtení hodnot, jenž se nachází na 2. - 13. bajtu. Hodnoty z jednotlivých os senzorů jsou kódovány pomocí dvojkového doplňku.

Další a zároveň poslední přidanou službou je Device Range Service, obsahující dvě charakteristiky Accelerometer Range a Gyroscope Range. Každá z těchto charakteristik má velikost 1 bajt a přípustné jsou pouze hodnoty v rozmezí 0-3, jenž odpovídají rozsahu příslušného senzoru (stejně jako je tomu na obrázku 3.4 u prvních dvou položek). Oba atributy Accelerometer Range a Gyroscope Range mají přístupová práva Read a Write, nikoliv Notify. Jejich cílem je poskytnout uživateli možnost změnit pracovní rozsah senzorů. Ve chvíli, kdy klient zapíše novou hodnotu do jedné z charakteristik, dojde současně ke změně rozsahu příslušného senzoru. Tato změna se projeví i u prvního bajtu atributu Sensor Data.

Vzorový příklad SOC-Empty byl dále rozšířen o inicializaci SPI sběrnice a senzoru MPU-6000, vyřizování požadavků ke čtení dat ze senzorů a dalších událostí s tím spojených. Vznikl tak životní cyklus aplikace, jenž je zobrazen na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Životní cyklus serverové aplikace, běžící na navrženém zařízení.

Po prvním spuštění nebo resetu mikrokontroléru aplikace inicializuje veškeré používané komponenty (SPI sběrnice, senzor MPU-6000, Bluetooth zásobník, časovač,...) a po dokončení inicializace začne vysílat v pravidelných intervalech pakety, informující ostatní zařízení v dosahu o možnosti navázat spojení (ang. Advertising).

Jakmile se některý z klientů připojí, je zařízení uspáno a čeká na některou ze tří událostí. Jedna z těchto událostí je vyvolána časovačem každých 100 ms, po nichž jsou vyčteny data z akcelerometru a gyroskopu, uloženy do GATT databáze pod atributem Sensor Data a nakonec je nová hodnota atributu odeslána klientovi, pokud má notifikace registrované.

Druhou událostí je požadavek na zapsání do databáze (charakteristiky Accelerometer Range a Gyroscope Range). V takovém případě je přijatá hodnota zapsána do databáze i do registru senzoru MPU-6000, jenž slouží ke změně rozsahu akcelerometru a gyroskopu. Následně je odeslána informace klientovi o úspěchu či neúspěchu zápisu. Třetí událost nastává ve chvíli, kdy klient požaduje některou hodnotu ke čtení.

Pokud se klient odpojí, začne zařízení znovu vysílat pakety informující o dostupnosti připojení.

Data z registrů senzoru je možné číst libovolně, frekvence čtení je však omezena rychlostí SPI sběrnice, která je maximálně 1 MHz. V případě, že

budeme chtít přečíst hodnoty ze všech os akcelerometru a gyroskopu, bude třeba poslat do senzoru postupně dvanáct 8-bitových příkazů s číslem registru, jenž chceme číst (16-bitové hodnoty z každé osy senzoru jsou rozděleny do dvou 8-bitových registrů). Za každým příkazem ke čtení je odesláno 8 bitů dat. To znamená, že je nutné přenést celkem 24 bajtů (192 bitů). Probíhá-li komunikace maximální možnou rychlostí bude přenos všech dat ze senzoru trvat $192/1000000=0,192$ ms.

Přenosová rychlost Bluetooth Low Energy je sice 1 Mb/s, ale propustnost užitečných dat bude o něco menší, kvůli mezerám mezi pakety a jejich hlavičkám. Tato aplikace používá nespolehlivou službu, takže datové pakety mohou být posílány periodicky jeden za druhým, kde jedna perioda se skládá z datového paketu ze strany serveru, časové mezery 150 μ s, potvrzovacího (prázdného) paketu ze strany klienta a druhé časové mezery 150 μ s.

