



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## SYSTÉM PRO MONITOROVÁNÍ KOMFORTU V BUDOVĚ

BUILDING MONITORING SYSTEM FOR WELLBEING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kočka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Arm, Ph.D.

BRNO 2023

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Jakub Kočka

**ID:** 211154

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## System pro monitorování komfortu v budově

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem je vytvořit systém pro monitorování komfortu (např. kvality ovzduší) v místnosti. Systém se bude skládat z měřicích modulů (na bázi ESP32-H2 nebo nRF52833), které budou snímat danou veličinu a komunikovat s gateway jednotkou pomocí Zigbee 3.0 mesh technologie. Změřená data se budou přehledně zobrazovat pomocí webové vizualizace (např. Grafana) a ukládat do databáze (např. InfluxDB), příp. bude datový přenos integrován do Google Home systému. Dalším výsledkem bude změření vlastností Zigbee 3.0 mesh sítě v daném scénáři.

1. Definujte požadavky na systém.
2. Zprovozněte Zigbee 3.0 mesh síť a změřte vlastnosti.
3. Vytvořte a oživte senzorická zařízení.
4. Vytvořte softwarové vybavení systému a webovou aplikaci.
5. Zdokumentujte a vyhodnoťte vlastnosti.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

VIRIUS, M. Programování v C++. Grada, 2017. 416 s. ISBN: 978-80-271-0502-1

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 17.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Jakub Arm, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá tvorbou systému pro monitorování komfortu v budově vycházejícího z kvality ovzduší ve vnitřním prostoru. Měřené veličiny jsou teplota, relativní vlhkost, intenzita osvětlení, tlak, koncentrace CO<sub>2</sub> a koncentrace pevných částic. Součástí práce je návrh hardwarového a softwarového řešení včetně implementace bezdrátového komunikačního protokolu Zigbee a ověření funkčnosti včetně změření vlastností.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Monitorování komfortu, Zigbee, komunikační protokol, WPAN

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on building monitoring system for well-being in depends on air quality. Measured values are temperature, relative humidity, illuminance, barometric pressure, CO<sub>2</sub> concentration and dust pollution. The thesis includes hardware and software design with implementation of wireless communication protocol Zigbee. Function testing with measurement of behavior is also the part of the thesis.

## **KEYWORDS**

Monitoring system for well-being, Zigbee, communication protocol, WPAN

KOČKA, Jakub. *Systém pro monitorování komfortu v budově*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 129 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Bc. Jakub Kočka  
**VUT ID autora:** 211154  
**Typ práce:** Diplomová práce  
**Akademický rok:** 2022/23  
**Téma závěrečné práce:** Systém pro monitorování komfortu v budově

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

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jakubu Armovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	13
<b>1 Definice požadavků na systém</b>	<b>14</b>
1.1 Zigbee 3.0	14
1.1.1 Stack architektura	15
1.1.2 Topologie	19
1.1.3 Zařízení	20
1.1.4 Security	20
1.2 ESP32-H2	23
1.3 nRF52833	24
1.4 Senzorická zařízení	25
1.4.1 Senzor teploty a vlhkosti – HTU21D	25
1.4.2 Senzor intenzity osvětlení – BH1750	27
1.4.3 Senzor oxidu uhličitého – MH-Z19B	29
1.4.4 Senzor pevných částic – GP2Y1014AU0F	31
1.4.5 Senzor barometrického tlaku – BME280	32
1.5 InfluxDB	32
1.6 Vizualizační nástroj Grafana	32
<b>2 Zigbee síť</b>	<b>33</b>
2.1 Výkonnost sítě	33
2.1.1 RSSI nebo také ED	33
2.1.2 LQI	33
2.2 Tvorba sítě	34
2.2.1 SoC – Zigbee zařízení	34
2.2.2 Gateway – Sonoff USB Dongle Plus	36
2.2.3 Bridge – Zigbee2MQTT	36
2.2.4 MQTT broker – Mosquitto	36
2.2.5 Testovací síť	37
<b>3 Hardwarové řešení</b>	<b>38</b>
3.1 Senzorická Deska Plošného Spoje	38
3.1.1 Napájecí část	39
3.1.2 Senzorická část	39
3.2 Řídicí Deska Plošného Spoje	40
3.3 Reálné zapojení	41
3.4 Návrh výrobku	42

<b>4</b>	<b>Softwarové vybavení</b>	<b>44</b>
4.1	Měřicí zařízení . . . . .	44
4.1.1	Komunikace se senzory . . . . .	44
4.1.2	Firmware . . . . .	46
4.2	Hostitelské zařízení . . . . .	47
4.2.1	Gateway . . . . .	47
4.2.2	MQTT broker . . . . .	48
4.2.3	Bridge . . . . .	48
4.2.4	Databáze . . . . .	49
4.2.5	Vkládání dat do databáze . . . . .	49
4.2.6	Vizualizace . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Dokumentace a vyhodnocení vlastností</b>	<b>51</b>
5.1	Změřené vlastnosti Zigbee sítě . . . . .	51
5.1.1	Princip měření . . . . .	51
5.1.2	Scénář 1: uzavřený prostor – přímá viditelnost . . . . .	52
5.1.3	Scénář 2: venkovní prostor – přímá viditelnost . . . . .	66
5.1.4	Scénář 3: venkovní prostor – překážka . . . . .	68
5.1.5	Scénář 4: venkovní prostor – přeskok packetu . . . . .	70
5.2	Senzorická měření . . . . .	76
5.2.1	Měření 24 hodin . . . . .	76
5.2.2	Vícedenní měření . . . . .	78
	<b>Závěr</b>	<b>79</b>
	<b>Literatura</b>	<b>81</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>85</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Elektrické schéma a deska plošného spoje</b>	<b>89</b>
A.1	Deska plošného spoje . . . . .	90
<b>B</b>	<b>Class diagram měřicího zařízení</b>	<b>91</b>
B.1	Popis funkcí . . . . .	92
B.1.1	Senzory . . . . .	92
B.1.2	Firmware . . . . .	93
<b>C</b>	<b>Grafy měření Zigbee sítě</b>	<b>94</b>
C.1	Uzavřený prostor – přímá viditelnost . . . . .	94



C.1.1	20 metrů – perioda 0,5 sekundy . . . . .	94
C.1.2	20 metrů – perioda 0,25 sekundy . . . . .	95
C.1.3	20 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	96
C.1.4	20 metrů – perioda 0,050 sekundy . . . . .	97
C.1.5	10 metrů – perioda 0,5 sekundy . . . . .	98
C.1.6	10 metrů – perioda 0,25 sekundy . . . . .	99
C.1.7	10 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	100
C.1.8	10 metrů – perioda 0,050 sekundy . . . . .	101
C.1.9	5 metrů – perioda 0,5 sekundy . . . . .	102
C.1.10	5 metrů – perioda 0,25 sekundy . . . . .	103
C.1.11	5 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	104
C.1.12	5 metrů – perioda 0,050 sekundy . . . . .	105
C.1.13	LQI . . . . .	106
C.1.14	Zpoždění . . . . .	107
C.1.15	Jitter . . . . .	108
C.1.16	Ztrátovost . . . . .	109
C.2	Venkovní prostor – přímá viditelnost . . . . .	110
C.2.1	LQI . . . . .	110
C.2.2	28 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	111
C.3	Venkovní prostor – překážka . . . . .	112
C.3.1	10 metrů — perioda 0,5 sekundy . . . . .	112
C.4	Venkovní prostor – přeskok packetu . . . . .	113
C.4.1	10 metrů — perioda 1 sekunda . . . . .	113
C.4.2	10 metrů — perioda 0,1 sekundy . . . . .	114
C.4.3	25 metrů — perioda 1 sekunda . . . . .	115
C.4.4	25 metrů — perioda 0,1 sekundy . . . . .	116
<b>D</b>	<b>Grafy senzorického měření</b>	<b>117</b>
D.1	Dashboard – 24 hodin měření . . . . .	117
D.2	Vícedenní měření . . . . .	118
D.2.1	Den 1 . . . . .	119
D.2.2	Den 2 . . . . .	121
D.2.3	Den 3 . . . . .	123
D.2.4	Den 4 . . . . .	125
D.2.5	Den 5 . . . . .	127
<b>E</b>	<b>Obsah elektronické přílohy</b>	<b>129</b>

# Seznam obrázků

1.1	Diagram systému . . . . .	14
1.2	Přehled Zigbee stack architektury . . . . .	15
1.3	Zigbee stack – aplikační vrstva . . . . .	15
1.4	Základní formát rámce podvrstvy aplikační podpory . . . . .	16
1.5	Typy rámců . . . . .	17
1.6	Příklad použití On/Off a Level Control clusterů . . . . .	18
1.7	Topologie . . . . .	19
1.8	Zabezpečený rámec síťové vrstvy . . . . .	21
1.9	Zabezpečený rámec podvrstvy aplikační podpory . . . . .	22
1.10	Blokový diagram ESP32-H2 . . . . .	23
1.11	HTU21D . . . . .	25
1.12	HTU21D – I2C komunikace . . . . .	26
1.13	BH1750 . . . . .	27
1.14	Komunikační rámec s BH1750 . . . . .	28
1.15	MH-Z19B . . . . .	29
1.16	Komunikační rámec s MH-Z19B . . . . .	30
1.17	GP2Y1014AU0F . . . . .	31
1.18	BME280 . . . . .	32
2.1	Diagram síťové části . . . . .	33
2.2	Sonoff USB Dongle Plus . . . . .	34
2.3	Diagram funkčnosti MQTT . . . . .	37
2.4	Vizualizace testovací Zigbee sítě včetně výkonnosti . . . . .	37
3.1	Vizualizace senzorické a řídicí DPS . . . . .	38
3.2	Level-shiftery pro MH-Z19B . . . . .	39
3.3	Návrh senzorické DPS (měřítko 1:1) . . . . .	39
3.4	Adafruit Feather nRF52840 Express . . . . .	40
3.5	Reálné zapojení na DPS . . . . .	41
3.6	Reálné zapojení uvnitř krytu . . . . .	41
3.7	Modely krytů měřicího zařízení . . . . .	42
3.8	Reálný kryt výrobku . . . . .	43
4.1	Diagram softwarové části . . . . .	44
4.2	Zigbee architektura na Nordic nRF52 sérii . . . . .	46
5.1	Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,5 s . . . . .	53
5.2	Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,25 s . . . . .	55
5.3	Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,1 s . . . . .	55
5.4	Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,050 s . . . . .	56
5.5	Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,5 s . . . . .	57

5.6	Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,25 s . . . . .	58
5.7	Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,1 s . . . . .	59
5.8	Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,050 s . . . . .	60
5.9	Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,5 s . . . . .	61
5.10	Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,25 s . . . . .	62
5.11	Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,1 s . . . . .	62
5.12	Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,050 s . . . . .	63
5.13	Měření Zigbee sítě – LQI pro scénář 1 . . . . .	64
5.14	Měření Zigbee sítě – Zpoždění pro scénář 1 . . . . .	64
5.15	Měření Zigbee sítě – Jitter pro scénář 1 . . . . .	65
5.16	Měření Zigbee sítě – Ztrátovost packetů pro scénář 1 . . . . .	65
5.17	Měření Zigbee sítě – LQI pro scénář 2 . . . . .	67
5.18	Měření Zigbee sítě 28 m – perioda 0,1 s (venkovní prostor – přímá viditelnost) . . . . .	68
5.19	Rozmístění měření 10 m (venkovní prostor – překážka) . . . . .	69
5.20	Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,5 s (venkovní prostor – překážka) . . . . .	70
5.21	Rozmístění měření 10 m (venkovní prostor – přeskok packetu) . . . . .	71
5.22	Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 1 s (venkovní prostor – přeskok packetu) . . . . .	72
5.23	Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,1 s (venkovní prostor – přeskok packetu) . . . . .	73
5.24	Rozmístění měření 25 m (venkovní prostor – přeskok packetu) . . . . .	74
5.25	Měření Zigbee sítě 25 m – perioda 1 s (venkovní prostor – přeskok packetu) . . . . .	74
5.26	Měření Zigbee sítě 25 m – perioda 0,1 s (venkovní prostor – přeskok packetu) . . . . .	75
5.27	Poloha Zigbee zařízení – senzorická měření . . . . .	76
5.28	Náhled 24 hodin měření – dashboard . . . . .	77
5.29	Náhled vícedenního měření – dashboard . . . . .	78

# Seznam tabulek

1.1	Přehled parametrů HTU21D . . . . .	25
1.2	Světelné technické požadavky v administrativních budovách . . . . .	27
1.3	Přehled parametrů BH1750 . . . . .	27
1.4	Potenciální problémy v důsledku koncentrace CO <sub>2</sub> . . . . .	29
1.5	Přehled parametrů MH-Z19B . . . . .	29
1.6	Limity pevných částic pro ochranu zdraví lidí . . . . .	31
1.7	Přehled parametrů GP2Y1014AU0F . . . . .	31
1.8	Přehled parametrů BME280 . . . . .	32
2.1	Hlavní rozdíly nRF52833 a 52840 . . . . .	34
3.1	Parametry výrobku . . . . .	43
5.1	Zigbee síť LQI – 20 metrů (uzavřený prostor – přímá viditelnost) . . .	52
5.2	Zigbee síť LQI – 10 metrů (uzavřený prostor – přímá viditelnost) . . .	57
5.3	Zigbee síť LQI – 5 metrů (uzavřený prostor – přímá viditelnost) . . .	60
5.4	Zigbee síť LQI – scénář 2 (venkovní prostor – přímá viditelnost) . . .	66
5.5	Zigbee síť LQI – scénář 3 (venkovní prostor – překážka) . . . . .	68
5.6	Zigbee síť LQI – 10 metrů (venkovní prostor – přeskok packetu) . . .	71
5.7	Zigbee síť LQI – 25 metrů (venkovní prostor – přeskok packetu) . . .	73

# Úvod

Používání Zigbee, bezdrátového komunikačního protokolu, se v dnešní době stále více rozšiřuje. Je hojně používán u zařízení do „chytrých domácností“, jelikož je cílen pro bateriová zařízení.

Monitorování komfortu v budově může sloužit nejen k zajištění komfortu, ale také například k ochraně a podpoře zdraví člověka. Pod pojmem monitorování komfortu si lze představit měření fyzikálních veličin, které ovlivňují kvalitu prostředí v budově a subjektivní pocity člověka vyvolané tímto prostředím. Měřenými veličinami může být např. teplota, relativní vlhkost, tlak, kvalita ovzduší, míra osvětlení nebo také detekce výskytu nebezpečných látek, jako je oxid uhelnatý.

Kromě monitorování měřených veličin a jejich statistik mohou být v závislosti také například automatizovaně řízeny aktuátory „chytré domácnosti“. Dalo by se tak docílit plně automatizované úpravy prostředí, popřípadě úrovně komfortu, v jednotlivých místnostech, a tedy i v celé budově.

Jelikož součástí systému je databáze, je tedy možné vytvořit z historických dat datové sady a sestavit model prostředí, který může pomoci například k energetickým a finančním úsporám.

Cílem diplomové práce je tedy sestavit systém pro monitorování komfortu v budově, vytvořit senzorická zařízení a Zigbee síť včetně změření výkonnosti.

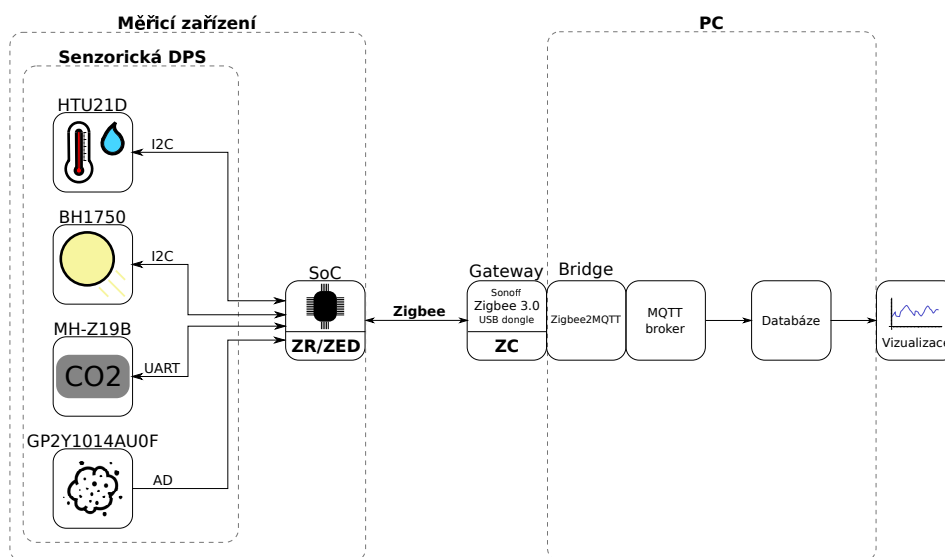
V první části práce jsou definovány požadavky na systém, přiblížení Zigbee protokolu a komfortních nebo pro člověka bezpečných hodnot měřených veličin. Další část je zaměřená na sestavení a výkonnost Zigbee sítě. Oddělenou částí je hardwarové řešení, ve které je popsána senzorická a řídicí deska plošného spoje měřicího zařízení a také zařízení jako celek. Na tuto část navazuje softwarové vybavení, kde je popsáno softwarové řešení práce.

# 1 Definice požadavků na systém

V této kapitole jsou definované jednotlivé části, ze kterých se bude skládat celý systém.

V plánu je vytvořit univerzální DPS (Desku Plošného Spoje) se snímači nezávisle na použitém čipu, který bude na jiné DPS. Deska plošného spoje s čipem se poté připojí k DPS se snímači přes příslušné sběrnice. To také umožní otestovat Zigbee síť s různými zařízeními.

Jelikož se práce zabývá monitorováním komfortu v budově, je nutné monitorovat komfort ideálně v každé místnosti budovy. Pro monitorování jsou vybrány snímače teploty, relativní vlhkosti, intenzity osvětlení, tlaku, pevných částic a CO<sub>2</sub>. Více v kapitole s použitými sensorickými zařízeními 1.4.



Obr. 1.1: Diagram systému

## 1.1 Zigbee 3.0

Zigbee je bezdrátový komunikační protokol vyvinutý v roce 1998 Zigbee Alliance nově nazývanou CSA (Connectivity Standards Alliance – [4]). Tento komunikační standard má nároky na nízkou spotřebu energie u bateriových zařízení, na které je cílen. Nyní je převážně využíván v oblasti „chytrých domácností“.

Jeho použití lze ale vidět i jinde, například u americké agentury pro letectví a kosmonautiku NASA, která Zigbee protokol využívá v misi prozkoumávání Marsu od roku 2020, kdy malý vrtulník Ingenuity odesílá svou telemetrii do roveru Perseverance právě pomocí tohoto komunikačního protokolu. [1]

Zigbee protokol je navržen tak, aby byl jednodušší a levnější než ostatní protokoly pro bezdrátové osobní sítě (WPAN), tedy například Bluetooth a Wi-Fi.

V této práci je využit Zigbee protokol ke komunikaci dat ze senzorických zařízení.

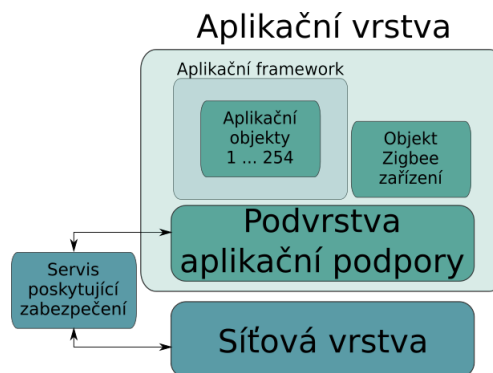
### 1.1.1 Stack architektura

Zigbee protokol je postaven na standardu pro osobní bezdrátové sítě s malým datovým tokem IEEE 802.15.4. Z tohoto standardu převzal nejnižší vrstvy, tedy fyzickou a linkovou, a je definován až od síťové vrstvy. Přehled architektury je zobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 1.2).



Obr. 1.2: Přehled Zigbee stack architektury (převzato, upraveno [2], str. 25)

#### Aplikační vrstva



Obr. 1.3: Zigbee stack – aplikační vrstva (převzato, upraveno [2], str. 25)

V aplikační vrstvě Zigbee protokolu se nachází podvrstva aplikační podpory, která se stará o komunikaci se síťovou vrstvou a také zprostředkovává spojení aplikačního frameworku, ve kterém jsou aplikační objekty definované výrobcem zařízení.

Aplikační framework umožňuje definovat 254 aplikačních objektů, adresovaných příslušným číslem koncového bodu. Koncový bod 0 je rezervován pro datové rozhraní do Objektu Zigbee zařízení a koncový bod 255 pro vysílání dat do všech aplikačních objektů. Také koncové body 241–254 jsou přiřazeny Zigbee Alliance.

Aplikační profily jsou určité dohodnuté tvary pro zprávy a zpracování akcí, což umožňuje aplikacím zasílat a zpracovávat požadavky a data. Tyto aplikační profily mají své unikátní clustery, které mají svůj vlastní identifikátor a jsou spojeny s tokem do nebo ze zařízení. ([2], str. 37–38)

Na obrázku 1.3 lze vidět Objekt Zigbee zařízení, tato část protokolu slouží jako výchozí třída funkčnosti, která zprostředkovává rozhraní mezi aplikačními objekty, profilem zařízení a podvrstvou aplikační podpory. Objekt Zigbee zařízení má na starost inicializaci podvrstvy aplikační podpory, síťové vrstvy a servisu poskytujícího zabezpečení včetně správy těchto prvků a také se stará o zjistitelnost zařízení. ([2], str. 38)

## Rámec

Základní rámec se skládá z hlavičky a užitečné informace.

Typy rámců jsou dle ([2], str. 66):

- Data
- Command
- Acknowledgement

Typ rámce je nastaven v poli Frame control (obrázek 1.4).

Typy doručení rámce jsou dle ([2], str. 66):

- **Normal unicast delivery** – rámec je doručen na daný koncový bod zařízení
- **Broadcast** – rámec je doručen všem zařízením na daný koncový bod nebo na všechny aktivní koncové body
- **Group addressing** – rámec je doručen na koncové body určitých zařízení

Typ doručení rámce je nastaven v poli Frame control (obrázek 1.4).

Octets: 1	0/1	0/2	0/2	0/2	0/1	1	0/ Variable	Variable
Frame control	Destination endpoint	Group address	Cluster identifier	Profile identifier	Source endpoint	APS counter	Extended header	Frame payload
	Addressing fields							
APS header								APS payload

Obr. 1.4: Základní formát rámce podvrstvy aplikační podpory ([2], str. 65)



Popis obrázku 1.4 je dle ([2], str. 65–69) následující:

- **Hlavička**

- **Frame control** – skládá se z více pod-rámců 8 bitů, definuje typ rámce, adresování a kontrolní příznaky
- **Destination Endpoint** – 8 bitů, cílový koncový bod, na který je rámeček doručen
- **Group Address** – 16 bitů, pouze pokud jde o Group addressing doručení rámce, doručen na všechny koncové body z adresy skupiny zařízení
- **Cluster Identifier** – 16 bitů, pouze pro Data a Acknowledgement rámce, konkrétní cluster, pro který je rámeček určen
- **Profile Identifier** – 16 bitů, pouze pro Data a Acknowledgement rámce, Zigbee profil, pro který je rámeček určen
- **Source Endpoint** – 8 bitů, koncový bod, kterému rámeček patří
- **APS Counter** – 8 bitů, hodnota se zvyšuje o jedna při každém novém přenosu, brání v přijetí duplicitních rámečků
- **Extended Header** – skládá se z více pod-rámčků 8–24 bitů, obsahuje informace o fragmentaci zprávy

- **Užitečná informace**

- **Frame Payload** – proměnná délka podle typu rámce

Octets: 1	0/1	0/2	2	2	1	1	0/ Variable	Variable
Frame control	Destination endpoint	Group address	Cluster identifier	Profile Identifier	Source endpoint	APS counter	Extended header	Frame payload
Addressing fields								
APS header								APS payload

(a) Data rámeček

Octets: 1	1	1	Variable
Frame control	APS counter	APS command identifier	APS command payload
APS header		APS payload	

(b) Command rámeček

Octets: 1	0/1	0/2	0/2	0/1	1	0/Variable
Frame control	Destination endpoint	Cluster identifier	Profile identifier	Source endpoint	APS counter	Extended header
APS header						

(c) Acknowledgement rámeček

Obr. 1.5: Typy rámečků ([2], str. 69–70)

## Cluster

Cluster je specifikace definující jeden nebo více atributů, příkazů, chování a závislostí. Clustery jsou založeny na modelu klient–server. Každý cluster má jeden nebo více cluster identifier, což je 16bitové číslo, které identifikuje jednu specifikaci clusteru. [3]

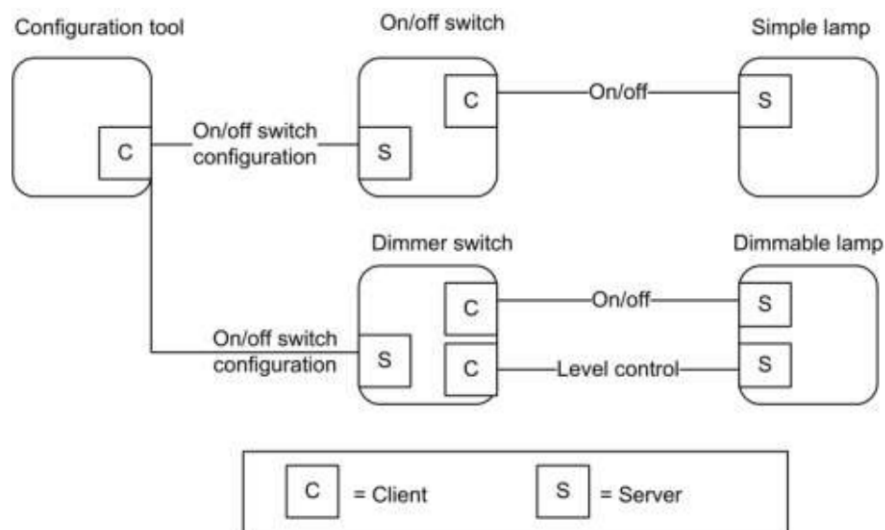
Pro popis zařízení jsou využity clustery [3]:

- Basic – základní informace o zařízení
- Identify – atributy a příkazy pro přepnutí zařízení do identifikačního módu
- Power Configuration – detailní popis o zdroji napájení pro zařízení, podpěťové a přepěťové alarmy
- Device Temperature configuration – vnitřní teplota zařízení, alarmy

Clustery se také používají pro skupiny a scény

Vybrané další clustery dle [3] jsou:

- On/Off – atributy a příkazy pro zapínání a vypínání zařízení
- Level Control – atributy a příkazy pro nastavování hodnot mezi stavy zařízení „plně zapnuto“ a „plně vypnuto“ (například pro řízení intenzity osvětlení)
- Alarms – atributy a příkazy posílající notifikace a konfigurace alarmů
- Illuminance Measurement – atributy a příkazy pro měření osvětlení a hlášení měření osvětlení
- Temperature Measurement – atributy a příkazy pro měření teploty a hlášení měření teploty



Obr. 1.6: Příklad použití On/Off a Level Control clusterů ([3], str. 99)

## 1.1.2 Topologie

Síťová vrstva protokolu definuje tři typy topologií: hvězdicovou (Star), stromovou (Tree) a smíšenou (Mesh).