Prázdný paket zabírá 10 bajtů a jeho přenos tak trvá $(10 \times 8)/1000000 = 80$ μ s. Oproti tomu datový paket ze strany serveru bude mít velikost 27 bajtů (14 bajtů hlavičky, 13 bajtů data), jeho přenos bude trvat $(27 \times 8)/1000000 = 216$ μ s. Propustnost pak lze spočítat jako

$$\frac{(13 \times 8) \text{ bitů}}{(216 + 150 + 80 + 150) \mu\text{s}} = 0,174 \text{ b}/\mu\text{s} = 174 \text{ kb/s.} \quad (3.1)$$

■ 3.2.2 Software pro PC (klient)

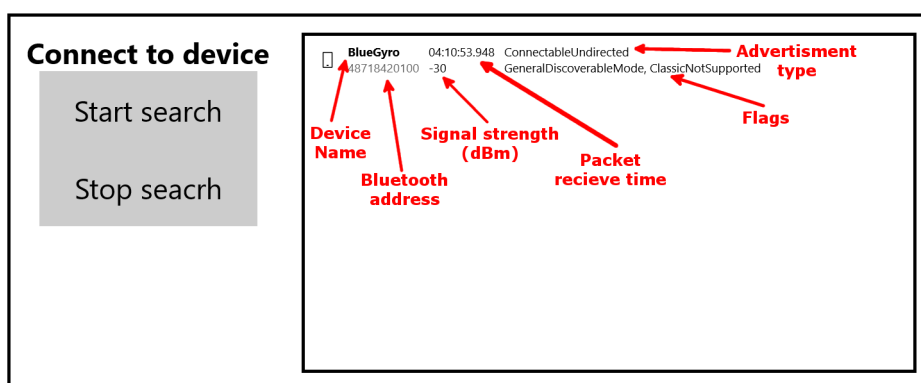
Tato část demonstračního softwaru je naprogramována v jazyce C# jako UWP (Universal Windows Platform) aplikace. Vychází z příkladů dostupných v dokumentaci Microsoftu k API pro Bluetooth LE, určené pro aplikace UWP [66].

Po spuštění demonstrační PC aplikace naběhne úvodní obrazovka se dvěma tlačítky Start search a Stop search a panelem zobrazujícím zařízení podporující Bluetooth LE v dosahu daného PC (viz 3.6). Vyhledávání započne stisknutím tlačítka Start search a může být ukončeno stisknutím tlačítka Stop search. K vyhledávání zařízení je použita třída *BluetoothLEAdvertisementWatcher*, jenž je součástí namespaceu *Windows.Devices.Bluetooth.Advertisement*.

Nalezená zařízení jsou ukládána do kolekce definované třídou *ObservableCollection<>* v namespaceu *System.Collections.ObjectModel* a pomocí techniky data binding zobrazena v uživatelském rozhraní.

Každá položka v pravém panelu obsahuje základní informace o nalezeném zařízení. Tučným písmem vlevo nahoře je zobrazen název zařízení, pod názvem je uvedena Bluetooth adresa v desítkové soustavě. Položka uprostřed nahoře ukazuje čas přijetí daného paketu, uprostřed dole je zobrazena síla signálu, přenášející daný paket, s jednotkou dBm. Advertisement type značí mód připojení a pole s označením Flags obsahuje dodatečné informace o zařízení jako třeba režim viditelnosti a podporované verze Bluetooth.

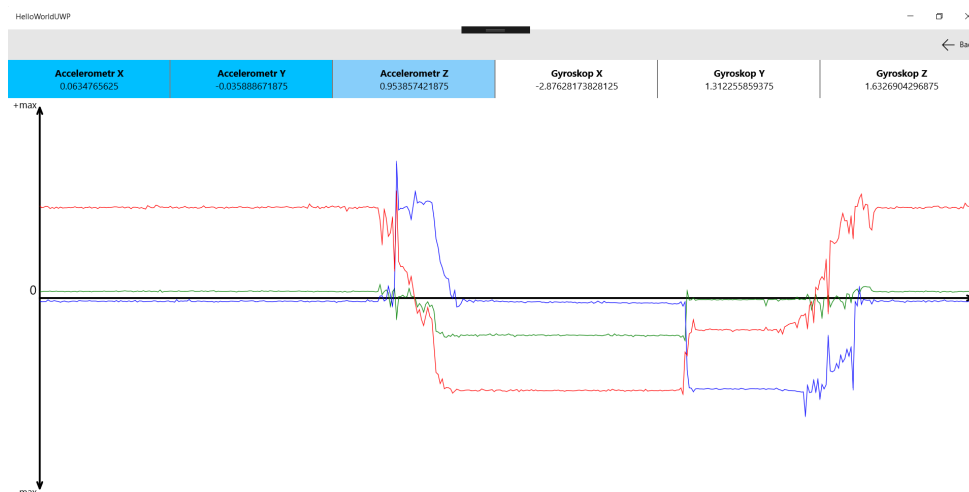
Kliknutím na požadované zařízení se naváže spojení a zkontroluje dostupnost služeb a charakteristik zmíněných v sekci 3.2.1. Pokud je navázání spojení úspěšné a Bluetooth zařízení implementuje všechny požadované služby



Obrázek 3.6: Vzhled UWP aplikace na PC po spuštění a stisknutí tlačítka Start search.

(Sensor Data Service a Device Range Service) přejde aplikace na druhou obrazovku (viz obrázek 3.7), jinak je zobrazena chyba připojení a aplikace zůstává v původním stavu.

Druhá obrazovka aplikace již zobrazuje data ze senzoru. Horní panel ukazuje aktuální hodnoty na jednotlivých osách akcelerometru a gyroskopu. Pod panelem je pak vykreslován graf v reálném čase. Vykreslování každé osy do grafu je možné vypnout/zapnout kliknutím na příslušné políčko v horním panelu. Aktuálně vykreslované osy v grafu jsou zvýrazněny modře. K vytvoření grafu byla použita knihovna Win2D, určená pro tvorbu 2D grafiky v UWP aplikacích.



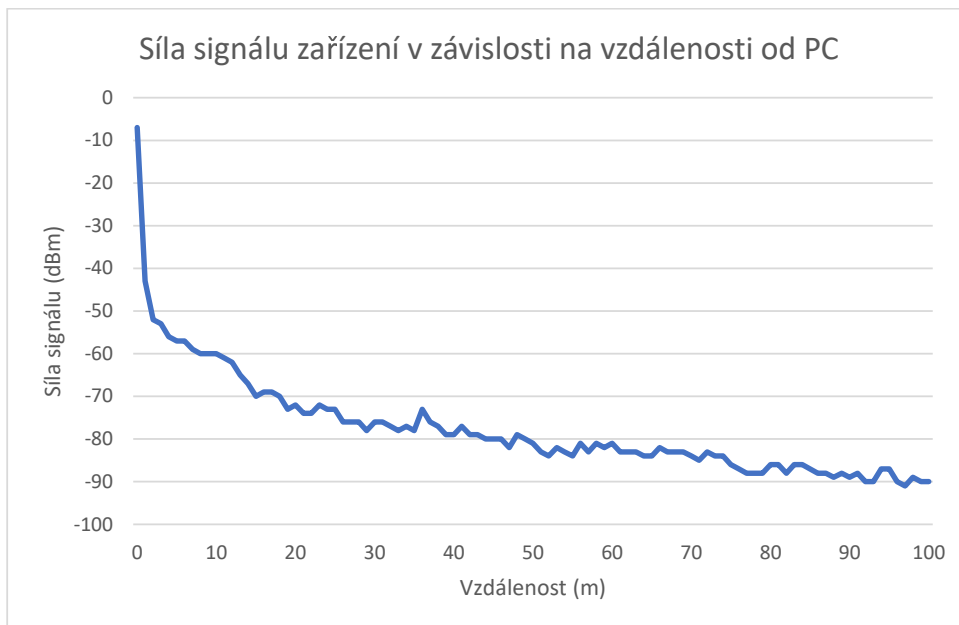
Obrázek 3.7: Screenshot UWP aplikace na PC po připojení k zařízení.

3.3 Splnění požadavků zadání

Navržené zařízení splňuje veškeré požadavky na parametry uvedené v zadání. Požadovaný rozsah akcelerometru je dle zadání minimálně ± 4 g s rozlišením lepším než 1 mg. Tento požadavek je splněn použitím senzoru MPU-6000, který je v tomto rozsahu schopný pracovat s 8x lepším rozlišením, než je požadováno.