### Star

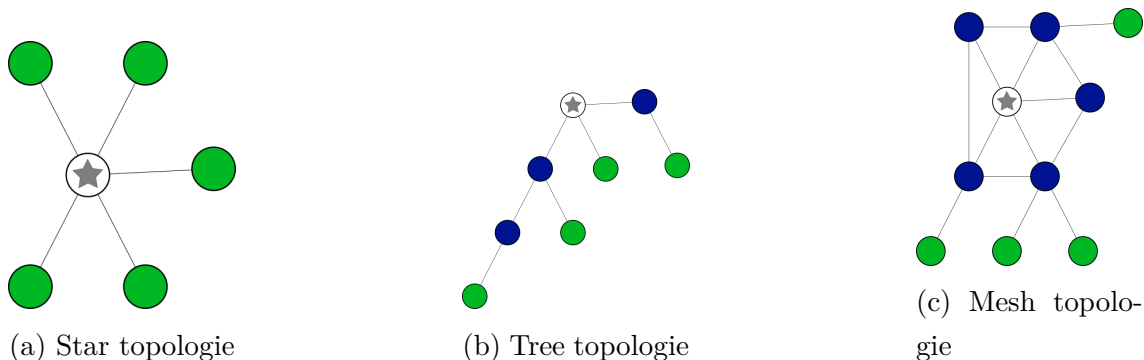
V hvězdicové topologii je jedno zařízení zodpovědné za řízení celé sítě, nastavuje nová zařízení, která se připojí, a spravuje všechna zařízení na síti, která komunikují skrze toto hlavní zařízení.

### Tree

Ve stromové topologii je jedno hlavní zařízení, které síť vytvoří, ale dále může být síť obsluhována jinými zařízeními. Data jsou předávána přes směrovací zařízení mezi jednotlivými uzly.

### Mesh

Obdobně jako u stromové topologie je v síti se smíšenou topologií hlavní zařízení, které síť vytvoří a nastaví parametry a dále může být síť spravována jinými zařízeními. Tato topologie také umožňuje peer-to-peer komunikaci (klient–klient), kdy zařízení se stejnými oprávněními mohou komunikovat přímo mezi sebou.



Obr. 1.7: Topologie

Na obrázku 1.7 je hvězdičkou označen koordinátor, modře router a zeleně koncové zařízení. Více v následující kapitole 1.1.3.

Aplikace pro monitoring a řízení, bezdrátové snímačové sítě a podobné v mesh topologii najdou spoustu výhod. Peer-to-peer sítě mohou být z principu topologie samo-organizační (self-organizing) a samo-spravující (self-healing), tedy může být automaticky nalezena nová cesta k uzlu. ([21], str. 23). Pro systém byla zvolena mesh topologie Zigbee sítě.

### 1.1.3 Zařízení

Zigbee standard definuje tři typy zařízení. Liší se svojí funkcí a nároky například na spotřebu energie.

#### **Koordinátor – ZC**

Zigbee koordinátor, dle zkratky ZC z anglického Zigbee Coordinator, je zařízení, které vytváří síť a spravuje ji. Toto zařízení musí každá síť mít a nesmí být více koordinátorů než jeden.

Umožňuje novým zařízením připojení do existující sítě. Může být rodičem pro nové zařízení. Z principu funkce toto zařízení musí být stále dostupné, nemůže tedy přecházet do režimu spánku a je nevhodné k napájení z baterií.

#### **Router – ZR**

Zigbee router se zkratkou ZR, dle anglického Zigbee Router, je zařízení, které hostuje aplikaci a zároveň funguje jako směrovač.

Podobně jako koordinátor má privilegia umožnit novým zařízením připojení do sítě a může být rodičem pro nové zařízení. Nemůže přecházet do režimu spánku.

#### **Koncové zařízení – ZED**

Zigbee koncové zařízení se zkratkou ZED, dle anglického Zigbee End Device, je zařízení, které hostuje aplikaci.

Nemůže být rodičem pro nové zařízení. Většinu času může být v režimu spánku, je proto vhodné pro napájení z baterií.

### 1.1.4 Security

Bezpečnost Zigbee sítě je založena na „link“ a „network“ klíčích. Unicast komunikace je zabezpečena 128bitovými link klíči sdílenými mezi dvěma zařízeními. Broadcast a další komunikace na síťové vrstvě je zabezpečena 128bitovým network klíčem sdíleným mezi všemi zařízeními na síti. Zařízení, které přijímá rámeček, je o něm oznámeno o jeho zabezpečení, ví tedy, jakým klíčem je zašifrován. Zařízení získá link klíče jejich přenosem nebo předinstalací a network klíč jeho přenosem. ([2], str. 400)

Link klíče použité v Zigbee sítích dle ([2], str. 400–401):

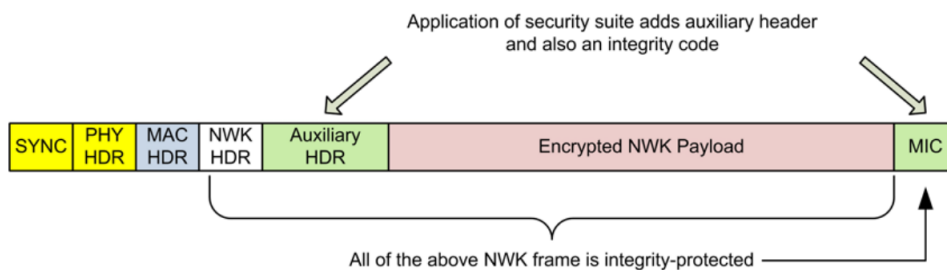
- **Centralized security global trust center link key** – Link klíč pro připojení do bezpečnostně centralizovaných sítí
- **Distributed security global link key** – Link klíč pro připojení do bezpečnostně decentralizovaných sítí

- **Install code link key** – Link klíč získaný z instalačního kódu od připojovacího se zařízení, pro vytvoření unikátního link klíče trust centra
- **Application link key** – Link klíč použitý mezi dvěma zařízeními pro šifrování aplikační vrstvy
- **Device Specific trust center link key** – Link klíč mezi trust centrem a zařízením v síti použitý k šifrování příkazů trust centra a aplikační vrstvy

Základní hodnota pro **Centralized security global trust center link key** je: 5A 69 67 42 65 65 41 6C 6C 69 61 6E 63 65 30 39 (ZigBeeAlliance09). [2]

## Bezpečnost síťové vrstvy

Pokud je potřeba zabezpečit rámeček v síťové vrstvě Zigbee sítě, je opatřen „Auxiliary header“ a „MIC“.

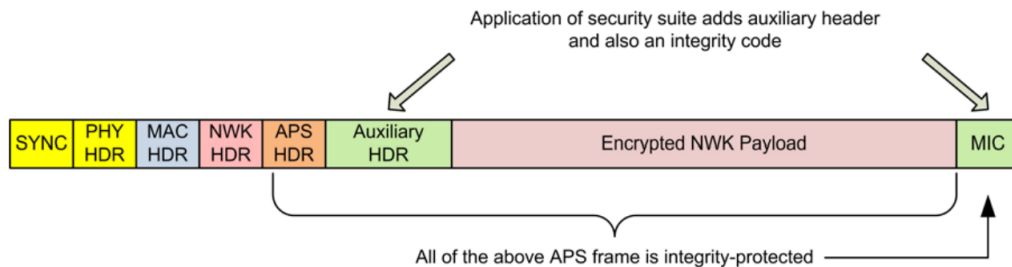


Obr. 1.8: Zabezpečený rámeček síťové vrstvy ([2], str. 401)

- **Auxiliary header** ([2], str. 404) – Obsahuje:
  - Security control field – bezpečnostní úroveň, jakým klíčem je rámeček šifrován
  - Adresu zdroje
  - Frame counter (Počítadlo rámečků) [2]
    - \* ochrana proti opakujícím se rámečků
    - \* všechna zařízení mají svůj vlastní a vědí o počítadlech svých sousedů a potomků
    - \* vždy při vyslání rámečku se počítadlo zvýší
    - \* zařízení, které rámeček přijímá, ověřuje počítadlo posílajícího zařízení
    - \* pokud zařízení, které rámeček přijalo, není konečné, rozšifruje rámeček a zvýší počítadlo rámečků cesty, poté opět zašifruje a odešle hlouběji do sítě = hop-by-hop security
  - Sekvenční číslo klíče
- **MIC** [2] – Message Integrity Code – použitý pro ověření, že zpráva nebyla modifikována

## Bezpečnost podvrstvy aplikační podpory (APS security)

Zabezpečený rámec podvrstvy aplikační podpory je obdobně jako u síťové vrstvy opatřen hlavičkou a kódem integrity. Podvrstva aplikační podpory je také zodpovědná za poskytování klíče aplikacím a Objektům Zigbee zařízení a správu servisů zařízení. ([2], str. 402)



Obr. 1.9: Zabezpečený rámec podvrstvy aplikační podpory ([2], str. 402)

## Trust center

Trust center je zařízení, kterému ostatní zařízení v Zigbee síti důvěřují a distribuují bezpečnostní klíče, také navazuje, spravuje a aktualizuje bezpečnostní podmínky sítě. Všechna zařízení sítě by měla poznat pouze jedno aktivní trust center a pouze jedno by mělo být v centralizované síti.

V bezpečnostně centralizované síti komunikují zařízení s trust centrem přes Trust center link klíč.

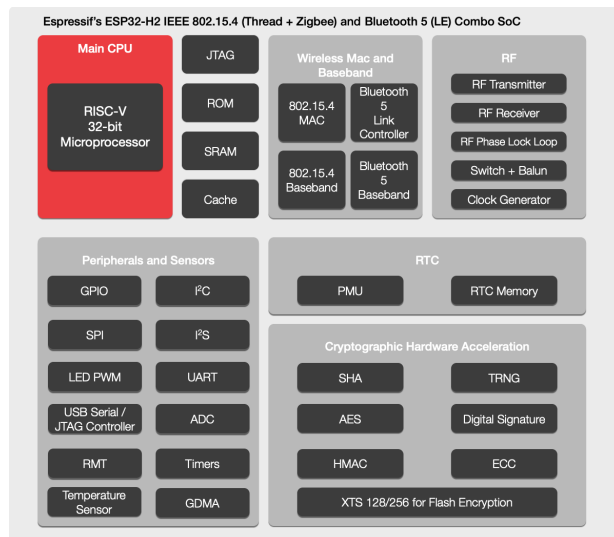
V bezpečnostně distribuované síti jsou všechny routery schopny chovat se jako trust center a distribuovat network klíče, protože ale v síti není žádné určité trust center, nejsou distribuovány Trust center link klíče. ([2], str. 403)

## 1.2 ESP32-H2

ESP32-H2 od firmy Espressif je SoC (systém na čipu – System on Chip). SoC znamená, že kromě výpočetní jednotky integruje i další komponenty (např. paměť, vstupy/výstupy a další) na jednom čipu.