Pomocí čítače bylo změřeno, že přenos dat ze všech os senzoru (12 bajtů) do mikrokontroléru zabere 8936 procesorových cyklů, z toho 1608 cyklů zabere vykonávání kódu, zbytek (7328 cyklů) je čekání na přijetí dat. Protože frekvence procesoru je 38,4 MHz, trvá přenos dat $7328/38400000=0,191$ ms. To zhruba odpovídá teoretické hodnotě spočítané v podkapitole 3.2.1. Čtení dat ze senzoru včetně vykonaného kódu pak trvá $8936/38400000=0,233$ ms.

Vykonání funkce `gecko_cmd_gatt_server_send_characteristic_notification`, jenž předává data radiovému vysílači, který je následně asynchronně odesílá, zabere 707 cyklů. Celý jeden cyklus od probuzení, přes vyčtení dat, jejich odeslání a následného přechodu do režimu spánku (pravá smyčka životního cyklu na obrázku 3.5), tak zabere zhruba 9643 procesorových cyklů, což odpovídá 0,251 ms. To je důležitý výsledek, neboť to znamená, že rychlost čtení dat ze senzoru je rychlejší než jejich přenos, který trvá zhruba 0,596 ms (spočteno v podkapitole 3.2.1) a proto není problém splnit teoretickou propustnost 174 kb/s (spočteno v podkapitole 3.2.1), která je vyšší než dle zadání požadovaná propustnost 100 kb/s.



Obrázek 3.8: Graf síly signálu zařízení v závislosti na vzdálenosti od přijímače. Síla signálu byla měřena po jednom metru.

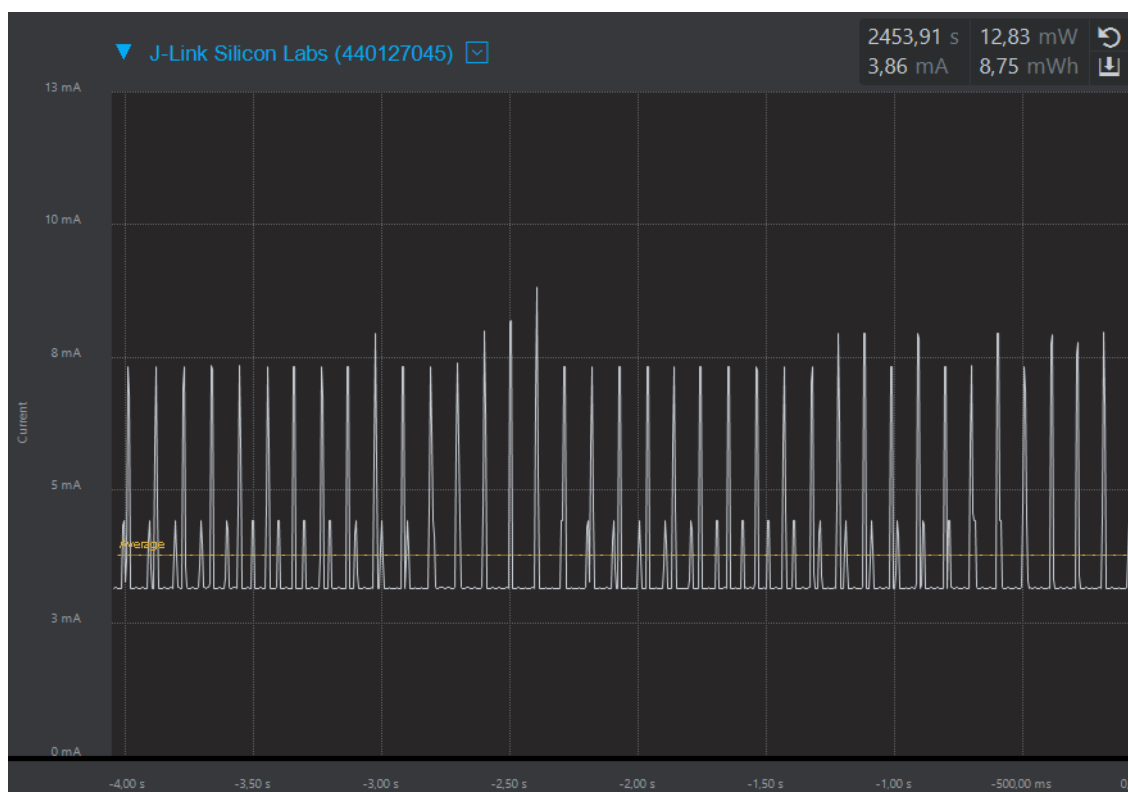
Dosah zařízení byl změřen jako síla signálu (s jednotkou dBm) v závislosti na vzdálenosti od přijímače. Mezi vysílačem a přijímačem se nevyskytovaly

žádné překážky a současně v okolí nebyli žádné další bezdrátové sítě pracující na frekvenci 2,4 GHz, jež by způsobovali rušení. Výsledek měření byl zanesen do grafu na obrázku 3.8.