Tento nový čip umožňuje implementaci Zigbee protokolu, je oficiálně certifikovanou platformou v souladu se Zigbee dle CSA. Specifikace ESP32-H2 jsou následující [5]:

- **Procesor** – jednojádrový 32bitový RISC-V, až 96 MHz
- **Paměť** – 256 KB SRAM a pracuje s externí Flash
- **Rozhraní** – 26 programovatelných GPIO
  - ADC
  - SPI
  - UART
  - I2C
  - I2S
  - RMT
  - GDMA
  - PWM
- **Cena** – jde o nový produkt, který se zatím neprodává [30. 10. 2022]



Obr. 1.10: Blokový diagram ESP32-H2 [5]

Tento čip je možné použít pro implementaci Zigbee protokolu a pro měření a zpracování dat ze senzorických zařízení. ESP32-H2 je samostatný SoC, nebo zakomponovaný na vývojové desce ESP32-H2-DevKitC-1 v 2.1.

## 1.3 nRF52833

nRF52833 je SoC od firmy Nordic Semiconductor. V samotném názvu SoC je uvedeno „RF“ (z anglického Radio frequency), to ukazuje zaměření na rádiové frekvence, a tedy bezdrátové aplikace rodiny těchto čipů. Tento čip je multiprotokolový s rozšířeným teplotním rozsahem od -40 °C do 105 °C. Díky teplotnímu rozsahu je ideální do komerčních a průmyslových aplikací zaměřených na světelnou techniku, obecně má však široké využití. [6]

Specifikace nRF52833 jsou následující [6]:

- **Procesor** – 64 MHz Arm Cortex-M4
- **Paměť** – 512 KB Flash + 128 KB RAM, 8 KB cache
- **Rozhraní**
  - USB 2.0
  - SPI
  - UART
  - I2S
  - PWM
  - ADC
  - Komparátor
- **Ostatní periferie**
  - 32bitový časovač/čítač
  - 24bitový čítač reálného času
  - Teplotní snímač
- **Bezdrátové protokoly**
  - Bluetooth Low Energy
  - Bluetooth mesh
  - NFC
  - Thread
  - Zigbee
  - 802.15.4
  - ANT
  - 2.4 GHz proprietary
- **Cena** – okolo \$5 (123,05 Kč [30. 10. 2022])

Tento čip může být stejně jako ESP32-H2 použit pro implementaci Zigbee protokolu, zpracování a odesílání dat ze snímačů skrze Zigbee síť.



## 1.4 Senzorická zařízení

V následující části jsou popsána senzorická zařízení systému využívaná ke snímání reálných fyzikálních veličin a naměřená data jsou poté zpracována a odesílána skrze Zigbee síť.

### 1.4.1 Senzor teploty a vlhkosti – HTU21D

Teplota a relativní vlhkost vzduchu patří k hlavním parametrům komfortu, které je lidské tělo schopné jednoduše vnímat. Pokud jsou tyto údaje známe v každé místnosti, je poté možné dle jejich hodnoty nastavovat například termostaty, zvlhčovače vzduchu nebo informovat o vhodnosti otevření okna a podobné akce, za účelem nastavení určitého komfortu v celé budově.

Teplotní komfort lze stanovit dle PMV (index predikce střední hodnoty hlasů – Predicted Mean Vote), což je ukazatel středního tepelného pocitu získaný z velkého počtu subjektivních hodnocení dle sedmibodové stupnice tepelných pocitů. V normě ČSN EN ISO 7730 [8] lze nalézt, že operativní teplota například pro samostatnou kancelář by měla v létě být  $24,5 \pm 1$  °C a v zimě  $22 \pm 1$  °C.



Obr. 1.11: HTU21D [7]

HTU21D je digitální snímač teploty a relativní vlhkosti. Data lze ze senzoru vyčíst pomocí I2C. Jeho parametry jsou uvedeny v následující tabulce 1.1 dle [7].

Tab. 1.1: Přehled parametrů HTU21D

Napájecí napětí	1,5–3,6 [V]
Rozlišení	až 12/14 [bit] (vlhkost/teplota)
Rozsah relativní vlhkosti	0–100 [%]
Rozsah teploty	-40–125 [°C]
Přesnost teploty	$\pm 0,3$ [°C]
Rozhraní	I2C

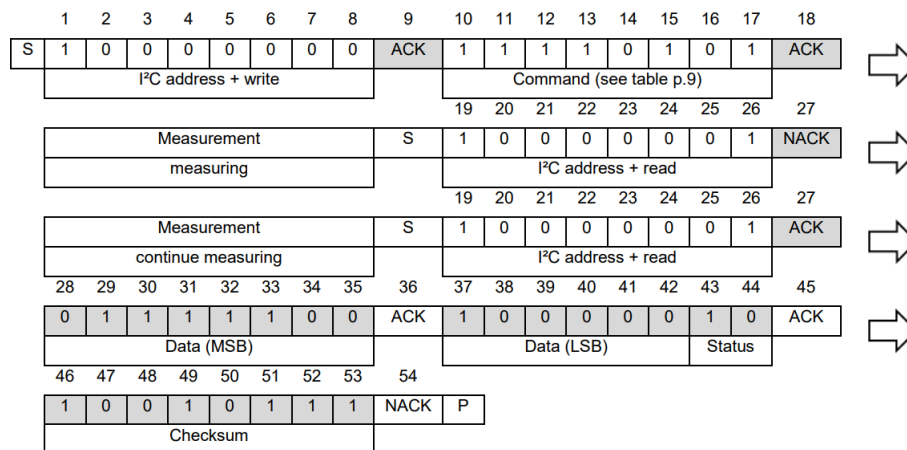
## I2C komunikace

Vždy je komunikován 1 B pro příkaz. Sensor má definované příkazy pro komunikaci, které jsou dle ([7], str. 10):

- Trigger Temperature Measurement – Hold master (0xE3)
- Trigger Humidity Measurement – Hold master (0xE5)
- Trigger Temperature Measurement – No Hold master (0xF3)
- Trigger Humidity Measurement – No Hold master (0xF5)
- Write user register (0xE6)
- Read user register (0xE7)
- Soft Reset (0xFE)

Důležité příkazy budou „Trigger Temperature Measurement – No Hold master“, tedy měření teploty, kdy senzor nedrží mastera, až bude mít naměřeno, ale data připraví a vystaví je poté, co ho o to master požádá. Pro měření vlhkosti je to obdobný příklad jako pro teplotu a příkaz „Trigger Humidity Measurement – No Hold master“.

Na následujícím obrázku jsou uvedeny I2C komunikační rámce měření relativní vlhkosti.



No Hold Master communication sequence

Obr. 1.12: HTU21D – I2C komunikace ([7], str. 11)

Šedé bloky na obrázku vyznačují komunikaci senzoru do mastera, bílé bloky představují komunikaci mastera do senzoru.

## 1.4.2 Senzor intenzity osvětlení – BH1750

Dalším parametrem pro dosažení komfortu v budově je intenzita osvětlení. Přirozené osvětlení má na organismus a psychiku člověka důležitý vliv. Pokud není možné zajistit osvětlení přirozené, je důležité alespoň podle druhu činnosti zajistit dostatečnou intenzitu umělého zdroje světla.

Tab. 1.2: Světelné technické požadavky v administrativních budovách ([9], str. 355)

Typ prostoru, úkolu a činnosti	Intenzita osvětlení [lx]
archívy	200
recepce	300
zakládání dokumentů, kopírování atd.	300
psaní, psaní na stroji, čtení, zpracování dat	500
pracovní stanice CAD	500
konferenční a zasedací místnosti	500
technické kreslení	750



Obr. 1.13: BH1750 [10]

BH1750 je digitální senzor intenzity osvětlení. Se senzorem je možné komunikovat přes sběrnici I2C a hodnotu vrací přímo v jednotkách intenzity osvětlení, tedy v luxech. Intenzita osvětlení je poměr dopadajícího světelného toku na jednotku plochy. Parametry senzoru jsou dle [11] následující:

Tab. 1.3: Přehled parametrů BH1750

Napájecí napětí	2,4–3,6 [V]
Rozlišení	16 [bit]
Rozsah	1–65535 [lx]
Přesnost	H:± 1, L:± 4 [lx]
Rozhraní	I2C

## I2C komunikace

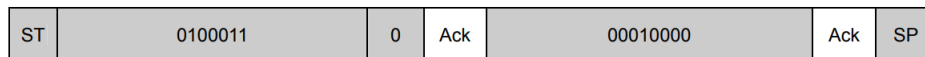
Obdobně jako u senzoru teploty a vlhkosti je u senzoru intenzity osvětlení komunikován 1 B pro příkaz. Senzor má definované příkazy pro komunikaci, které jsou uvedeny v dokumentaci, některé vybrané dle ([11], str. 5) jsou následující:

- Power Down (0x00)
- Power On (0x01)
- Reset (0x07)
- Continuously H-Resolution Mode (0x10)
- Continuously H-Resolution Mode2 (0x11)
- Continuously L-Resolution Mode (0x13)
- One Time H-Resolution Mode (0x20)

Dle uvedených příkazů lze senzor používat v kontinuálním režimu (Continuously) nebo pouze pro jedno změření (One Time), při kterém se senzor automaticky vypne po změření příkazem „Power Down“.

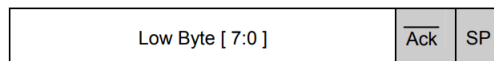
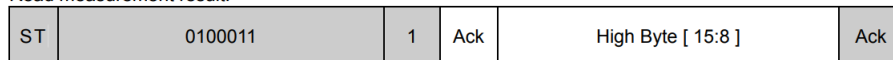
Komunikační rámec se senzorem je zobrazen na obrázku 1.14. Jde o příklad stálého měření intenzity osvětlení s přesností 1 lx. Jak je vidět, nejprve se pošle daný příkaz, poté počká určitý čas a následně vyčítá odpověď.

① Send "Continuously H-resolution mode " instruction



② Wait to complete 1st H-resolution mode measurement.( max. 180ms. )

③ Read measurement result.



Obr. 1.14: Komunikační rámec s BH1750 ([11], str. 7)

Šedé bloky jsou komunikace mastera do senzoru a bílé ze senzoru do mastera. Odpověď má 2 B a výsledná intenzita osvětlení se spočítá dle ([11], str. 7)jako:

$$E = (HighByte + LowByte)/1,2 \quad (1.1)$$

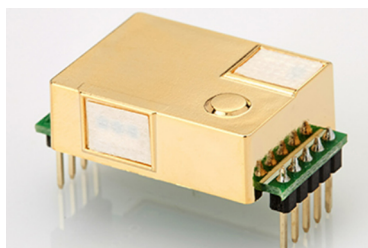
kde  $E$  ... intenzita osvětlení,  $HighByte$  a  $LowByte$  ... první a druhý Bajt odpovědi.

### 1.4.3 Senzor oxidu uhličitého – MH-Z19B

Oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) je bezbarvý plyn bez zápachu a ve velké koncentraci může být pro člověka nebezpečný v podobě bolesti hlavy, únavy, ztráty vědomí až udušení. Pro správnou funkci organismu, zdraví a duševní pohodu je vhodné udržovat koncentraci  $\text{CO}_2$  na správné úrovni.

Tab. 1.4: Potenciální problémy v důsledku koncentrace  $\text{CO}_2$  [12]

Popis	Koncentrace [ppm]
průměrná venkovní koncentrace ve vzduchu	400
typická úroveň v okupovaných místnostech s dobrou výměnou vzduchu	400–1000
špatná kvalita vzduchu	1000–2000
bolest hlavy, ospalost, ztráta pozornosti	2000–5000
zdravotní obtíže	5000
okamžitě zdraví škodlivá úroveň z důvodu nedostatku kyslíku	>40000



Obr. 1.15: MH-Z19B [13]

MH-Z19B je senzor oxidu uhličitého založený na nedisperzním infračerveném principu (NDIR) se zabudovanou teplotní kompenzací. Ke komunikaci je možné využít buď UART rozhraní, nebo PWM výstup. Parametry senzoru jsou dle [14] následující:

Tab. 1.5: Přehled parametrů MH-Z19B

Napájecí napětí	4,5–5,5 [V]
Rozsah	0–2000/5000/10000 [ppm]
Přesnost	$\pm(50 \text{ ppm} + 5 \% \text{ reading value})$ [ppm]
Rozhraní	UART, PWM

Při použití PWM je nutné koncentraci dopočítat ze střidy signálu.

$$CO_2 = 2000 \times (TH - 2ms) / (TH + TL - 4ms) \quad (1.2)$$

kde  $CO_2$  ... koncentrace oxidu uhličitého,  $TH$  ... doba výstupu v logické „1“ během cyklu,  $TL$  ... doba výstupu v logické „0“ během cyklu.

## UART komunikace

Senzor oxidu uhličitého při použití UART rozhraní vrací hodnoty  $CO_2$  koncentrace. V dokumentaci jsou uvedeny příkazy pro komunikaci se senzorem, které jsou následující dle ([14], str. 7):

- Read  $CO_2$  concentration (0x86)
- Calibrate Zero Point (ZERO) (0x87)
- Calibrate Span Point (SPAN) (0x88)
- ON/OFF Self-calibration function for zero point (0x79)
- Detection range setting (0x99)

0x86- Read CO2 concentration								
Sending command								
Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8
Start Byte	Reserved	Command	-	-	-	-	-	Checksum
0xFF	0x01	0x86	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x79
Return value								
Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8
Start Byte	Command	Concentration (High 8 Byte)	Concentration (Low 8 Byte)	-	-	-	-	Checksum
0xFF	0x86	HIGH	LOW	-	-	-	-	Checksum

Obr. 1.16: Komunikační rámec s MH-Z19B ([14], str. 7)

Na obrázku 1.16 je vidět UART komunikační rámec se senzorem pro změření koncentrace oxidu uhličitého. Hodnota přijde ve dvou Bajtech, ze kterých se vypočítá koncentrace dle vztahu:

$$CO_2 = HIGH \times 256 + LOW \quad (1.3)$$

kde  $CO_2$  ... koncentrace oxidu uhličitého,  $HIGH$  a  $LOW$  ... první a druhý Bajt odpovědi.

### 1.4.4 Senzor pevných částic – GP2Y1014AU0F

Pevné částice neboli prach jsou částice menší jak 10  $\mu\text{m}$  volně se pohybující ve vzduchu. Při větší koncentraci může docházet ke komplikacím především v respiračním ústrojí člověka v závislosti na velikosti částic.

Tab. 1.6: Limity pevných částic pro ochranu zdraví lidí [15]

Velikost částice [ $\mu\text{m}$ ]	Doba průměrování	Limit [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ]	Maximální překročení
10	24 h	50	35 [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ]
10	kalendářní rok	40	
2,5	24 h	25	
2,5	3 kalendářní roky	20	



Obr. 1.17: GP2Y1014AU0F [16]

GP2Y1014AU0F je senzor pevných částic na optickém principu. Koncentrace pevných částic je reprezentována jako analogový výstup. Základní parametry jsou dle [17] následující:

Tab. 1.7: Přehled parametrů GP2Y1014AU0F

Napájecí napětí	-0,3–7 [V]
Rozsah	0–0,5 [ $\text{mg} / \text{m}^3$ ]
Přesnost	0,5 [V / (0.1 $\text{mg} / \text{m}^3$ )]
Rozhraní	Analogový výstup

## 1.4.5 Senzor barometrického tlaku – BME280

BME280 je senzor, který kombinuje měření barometrického tlaku, vlhkosti a teploty [18]. Přídavné měření teploty a vlhkosti umožňuje zpřesnění měření těchto veličin nebo například kompenzace v závislosti na prostředí uvnitř krytu. Parametry senzoru jsou dle [18] následující:

Tab. 1.8: Přehled parametrů BME280

Napájecí napětí	3,3 [V]
Rozsah	Rel. vlhkost: 0–100 [%] Tlak: 300–1100 [hPa]
Přesnost	Rel. vlhkost: $\pm 3$ [%] Tlak: $\pm 1.7$ [hPa]
Rozhraní	I2C



Obr. 1.18: BME280 [18]

## 1.5 InfluxDB

InfluxDB bude použita pro ukládání všech dat. Je to „time series database“, což znamená, že data jsou tvořena párem časové značky a hodnotou. Díky svému principu je tato databáze vhodná pro ukládání hodnot ze senzorických zařízení.

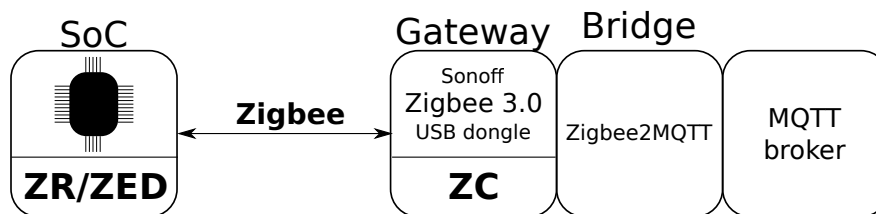
## 1.6 Vizualizační nástroj Grafana

Grafana je vizualizační nástroj s možností nastavení upozornění a přizpůsobení vizualizovaných dat. Bude využit k zobrazení hodnot ze snímačů, včetně historických dat a dalších statistik.



## 2 Zigbee síť

V této kapitole je popsáno vytvoření Zigbee sítě a indikátory výkonnosti sítě. Dále je v této kapitole popsána implementace Zigbee protokolu na SoC.



Obr. 2.1: Diagram sítěvých částí

### 2.1 Výkonnost sítě

Podkapitola uvádí indikátory výkonnosti Zigbee sítě a také vysvětluje jejich význam.

#### 2.1.1 RSSI nebo také ED

Received Signal Strength Indicator (RSSI) nebo také Energy Detection (ED) – detekce energie přijímače [22]. Tento indikátor je používán síťovou vrstvou jako část algoritmu výběru kanálu. Jde o určení síly signálu v šířce pásma IEEE 802.15.4 kanálu. Signály se neidentifikují ani nedekodují.

Minimální hodnota ED (0) znamená, že přijatá energie je menší než 10 dB pod určitou citlivostí přijímače. ([21], str. 62)

V jedno-skokových sítích (single-hop) může být tento indikátor použit jako LQI [22].

#### 2.1.2 LQI

Měření LQI je charakterizace síly a kvality přijatého packetu. Toto měření by mělo být provedeno pro každý přijatý packet. ([21], str. 63)

Link quality indicator (LQI) – indikátor kvality spojení. Jde o odhadnutý indikátor kvality spojení RF přenosu ze zařízení. ([2], str. 197)

LQI je kumulativní veličina použita ve více-skokových (multi-hop) sítích k vyjádření kvality spojení [22].

Indikátor může nabývat hodnot 0–255.

## 2.2 Tvorba sítě

Pro tvorbu sítě byl zvolen Zigbee koordinátor Sonoff USB Dongle Plus použit jako gateway, spolu s počítačem s operačním systémem Windows a bridge Zigbee2MQTT. Diagram této části je uveden na obrázku 2.1.



Obr. 2.2: Sonoff USB Dongle Plus [20]

### 2.2.1 SoC – Zigbee zařízení

Jako Zigbee zařízení byl vybrán Nordic nRF52840 SoC. Jedná se o novější model SoC ze stejné série jako nRF52833 (popsán v kapitole 1.3), který mohl být pro tuto práci použit. Hlavním důvodem změny bylo použité hardwarové řešení (více v kapitole 3). Tato změna byla konzultována a schválena vedoucím práce.

#### Rozdíly nRF52833 a nRF52840

Hlavním rozdílem jsou parametry paměti, periferie nRF52840 jsou také vylepšeny, ale ve smyslu této práce nemají významný vliv, proto jsou v následující tabulce uvedeny pouze rozdíly paměti.

Tab. 2.1: Hlavní rozdíly nRF52833 a 52840 [23]

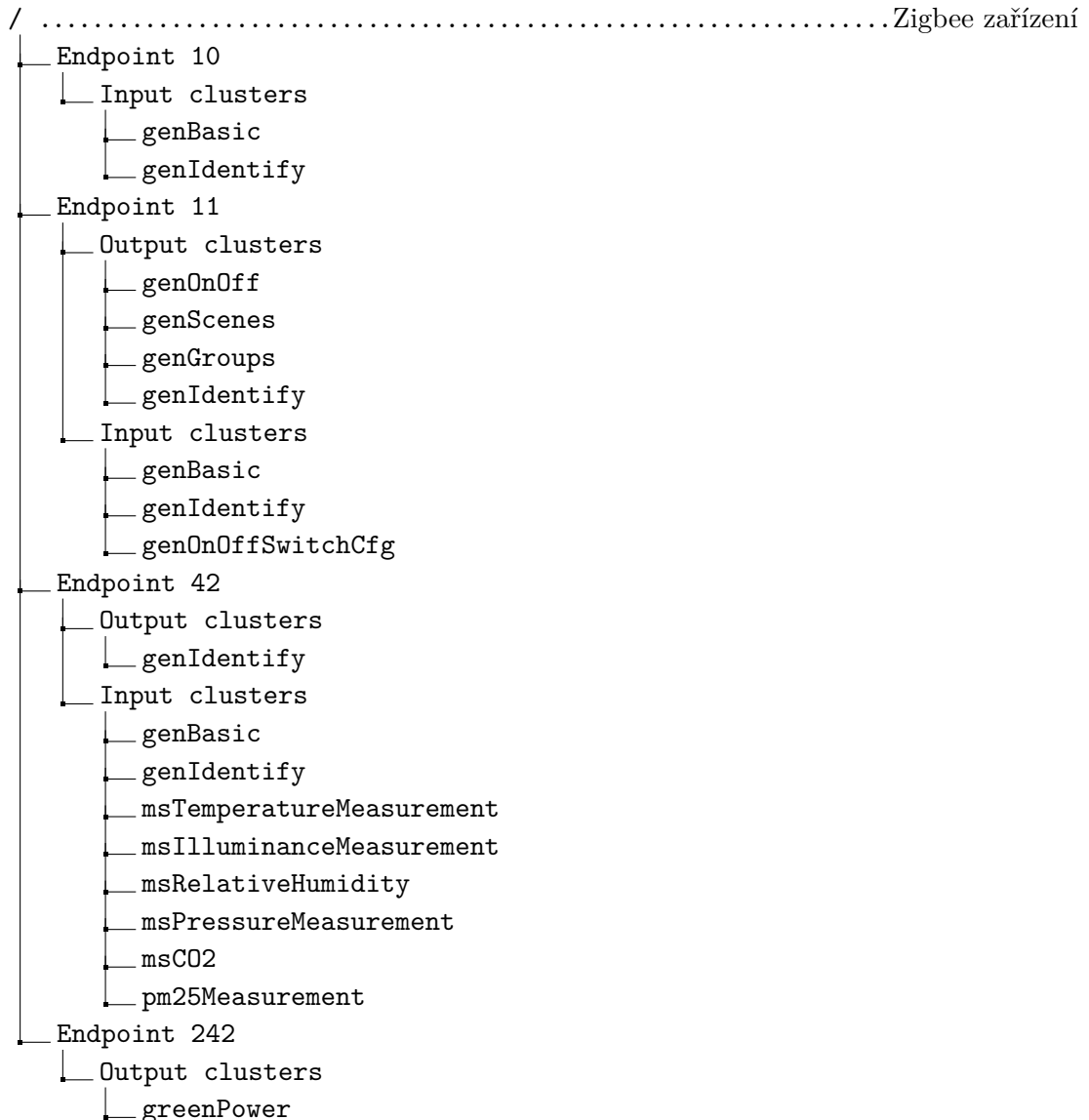
	<b>nRF52833</b>	<b>nRF52840</b>
<b>CPU</b>	Cortex-M4 with FPU (64 MHz)	Cortex-M4 with FPU (64 MHz)
<b>Paměť</b>	512 kB flash 128 kB RAM	1 MB flash 256 kB RAM
<b>Crypto</b>	-	CryptoCell™310

## Implementace Zigbee

Zigbee protokol je na čipech od firmy Nordic implementován pomocí ZBOSS API (více v kapitole 4). Toto rozhraní implementuje některé clustery Zigbee standardu a používá se pro tvorbu vlastní Zigbee aplikace.

Nejsou však implementovány všechny clustery standardu a pro tento systém musely být clustery pro měření oxidu uhličitého a pevných částic do knihovny doplněny.

Koncové body (endpoint) a clustery jsou v zařízení implementovány takto:



Endpoint 10 je základní koncový bod aplikace, je pro něho definován event pro cluster genIdentify, který umožňuje rozblikání LED na zařízení, a tedy rozeznání jednotlivých připojených zařízení. Endpoint 11 je koncový bod, který obsahuje přepínač. Endpoint 42 je nejdůležitějším koncovým bodem aplikace, jelikož zahrnuje všechny měřicí clustery. Endpoint 242 je speciální cluster.

## 2.2.2 Gateway – Sonoff USB Dongle Plus

Zigbee 3.0 USB Dongle Plus je univerzální USB adaptér, který může sloužit jako Zigbee router nebo jako Zigbee koordinátor, a být tak gateway pro Zigbee síť. Podporuje běžné operační systémy a také různé domácí asistenty (např. Home Assistant ZHA a OpenHAB). [20]

Důležité pro tuto práci je, že také podporuje bridge Zigbee2MQTT.

Specifikace USB Donglu jsou následující [20]:

- **SoC** – EFR32MG21
- **Protokol sériového rozhraní** – EmberZNet (EZSP)
- **USB čip** – CH9102F
- **Řízení toku** – Softwarové řízení toku (na rozdíl od předchozí verze)
- **Délka pouzdra** – 52 mm
- **Výstupní výkon** – 20 dBm
- **Cena** – okolo 30,49 € (713,19 Kč [08. 04. 2023])

## 2.2.3 Bridge – Zigbee2MQTT

Zigbee2MQTT je open source software licencovaný pod GNU (General Public License v3.0). Slouží jako bridge mezi Zigbee a MQTT, a umožňuje tak ovládat Zigbee zařízení přes MQTT protokol.