Výdrž zařízení výrazně překonává požadovaných 48 hodin. Spotřeba čipu BGM11S během nepřetržitého přenosu dat, po dobu 2453 s, do PC byla změřena pomocí Energy profileru, který je součástí vývojového prostředí Simplicity Studio od Silicon Labs (viz obrázek 3.9). Tímto způsobem byla zjištěna průměrná hodnota odebíraného proudu 3,86 mA.

Odběr proudu senzoru MPU-6000 je podle datasheetu okolo 3,9 mA. Jelikož Bluetooth modul a senzor jsou jedinými součástkami odebírající proud, budeme předpokládat průměrný odběr celého zařízení 8 mA. V takovém případě je teoretická výdrž zařízení na jedno nabití zhruba 325 hodin (přibližně 2 týdny), reálně však bude počet hodin menší. Prakticky bylo ověřeno, že použitá baterie vydrží napájet navržené zařízení více jak 48 hodin.

Při návrhu byla brána v potaz požadovaná výška a šířka 3 cm, jenž zohledňuje pohodlné uchopení rukou. S cílem co nejvíce zařízení miniaturizovat bylo dosaženo výšky a šířky 1,8 cm.



Obrázek 3.9: Obrázek ukazuje graf spotřeby čipu BGM11S během přenosu dat z akcelerometru a gyroskopu do PC. V grafu jsou zobrazeny pouze poslední 4 s z celkových 2453 s. Čísla v pravém horním rohu znamenají (postupně zleva do prava a shora dolů): Doba po kterou byla spotřeba monitorována, průměrná spotřeba energie, průměrný odběr proudu, celková spotřebovaná energie během monitorování spotřeby.

Kapitola 4

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat elektronické zařízení, jenž by našlo uplatnění především jako prostředník zprostředkovávající interakci mezi uživatelem a počítačem. Za tímto účelem byly v kapitole 2 popsány technologie akcelerometrů a komunikačních standardů. Na základě vybraných technologií Bluetooth LE a kapacitního akcelerometru bylo zkonstruováno zařízení jehož hardwarový popis je v sekci 3.1. Pro navržené zařízení byl také implementován demonstrační software s uživatelským rozhraním pro operační systém Windows. Tato aplikace je popsána v sekci 3.2.

V práci se podařilo splnit všechny požadavky definované v zadání, včetně implementace gyroskopu. Průměrný odběr proudu navrženého zařízení se podařilo udržet na hodnotě 8 mA a v kombinaci s použitou baterií o kapacitě 2600 mAh tak bylo dosaženo teoretické výdrže necelých dvou týdnů, při nepřetržitém provozu. Požadovaný dosah 15 metrů je s přehledem splněn, přičemž zařízení je schopné spolehlivě pracovat i ve více jak 25 m od přijmače, za podmínky, že mezi vysílačem a přijímačem nejsou překážky. Stejně tak je spolehlivě splněn i požadavek na rychlost přenosu 100 kb/s, a to díky použitému protokolu Bluetooth LE ve verzi 4.2, jenž je schopný komunikovat rychlostmi až 1 Mb/s. Zařízení se podařilo navrhnout tak, aby výška a šířka byla pouhých 1,8 cm.

Vzhledem k tomu, že prezentované zařízení je pouze prvním prototypem, je zde prostor pro některá vylepšení. Například by bylo možné ještě více zredukovat rozměry zařízení použitím menších rezistorů a kondenzátorů, zajistit sledování stavu baterie, optimalizovat software uvnitř mikrokontroléru ke snížení spotřeby, nebo zahrnout do návrhu další signalizační diody.

Pro další pokračování v daném tématu se nabízí implementace klasifikátoru pro rozpoznávání předem definovaných gest a vytvoření příslušné aplikace. Jako klasifikátor je možné použít konvoluční neuronové sítě nebo skryté Markovovy modely.