Zigbee2MQTT se skládá ze tří modulů, jeden pro hardwarový adaptér (v tomto případě pro Sonoff USB Dongle Plus), druhý pro zpracovávání Zigbee protokolu a poslední pro převod Zigbee zpráv do MQTT.

Software disponuje i front-endem, je tedy možné přes prohlížeč zpravovat a vizualizovat síť a Zigbee zařízení. [24]

## 2.2.4 MQTT broker – Mosquitto

V této podkapitole je popsán MQTT protokol a využitý MQTT broker.

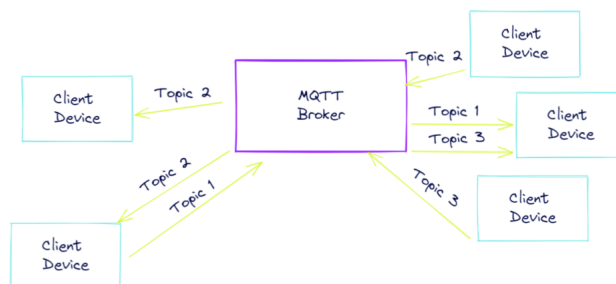
### MQTT protokol

MQTT je M2M (z jednoho zařízení do druhého – Machine to Machine) standardní protokol pro přenášení zpráv pro IoT. Má lightweight design, aby se dal použít na různých typech zařízení. Přenos zpráv je v režimu publish/subscribe, kdy zařízení odesílající data publikuje zprávy do konkrétního topicu a zařízení přijímající data z konkrétního topicu odebírá zprávy.

Typy zařízení jsou broker (předává zprávy připojených klientů) a client (umožňuje se připojit k brokeru a přijímat/odesílat zprávy).[25] [26]

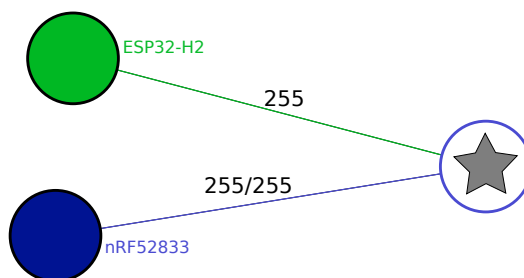
## Mosquitto

Eclipse Mosquitto je částí Eclipse Foundation, jde o open source MQTT broker, který implementuje MQTT protokol. [27]



Obr. 2.3: Diagram funkčnosti MQTT [28]

### 2.2.5 Testovací síť



Obr. 2.4: Vizualizace testovací Zigbee sítě včetně výkonnosti

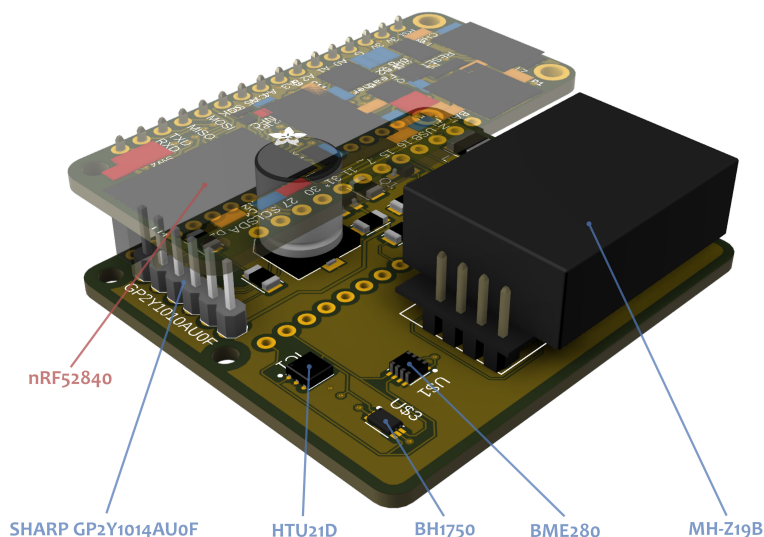
Na obrázku 2.4 je vizualizace testovací sítě. Symbol hvězdy je Zigbee koordinátor, modrý spoj a uzel je Zigbee router a zelený spoj s uzlem koncové zařízení.

Nad jednotlivými spoji jsou zobrazeny indikátory kvality spojení (LQI). Mezi koncovým zařízením a koordinátorem je pouze jedna hodnota. A mezi koordinátorem a routerem je hodnota ve tvaru X/Y, kdy jde o indikátor z koordinátoru do routeru i z routeru do koordinátoru.

Při sestavování této testovací sítě byla všechna zařízení v okolí 1 m mezi sebou, proto jsou hodnoty indikátoru maximální možné, a je tak docíleno kvalitního spojení. Tuto vizualizaci nabízí front-end Zigbee2MQTT bridge.

### 3 Hardwarové řešení

Kapitola Hardwarové řešení se zabývá návrhem desky plošného spoje pro senzorická zařízení, kompatibilitou s řídicí DPS a vytvořením kompletního výrobku. Na obrázku 3.1 lze vidět vizualizaci, jak řídicí DPS, tak senzorické DPS včetně vyznačení použitých senzorů.



Obr. 3.1: Vizualizace senzorické a řídicí DPS

#### 3.1 Senzorická Deska Plošného Spoje

Kapitola věnující se desce osázené snímači. Hlavní součástí, která tvoří polovinu desky, je patice pro desku řídicí. Tato patice je kompatibilní s deskami Adafruit řady Feather, protože z této řady je veliký výběr řídicích desek s různými procesory. Řešení patice tedy umožňuje použít například i různé typy komunikace mezi jednotkami, například Bluetooth Mesh síť.

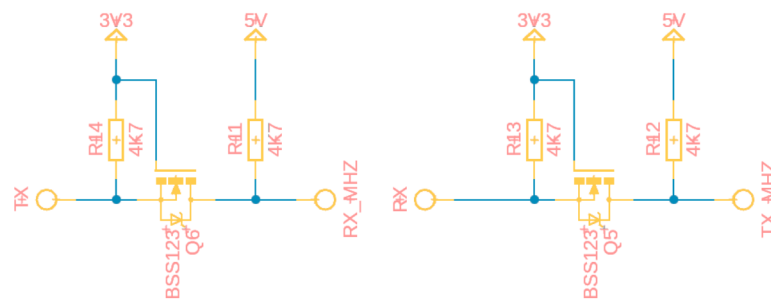
Adafruit poskytuje open-source design, je tedy možné vycházet z ostatních desek řady Feather a vytvořit řídicí DPS pro ESP32-H2 nebo jiné SoC a díky paticovému formátu bez nutnosti úprav desky senzorické.

Právě pro možnost tohoto řešení, popřípadě i pro osázení senzorické desky jinými snímači je na senzorické desce EEPROM (elektronicky mazatelná programovatelná paměť pouze pro čtení – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory). V této paměti by mohly být uloženy údaje o desce a připojených senzorech včetně adres.

### 3.1.1 Napájecí část

Adafruit Feather nabízí možnost napájení jak ze zdroje, tak z baterie s vestavěnou nabíječkou. Sensorická DPS tento model přejímá, a pokud je připojen zdroj, dojde k odpojení baterie a napájecí sběrnice jsou napájeny pouze ze zdroje.

Na sensorické DPS jsou dvě napájecí sběrnice 3,3 V a 5 V, můžou tak být použity senzory s různými napěťovými úrovněmi. Například senzor oxidu uhličitého MH-Z19B používá 5 V logiku, takže je napájen z příslušné sběrnice a komunikační sběrnice je opatřena level-shiftery.

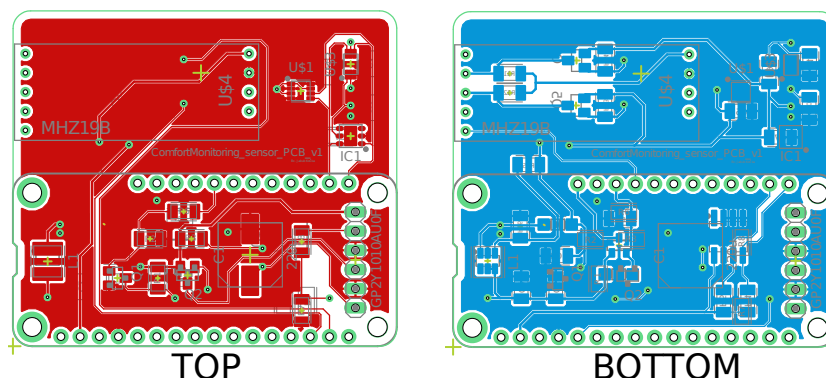


Obr. 3.2: Level-shiftery pro MH-Z19B

### 3.1.2 Sensorická část

Na sensorické desce plošného spoje jsou dvě sběrnice pro komunikaci se snímači. Jednotlivé snímače a sběrnice jsou také naznačeny na diagramu systému (obrázek 1.1). I2C sběrnice pro snímače teploty, vlhkosti, intenzity osvětlení a tlaku. Na I2C sběrnici je také připojena EEPROM.

Druhou sběrnici je UART pro snímač oxidu uhličitého.



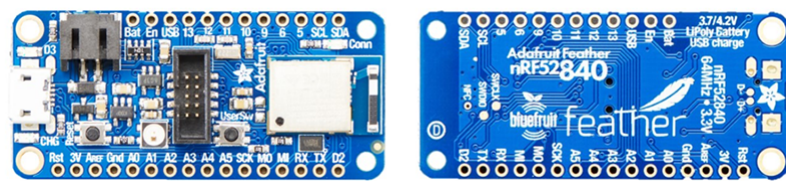
Obr. 3.3: Návrh sensorické DPS (měřítko 1:1)

## 3.2 Řídicí Deska Plošného Spoje

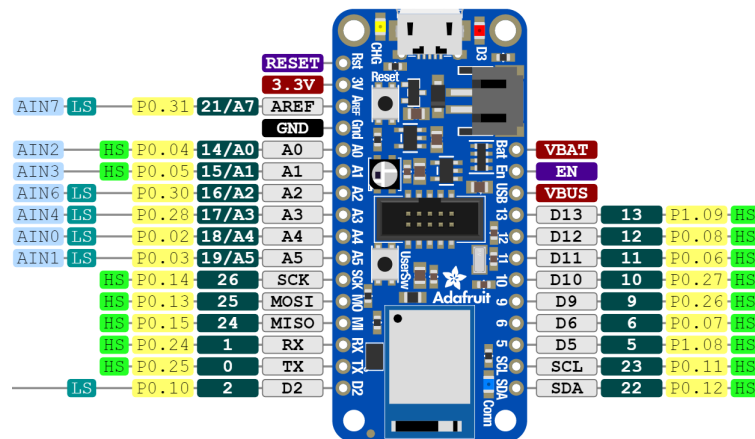
Řídicí deskou je Adafruit Feather nRF52840 Express (výměna použitého SoC je přibližena v kapitole 2.2.1).

Design této komerčně dostupné desky je open-source, takže je možné z ní vycházet a zakomponovat nový SoC, například ESP32-H2.

Tato řídicí deska byla zvolena z důvodu velkého množství desek v řadě Feather, které mají stejnou patici, a můžou se tedy kombinovat. I z tohoto důvodu je spojení sensorické desky plošného spoje a desky řídicí navrženo jako patice místo pevného spoje.



(a) Řídicí DPS [29]



(b) Feather pinout ([30] – převzato, upraveno)

Obr. 3.4: Adafruit Feather nRF52840 Express

Specifikace desky je převážně tvořena specifikacemi SoC nRF52840, prvky navíc jsou uvedeny v následujícím textu.

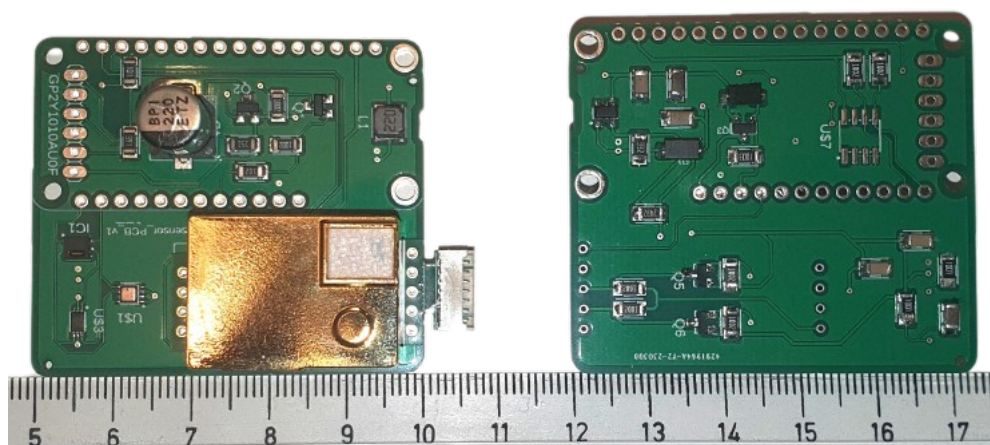
- Bateriový konektor a nabíječka pro 3,7 V Li-Po články
- Indikační LED nabíjení
- 2x uživatelská LED a 1x NeoPixel LED
- Reset tlačítko
- SWD konektor
- Cena – okolo \$24,95 (530,83 Kč [26. 04. 2023])



### 3.3 Reálné zapojení

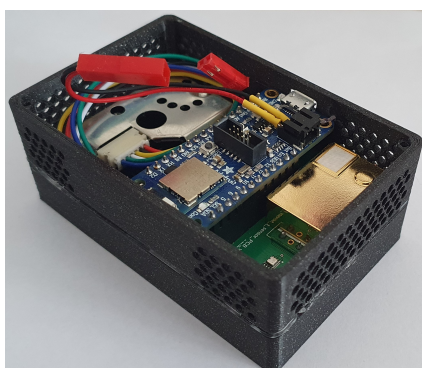
V této kapitole je popsáno a zobrazeno reálné zapojení hardwarového řešení. Většina použitých senzorů je dostupná jako jednotlivé moduly, proto pro ověření funkčnosti a pro přípravu softwarového vybavení byly senzory použity právě v modulové variantě a připojeny ke sběrnicím vytvořeným na kontaktním nepájivém poli. V této variantě byl ke zkoušení použit ESP32 SoC. ESP32-H2 a USB dongl s nRF52833 byly využity pro sestavení testovací sítě (kapitola 2.2.5).

Poznatky z testovacího zapojení byly aplikovány k vytvoření DPS, kterou lze vidět na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Reálné zapojení na DPS

Jak již bylo zmíněno, na DPS jsou vytvořeny 2 komunikační a 2 napájecí sběrnice. Senzor teploty, relativní vlhkosti, tlaku a intenzity osvětlení je na I2C sběrnici. Senzor CO<sub>2</sub> na UART sběrnici a senzor pevných částic je připojen přímo přes analogový vstup.



Obr. 3.6: Reálné zapojení uvnitř krytu

### 3.4 Návrh výrobku

Kapitola návrh výrobku popisuje především kryt měřicího zařízení. Kryt výrobku byl vytištěn na 3D tiskárně technologií FDM (nanášení roztaveného materiálu po vrstvách – Fused Deposition Modeling).

Všechny použité snímače jsou uvnitř krytu, z tohoto důvodu byl volen návrh krytu co možná nejvíce vzdušný pro dobrý kontakt snímačů s okolním prostředím. Pro zlepšení měření intenzity osvětlení bez nutnosti velkých korekcí jsou po vnějších stranách krytu (patrné z obrázku 3.7b) rozvedena optická vlákna sloužící jako světlovody, které jsou přivedeny přímo na snímač intenzity osvětlení.

Světlovody byly využity i pro některé signalizační LED pro přivedení na vnější stranu krytu.



(a) Model krytu měřicího zařízení – průhledný



(b) Model krytu měřicího zařízení

Obr. 3.7: Modely krytů měřicího zařízení

Na obrázku 3.7a je patrné rozložení komponentů měřicího zařízení. Baterie je ve spodní části krytu pevně přichycena. Nad baterií je umístěna senzorická DPS spolu

s připojenou řídicí DPS. Na jedné straně v blízkosti větracích otvorů je tedy většina snímačů, které jsou uvnitř ještě odděleny clonou, která je na vrchní části krytu pro zabránění ovlivnění snímače intenzitou osvětlení indikačními LED.

V druhé polovině krytu je zasazen do drážky snímač pevných částic, kdy ve spodní i horní části krytu je měřicí otvor korespondující s měřicím otvorem snímače.

Na obrázku 3.8 je zobrazen reálný kryt výrobku včetně porovnání s objektem (mince 10 Kč) a pravítkem pro představu rozměru.



Obr. 3.8: Reálný kryt výrobku

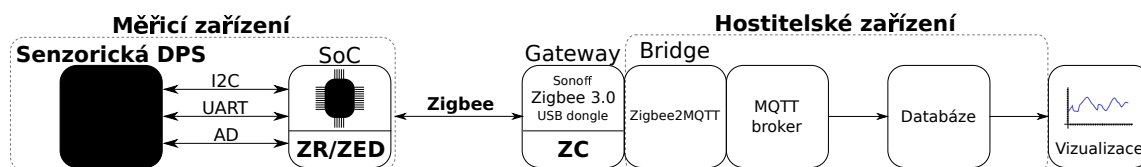
## Parametry měřicího zařízení

Tab. 3.1: Parametry výrobku

<b>Rozměry</b>	86 × 56 × 36 mm
<b>Kapacity baterie</b>	1200 mAh
<b>Typ baterie</b>	Li-Po
<b>Spotřeba (režim router – běžná)</b>	21,1 mAh
<b>Spotřeba (režim router – maximální (ohřev CO<sub>2</sub> senzoru))</b>	150 mAh
<b>Spotřeba (režim router – uvažován vliv CO<sub>2</sub> senzoru)</b>	21,3083 mAh
<b>Výdrž baterie na jedno nabití (režim router)</b>	2,5 dne

## 4 Softwarové vybavení

Kapitola Softwarové vybavení obsahuje popis použitých softwarových řešení v systému pro monitorování komfortu. Na obrázku 4.1 je znázorněn zjednodušený diagram systému, který reprezentuje celý řetězec od měření reálných fyzikálních veličin po jejich vizualizaci, pro který je potřeba vytvořit nebo použít softwarové vybavení. Bude rozdělen do dvou hlavních částí, část měřicího zařízení a hostitelského zařízení.



Obr. 4.1: Diagram softwarové části

### 4.1 Měřicí zařízení

V této části je popsáno softwarové řešení řídicí DPS. Softwarové vybavení měřicího zařízení může být ještě dále děleno na část komunikace se senzory a firmware zařízení, který jako takový definuje Zigbee zařízení a spojuje sensorická měření. Pro programování bylo využito prostředí Visual Studio Code s pluginem nRF Connect.

V příloze B je možné vidět class diagram softwarového řešení měřicího zařízení včetně popisu funkcí (B.1), jde ovšem spíše o soubory než vyloženě o diagram tříd, jelikož programovací jazyk je neobjektové C.

#### 4.1.1 Komunikace se senzory

Jelikož SoC nRF52840 má Cortex-M CPU, je možné použít Zephyr OS. Zephyr OS je designován jako velmi malý kernel pro použití v embedded systémech (jednoduché senzory až IoT bezdrátové aplikace) [32]. Zephyr je v nRF Connect základně.

Zephyr OS implementuje drivery potřebných sběrnic, tedy I2C a UART, a také driver pro analogový kanál. Je tedy potřeba pouze správně nakonfigurovat tyto drivery včetně konfigurace desky (soubory s příponou .dst a .conf).

V nRF Connect se vždy volí, pro jakou desku se bude sestavovat řešení (build), konfigurační soubor desky má příponu .dts a Adafruit Feather nRF52840 Express je již v SDK a toolchainu (verze 2.1.0) implementována, je tedy potřeba pouze pár úprav. Byla přidána infra-červená LED pro senzor pevných částic a změněna rychlost UART sběrnice (více v příloženém konfiguračním souboru). Periferie je také nutno povolit v souboru s příponou .conf.

## Sběrnice I2C a UART

Konfigurační soubor desky tedy specifikuje periferie a jejich parametry, a také jednotlivá zařízení na periferiích (adresy, parametry), poté specifikuje .overlay soubor (podrobněji o této struktuře v oficiální Zephyr dokumentaci [32] – sekce „Device Driver Model“).

Výpis 4.1: Konfigurační soubor adafruit\_feather\_nrf52840.overlay

```
1 &feather_i2c {
2     bh1750: bh1750@23 {
3         compatible = "i2c-device";
4         reg = < 0x23 >;
5         label = "Illuminance_sensor_BH1750";
6     };
7
8     htu21d: htu21d@40 {
9         compatible = "i2c-device";
10        reg = < 0x40 >;
11        label = "Temperature_and_humidity_sensor_HTU21D";
12    };
13
14    bme280: bme280@76 {
15        compatible = "bosch,bme280";
16        reg = < 0x76 >;
17    };
18 };
19
20 &feather_serial {
21     mhz19b {
22         compatible = "winsen,mhz19b";
23         maximum-range = <5000>;
24     };
25 };
```

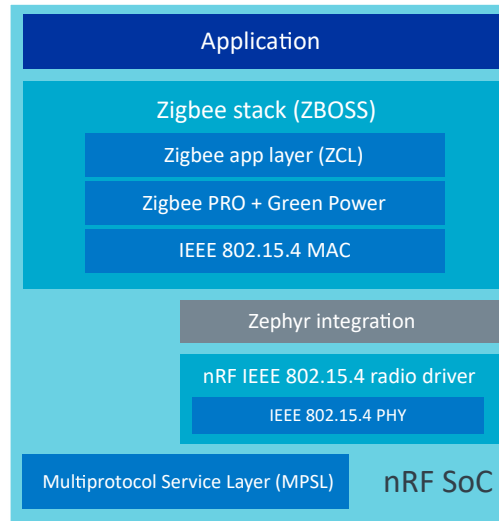
Na výpisu 4.1 jsou patrné adresy zařízení připojených na sběrnici. Senzor BME280 a MH-Z19B je zahrnut v Zephyr, jejich implementace je tedy o něco jednodušší pomocí Zephyr knihoven.

## A/D kanál

A/D kanál se konfiguruje obdobně jako periferie zmíněné výše. Nastavuje se GPIO kanálu, napětová reference, zesílení a rozlišení kanálu. Podrobněji v příloženém souboru „gp2y1010au.h“.

## 4.1.2 Firmware

Pro implementaci Zigbee standardu na deskách Nordic se používá ZBOSS API (rozhraní pro programování aplikací – Application Programming Interface).



Obr. 4.2: Zigbee architektura na Nordic nRF52 sérii [33]

### ZBOSS API

ZBOSS jsou implementace Zigbee standardu firmou DSR Corporation (Doing Software Right), certifikované CSA.

Například relativně nově (25. 1. 2023) firma DSR získala certifikaci Zigbee Direct, což je nová funkcionální Zigbee, která umožňuje komunikovat se Zigbee zařízeními skrze Bluetooth interface. [34]

ZBOSS API poskytuje následující funkce pro tvorbu Zigbee aplikace [35]:

- Zigbee Cluster Library (ZCL) definice a zpracování
- Zigbee Device Object (ZDO) služby
- Vnitřní datové struktury Zigbee
- Multitasking a paměťovou správu (nižší úroveň API)

Podle definice [35] by měla vyvíjená Zigbee aplikace implementovat:

- Hlavičky zdrojových souborů
- Deklarovat globální ZCL data: listy atributů, clustery, koncové body, ZCL kontext
- Registrovat ZCL koncové body a kontext zařízení
- Volitelně: nastavovat základní hodnoty (síťovou roli, adresu, bezpečnostní klíč atd.)

- Zapnutí ZBOSS vláken funkcí `zigbee_enable()`
- Funkci `zboss_signal_handler()` pro obsluhu příchozích událostí
- Zpětně volající funkce zařízení
- Obsluhu příkazu pro cluster

### **Přidání vlastních clusterů**

Jelikož Zigbee standard je poměrně rozsáhlý, ZBOSS API zatím neimplementuje úplně všechny clustery, jak již bylo zmíněno, clustery koncentrace CO<sub>2</sub> a pevných částic musely být pro tuto práci přidány. Jde o clustery definované standardem v aktualizované verzi 8 z roku 2019, který není veřejným dokumentem a byl zaslán CSA.

Vychází z ostatních definic clusterů v ZBOSS API, a jejich použití v hlavním zdrojovém souboru se tedy neliší. Definice jsou součástí elektronické přílohy „`zb_zcl_co2_measurement.h`“ a „`zb_zcl_pm25_measurement.h`“.

### **Nahrání programu**

Jelikož pro nahrávání firmwaru přes USB by musel být na řídicí desce nahrán kompatibilní bootloader, kterým desky Adafruit Feather v základu nedisponují, je nutné využít SWD konektor. Řídicí DPS byly programovány skrze Nordic nRF52 DK, tato deska disponuje nRF52833 SoC a debuggerem, který na Adafruit Feather rovněž není, takže byla využita i k lazení aplikace.

## **4.2 Hostitelské zařízení**

V této části je popsáno softwarové řešení hostitelského zařízení, tedy v tomto případě osobního počítače s operačním systémem Windows 11, ale bylo by možné použít například jednodeskový počítač Raspberry Pi nebo obdobné zařízení.