Literatura

- [1] NAUMANN, Friedrich. *Dějiny informatiky: od abaku k internetu*. Praha: Academia, 2009. Galileo. ISBN 978-80-200-1730-7.
- [2] *The human-computer interaction handbook: fundamentals, evolving technologies, and emerging applications*. 3rd ed. Editor Julie A. JACKO. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, c2012. Human factors and ergonomics. ISBN 1439829438.
- [3] BELLIS, Mary. *The History of the Computer Keyboard: Why Your Computer Keyboard Has a QWERTY Layout* [online]. In: . 24.2.2018 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/history-of-the-computer-keyboard-1991402>
- [4] ENGELBART, Douglas. *X-y position indicator for a display system*. United States. US3541541A. Uděleno 7.11.1970.
- [5] BELLIS, Mary. *The Inventor of Touch Screen Technology*. In: ThoughtCo [online]. 12. 7. 2018 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/who-invented-touch-screen-technology-1992535>
- [6] WOODFORD, Chris. *Touchscreens*. In: Explainthatstuff [online]. August 30, 2018 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/touchscreens.html>
- [7] RAUTARAY, Siddharth S. a Anupam AGRAWAL. *Vision based hand gesture recognition for human computer interaction: a survey*. Artificial Intelligence Review [online]. 2015, 43(1), 1-54 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1007/s10462-012-9356-9. ISSN 0269-2821. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10462-012-9356-9>
- [8] REN, Zhou, Junsong YUAN, Jingjing MENG a Zhengyou ZHANG. *Robust Part-Based Hand Gesture Recognition Using Kinect Sensor*. IEEE Transactions on Multimedia [online]. 2013, 15(5), 1110-1120 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1109/TMM.2013.2246148. ISSN 1520-9210. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6470686/>

- [9] CHEN, Qing, Nicolas D. GEORGANAS a Emil M. PETRIU. *Real-time Vision-based Hand Gesture Recognition Using Haar-like Features*. In: 2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007 [online]. IEEE, 2007, 2007, s. 1-6 [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1109/IMTC.2007.379068. ISBN 1-4244-1080-0. ISSN 1091-5281. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4258134/>
- [10] PU, Qifan, Sidhant GUPTA, Shyamnath GOLLAKOTA a Shwetak PATEL. *Whole-home gesture recognition using wireless signals*. In: Proceedings of the 19th annual international conference on Mobile computing & networking - MobiCom '13 [online]. New York, New York, USA: ACM Press, 2013, 2013, s. 27- [cit. 2019-03-01]. DOI: 10.1145/2500423.2500436. ISBN 9781450319997. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2500423.2500436>
- [11] WU, Jiahui, Gang PAN, Daqing ZHANG, Guande QI a Shijian LI. *Gesture Recognition with a 3-D Accelerometer*. ZHANG, Daqing, Marius PORTMANN, Ah-Hwee TAN a Jadwiga INDULSKA, ed. *Ubiquitous Intelligence and Computing* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, 2009, s. 25-38 [cit. 2019-03-01]. Lecture Notes in Computer Science. DOI: 10.1007/978-3-642-02830-4_4. ISBN 978-3-642-02829-8. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-02830-4_4
- [12] XU, Ruize, Shengli ZHOU a Wen J. LI. *MEMS Accelerometer Based Nonspecific-User Hand Gesture Recognition*. IEEE Sensors Journal [online]. 2012, 12(5), 1166-1173 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2166953. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6009159/>
- [13] WON-CHUL BANG, WOOK CHANG, KYEONG-HO KANG, EUN-SEOK CHOI, A. POTANIN a DONG-YOON KIM. *Self-contained spatial input device for wearable computers*. In: Seventh IEEE International Symposium on Wearable Computers, 2003. Proceedings [online]. IEEE, 2003, s. 26-34 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1109/ISWC.2003.1241390. ISBN 0-7695-2034-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1241390/>
- [14] XIE, Renqiang a Juncheng CAO. *Accelerometer-Based Hand Gesture Recognition by Neural Network and Similarity Matching*. IEEE Sensors Journal [online]. 2016, 16(11), 4537-4545 [cit. 2019-04-24]. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2546942. ISSN 1530-437X. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7442084/>
- [15] SHENGLI ZHOU, ZHUXIN DONG, Wen J. LI a CHUNG PING KWONG. *Hand-written character recognition using MEMS motion sensing technology*. In: 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics [online]. IEEE, 2008, 2008, s. 1418-1423 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1109/AIM.2008.4601870. ISBN 978-1-4244-2494-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4601870/>

- [16] JONG K. OH, SUNG-JUNG CHO, WON-CHUL BANG, WOOK CHANG, EUNSEOK CHOI, JING YANG, JOONKEE CHO a DONG YOON KIM. Inertial Sensor Based Recognition of 3-D Character Gestures with an Ensemble of Classifiers. In: *Ninth International Workshop on Frontiers in Handwriting Recognition* [online]. IEEE, 2004, s. 112-117 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1109/IWFHR.2004.58. ISBN 0-7695-2187-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1363896/>
- [17] EPPERSON, Mark. *Autonomous computer input device and marking instrument*. United States. US5247137A. Uděleno 21.9.1993.
- [18] TOUMA, Pierre, Hadi MURR, Elias BACHAALANY a Imad MAALOUF. *3D mouse and game controller based on spherical coordinates system and system for use*. United States. Uděleno 23. 3. 2010.
- [19] LIU, Jianfeng, Zhigeng PAN a Li XIANGCHENG. *An accelerometer-based gesture recognition algorithm and its application for 3D interaction*. Computer Science and Information Systems [online]. 2010, 7(1), 177-188 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.2298/CSIS1001177L. ISSN 1820-0214. Dostupné z: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=1820-02141001177L>
- [20] SHIRATORI, Takaaki a Jessica K. HODGINS. *Accelerometer-based user interfaces for the control of a physically simulated character*. ACM Transactions on Graphics [online]. 2008, 27(5) [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1145/1409060.1409076. ISSN 07300301. Dostupné z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1409060.1409076>
- [21] NETO, Pedro, J. Norberto PIRES a A. Paulo MOREIRA. Accelerometer-based control of an industrial robotic arm. In: RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International *Symposium on Robot and Human Interactive Communication* [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 1192-1197 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1109/ROMAN.2009.5326285. ISBN 978-1-4244-5081-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5326285/>
- [22] BHUYAN, Ariful Islam a Tuton Chandra MALLICK. *Gyro-accelerometer based control of a robotic Arm using AVR microcontroller*. In: 2014 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST) [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 409-413 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1109/IFOST.2014.6991151. ISBN 978-1-4799-6062-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6991151/>
- [23] QUIGLEY, M, R BREWER, S P SOUNDARARAJ, V PRADEEP, QUOC LE a A Y NG. Low-cost accelerometers for robotic manipulator perception. In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems [online]. IEEE, 2010, 2010, s. 6168-6174 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1109/IROS.2010.5649804. ISBN 978-1-4244-6674-0. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5649804/>
- [24] RIPKA, Pavel a Alois TIPEK, ed. *Modern Sensors Handbook*. Great Britain: ISTE, 2007. ISBN 978-1-118-61478-5.

- [40] *802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi* [online]. Cisco Systems, 2018, , 1-20 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white-paper-c11-713103.pdf>
- [41] *IEEE 802.11ax: The Sixth Generation of Wi-Fi* [online]. Cisco Systems, 2018, , 1-15 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/collateral/wireless/white-paper-c11-740788.pdf>
- [42] GHASEMPOUR, Yasaman, Claudio R. C. M. DA SILVA, Carlos CORDEIRO a Edward W. KNIGHTLY. *IEEE 802.11ay: Next-Generation 60 GHz Communication for 100 Gb/s Wi-Fi*. IEEE Communications Magazine [online]. 2017, 55(12), 186-192 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700393. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8088544/>
- [43] *IEEE Standard for Information technology— Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks— Specific requirements: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications* [online]. IEEE, 14 .12. 2016 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7786995>
- [44] TANG, Seok-Yee, Peter MÜLLER a Hamid R. SHARIF. *WiMAX security and quality of service: an end-to-end perspective*. Chichester: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-72197-1
- [45] FARAHANI, Shahin. *ZigBee wireless networks and transceivers*. Burlington: Newnes, c2008. ISBN 978-0-7506-8393-7.
- [46] CHEN, Deji, Mark NIXON a Aloysius Ka-Lau MOK. *WirelessHART: real-time mesh network for industrial automation*. New York: Springer, c2010. ISBN 978-1-4419-6046-7
- [47] *Bluetooth Core Specification v5.1*. Bluetooth SIG, 21. 1. 2019. Dostupné také z: <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>
- [48] *Radio Versions: The right radio, for the right job*. [online]. Washington, USA: Bluetooth SIG, c2019 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/radio-versions>
- [49] *Topology Options: Devices need multiple ways to connect*. [online]. Washington, USA: Bluetooth SIG, c2019 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/topology-options>
- [50] *Solution Areas* [online]. Washington, USA: Bluetooth SIG, c2019 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/solutions>

- [51] WOOLLEY, Martin. *An Intro to Bluetooth Mesh Part 2: Chapter 2 of the Bluetooth Mesh Networking Series* [online]. Washington, USA: Bluetooth SIG, August 01, 2017 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://blog.bluetooth.com/an-intro-to-bluetooth-mesh-part2>
- [52] OLSSON, Jonas. *6LoWPAN demystified* [online]. Dallas, USA: Texas Instruments, c2014 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf>
- [53] *UG103.11: Thread Fundamentals* [online]. Austin, USA: Silicon Laboratories [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-11-appdevfundamentals-thread.pdf>
- [54] *Thread Specification*. Revision 1.1.1. Thread Group, 2017. Dostupné také z: <https://www.threadgroup.org/ThreadSpec>
- [55] *Z-Wave* [online]. Silicon Laboratories, c2019 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.z-wave.com/>
- [56] *Introduction to Z-Wave: An Introductory Guide to Z-Wave Technology* [online]. Honeywell, 8/2/13 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://library.ademconet.com/MWT/fs2/VAM/Introductory-Guide-to-Z-Wave-Technology.pdf>
- [57] *What is LoRaWAN: A technical overview of LoRa and LoRaWAN* [online]. LoRa Alliance, November 2015 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://loralliance.org/resource-hub/what-lorawantm>
- [58] *LoRa Alliance* [online]. Fremont, California: LoRa Alliance, c2019 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://loralliance.org/>
- [59] RIPKA, Pavel a Alois TIPEK. *Master book on sensors: modular courses on modern sensors : Leonardo da Vinci project CZ/PP-134026*. Praha: BEN, 2003. ISBN 80-7300-129-2
- [60] WILSON, Jon S. *Sensor technology handbook*. Burlington: Newnes, c2005. ISBN 0-7506-7729-5
- [61] NOVÁK, Martin. *Technická měření*. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.
- [62] BHATTACHARYYA, Tarun Kanti a Anindya Lal ROY. *MEMS Piezoresistive Accelerometers*. VINOY, K. J., G. K. ANANTHASURESH, Rudra PRATAP a S. B. KRUPANIDHI, ed. *Micro and Smart Devices and Systems* [online]. New Delhi: Springer India, 2014, 2014-5-22, s. 19-34 [cit. 2019-04-11]. Springer Tracts in Mechanical Engineering. DOI: 10.1007/978-81-322-1913-2_2. ISBN 978-81-322-1912-5. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-81-322-1913-2_2

- [63] BEDNAŘÍK, Michal. *Fyzika 1*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04834-4.
- [64] MPU-6000and MPU-6050Product Specification [online]. Revision 3.4. U.S.A, Sunnyvale: InvenSense, 08/19/2013 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf
- [65] BGM11S Blue Gecko Bluetooth SiPModule Data Sheet [online]. Rev. 1.1. Austin, USA: Silicon Laboratories, October 27th, 2017 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/login/datasheets/bgm11s-datasheet.pdf>
- [66] Bluetooth Low Energy. Microsoft [online]. Microsoft, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/uwp/devices-sensors/bluetooth-low-energy-overview>



Seznam příloh

- *schematic.pdf* - Schéma navrženého obvodu.
- *top_layer.pdf* - Obrázek horní vrstvy navrženého obvodu.
- *bottom_layer.pdf* - Obrázek dolní vrstvy navrženého obvodu.
- *device_photo1.jpg* - Obrázek navrženého zařízení včetně baterie.
- *device_photo2.jpg* - Obrázek navrženého zařízení.
- *device_photo3.jpg* - Obrázek navrženého zařízení.