V následujících podkapitolách jsou jednotlivé části řetězce z diagramu 4.1 uvedeny a popsány v pořadí, v jakém je nutné jednotlivé softwarové prvky na sebe vázat.

### **4.2.1 Gateway**

Sonoff Zigbee 3.0 USB dongle disponuje od výrobce firmwarem Zigbee koordinátoru, nebylo tedy nutné nijak ho upravovat.

## 4.2.2 MQTT broker

Mosquitto se na Windows OS běžně nainstaluje, pokud se z nainstalovaného místa přes příkazový řádek spustí mosquitto s atributem „-v“ („verbose“), veškerá komunikace se zaznamenává do příkazové řádky a je možné MQTT zprávy pozorovat.

Výpis 4.2: Příklad MQTT zpráv

```
1683477791: Received PINGREQ from python-mqtt-310-pub
1683477791: Sending PINGRESP to python-mqtt-310-pub
```

## 4.2.3 Bridge

Zigbee2MQTT je možné instalovat různými způsoby, podrobněji jsou popsány v oficiální dokumentaci. V tomto případě byla volena verze přes Node-RED. Je nutné Zigbee2MQTT správně nakonfigurovat (COM port, rychlost a typ USB adaptéru, specifikace MQTT atd.). Konfigurace je na výpisu 4.3.

Výpis 4.3: Konfigurace Zigbee2MQTT

```
1  homeassistant: false
2  permit_join: true
3  mqtt:
4    base_topic: zigbee2mqtt
5    server: mqtt://localhost:1883
6  serial:
7    port: \\.\COM10
8    baudrate: 115200
9    adapter: ezsp
10 frontend:
11   port: 8080
12   host: 0.0.0.0
13 experimental:
14   new_api: true
15 zigbee_herdsman_debug: true
16 advanced:
17   channel: 16
18   log_level: debug
19   homeassistant_legacy_entity_attributes: false
20 devices: devices.yaml
21 device_options:
22   legacy: false
```



## 4.2.4 Databáze

InfluxDB nabízí jak cloudové řešení, tak open-source lokální řešení s možností instalace binárních souborů nebo Docker kontejneru. V tomto případě sestavování testovacího systému bylo voleno lokální řešení v podobě Docker kontejneru.

## 4.2.5 Vkládání dat do databáze

Pro vkládání dat do databáze je možné využít Telegraf plugin nabízený InfluxDB, jde o open-source server pro sbírání a odesílání dat do databáze s podporou MQTT.

Jelikož je ale většina měřených hodnot specifikovaných Zigbee protokolem datového typu „int16“ nebo „uint16“, kdy jsou v tomto typu naměřená data opravdu zasílána skrze Zigbee síť (s posunem desetinné čárky), bylo využito vlastního přístupu pomocí skriptů v jazyce Python.

Jak lze vidět na výpisu 4.3, základní MQTT topic je „zigbee2mqtt“. V tomto topicu se nalézají subtopicy, na které je navázán skript pro publikování zpráv, tedy publisher, a skript pro odebírání zpráv, tedy subscriber.

### MQTT publisher

Python skript chovající se jako publisher řídí časy měření. Periodicky v definovaném čase odesílá do topicu měřicího endpointu každého zařízení (příklad: zigbee2mqtt/ComfortMonitor\_1/42/set) požadavek na vyčtení měřené hodnoty, například formát zprávy pro teplotu je uveden na následujícím výpisu 4.4.

Výpis 4.4: Příklad formátu publish zprávy

```
'{"read":{
  "attributes":_["measuredValue"],
  "cluster":"msTemperatureMeasurement",
  "options":{}}
  }'
```

### MQTT subscriber

Naopak Python skript, který je implementován jako subscriber, je připojen k subtopicu zigbee2mqtt/bridge/logging, odkud vybírá všechny užitečné zprávy z měřících zařízení, hodnoty jsou přepočítávány na správné desetinné místo a následně poslány do databáze.

Oba Python skripty jsou součástí elektronické přílohy.

## 4.2.6 Vizualizace

Obdobně jako InfluxDB nabízí Grafana řešení cloudové nebo lokální. Pro tento testovací systém bylo využito lokálního řešení jako Docker kontejner. Vizualizace je hostitelským zařízením vysílána na svou IP adresu, je tedy možné se k vizualizaci na lokální síti připojit, bylo by však možné zpřístupnit ji i z veřejné sítě.

Je nakonfigurován administrátorský uživatel a uživatel, který může data pouze prohlížet.

### Propojení databáze a vizualizace

Grafana podporuje InfluxDB jako možný zdroj dat, je potřeba provést pouze příslušnou konfiguraci pro tento zdroj (zadání IP adresy, autentizace, detaily InfluxDB – organizace, bucket, token).

Po úspěšné konfiguraci datového zdroje je možné vytvořit panel prvků (dashboard), na kterém se nastaví jednotlivé získávání dat (query) do grafů.

Výpis 4.5: Příklad query koncentrace pevných částí z InfluxDB do Grafany

```
1 from(bucket: "ComfortMonitor")
2   |> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
3   |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "my_measurement")
4   |> filter(fn: (r) => r["_field"] == "dust")
5   |> yield(name: "value")
6
7 from(bucket: "ComfortMonitor")
8   |> range(start: v.timeRangeStart, stop: v.timeRangeStop)
9   |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "my_measurement")
10  |> filter(fn: (r) => r["_field"] == "dust")
11  |> aggregateWindow(every: 15m, fn: mean, createEmpty: false)
12  |> yield(name: "mean_15m")
```

Jde o query jedné hodnoty dvakrát, kdy při druhém query je tato hodnota průměrována po 15 minutách. Tyto dva průběhy koncentrace pevných částic z jednoho zařízení jsou patrné v kapitole s měřenými hodnotami.

## 5 Dokumentace a vyhodnocení vlastností

V následující kapitole jsou uvedena měření vlastností Zigbee sítě a senzorická měření včetně popisu jednotlivých. Uvedené grafy jsou také ve větším formátu přiloženy v příloze C pro měření Zigbee sítě a v příloze D pro senzorická měření.

### 5.1 Změřené vlastnosti Zigbee sítě

Měření vlastností sítě bylo prováděno pro různé definované scénáře. Mezi důležité vlastnosti sítě patří indikátor kvality spojení LQI (popsán v kapitole 2.1.2). Tento indikátor byl tedy měřen pro každý uvedený scénář. Dalšími měřenými vlastnostmi je latence neboli zpoždění sítě, které je v této práci čas mezi odeslaným packetem a přijetím potvrzení o doručení daného packetu. Z kolísání latence lze určit jitter sítě jako směrodatnou odchylku z hodnot latence.

#### 5.1.1 Princip měření

Pro měření byla sestavena Zigbee síť a měřicí zařízení bylo umístěno do specifikovaného místa v závislosti na daném scénáři měření. Následně byl použit skript v jazyce Python jako MQTT publisher (popsáno v kapitole 4.2.5), v tomto skriptu byl definován pevný počet packetů pro každé měření, který je stanoven na 1000, a velikost packetu 59 B (cluster genBasic, atribut zclVersion => data 8 B). Dále byla ve skriptu nastavována perioda mezi odesíláním jednotlivých packetů.

Pro odchyťávání a zaznamenání komunikace mezi zařízeními byl použit program Wireshark spolu s Nordic nRF52840 donglem s firmwarem „nRF Sniffer for 802.15.4“ určeným k analýze a debugování Zigbee aplikace. Jelikož komunikace mezi zařízeními se skládá z více packetů, byl na zaznamenaná data použit filtr (`data.len == 8 || frame.len == 3`), který filtruje pouze rámce s 8 B (měřicí packet) a rámce s 3 B (ACK – potvrzení o přijetí). Tyto vyfiltrované rámce jsou exportovány ve formátu JSON.

Exportovaná data byla poté vyhodnocena skriptem v jazyce Python a byly získány hodnoty a vytvořeny grafy jednotlivých měření.

Index kvality spojení LQI je měřen zvlášť pro každý scénář.

#### Limity měření

Hardwarový limit měření by teoreticky mohl způsobovat Gateway (popsán v kapitole 2.2.2), kdy je použita přenosová rychlost pro komunikaci s ním 115200 Bd, kdy je rychlost přenosu 1 B 86,806  $\mu$ s ([36]), což znamená 5,122 ms pro celý měřicí packet. Tento hardwarový limit ovšem nebyl překážkou, jelikož bylo zjištěno, že

s použitým softwarovým řešením je možné dosáhnout nejnižší periody mezi packety okolo 50 ms.

Limity Zigbee sítě jsou dány použitými přijímači/vysílači, kdy jsou vlastnosti použitého řešení uvedeny na následujícím měření.

### 5.1.2 Scénář 1: uzavřený prostor – přímá viditelnost

Na základě měření byly zjištěny limity použitého řešení (popsané v kapitole 5.1.1), původní počet měřených period byl 6, kdy byly uvažovány i hraniční možnosti Gateway donglu, ale jak bylo uvedeno nejnižší možná perioda mezi packety je okolo 50 ms, a je tedy poslední uvedenou.

- 1000 packetů
- velikost packetu – 59 B
- velikost datového rámce – 8 B
- 3 vzdálenosti (20 m, 10 m, 5 m)
- 4 periody mezi packety (0,5 s; 0,25 s; 0,1 s; 0,05 s)

#### 20 metrů – LQI

Tab. 5.1: Zigbee síť LQI – 20 metrů (uzavřený prostor – přímá viditelnost)

	Koordinátor -> Zigbee zařízení	Zigbee zařízení -> Koordinátor
1	104	219
2	104	172
3	100	171
4	96	171
5	100	171
6	96	170
7	104	170
8	100	170
9	100	171
10	96	171

Aritmetický průměr LQI je dle rovnice 5.1 104/175,6.

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \sum x_i \quad (5.1)$$

kde  $\mu$  ... aritmetický průměr,  $N$  ... počet hodnot,  $i$  ... index hodnoty.

Nejistota typu A se vypočítá dle rovnice 5.2:

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{N \cdot (N - 1)} \cdot \sum (x_i - \mu)^2} \quad (5.2)$$

kde  $u_A(x)$  ... nejistota typu A,  $N$  ... počet hodnot,  $x_i$  ... hodnota,  $\mu$  ... aritmetický průměr.

Nejistota typu B nebyla pro měření uvažována, kombinovaná nejistota je poté shodná s nejistotou typu A, která je pro index kvality spojení LQI pro vzdálenost 20 m 1/4,8.

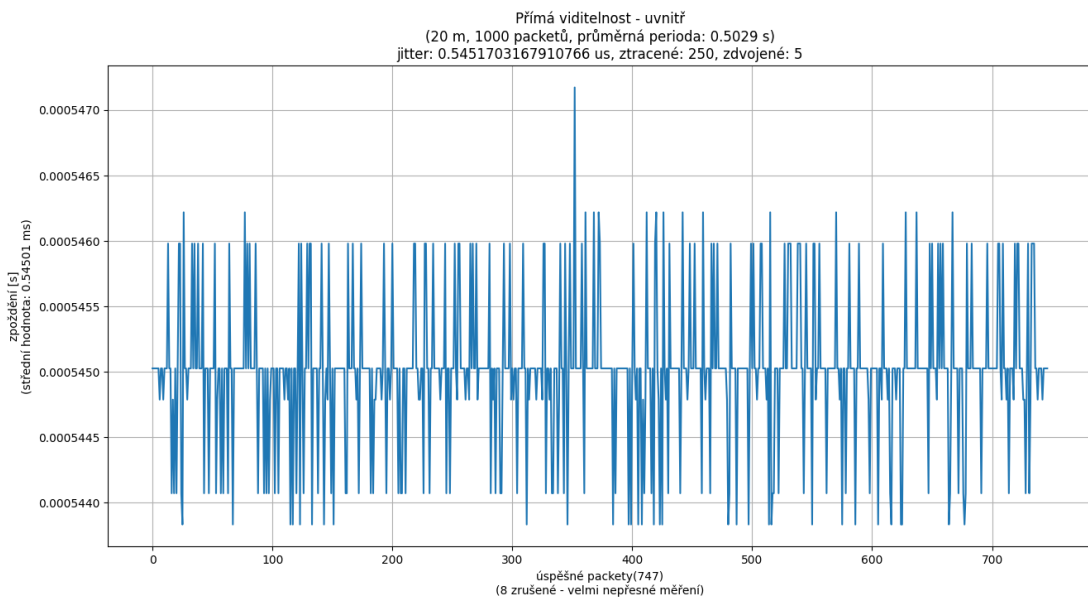
Rozšířená nejistota pro LQI s koeficientem rozšíření 2, pro pravděpodobnost 95 % je dle rovnice 5.3 2/9,6.

$$U(x) = k_r \cdot u_C(x) \quad (5.3)$$

kde  $U(x)$  ... rozšířená nejistota,  $k_r$  ... koeficient rozšíření,  $u_C(x)$  ... kombinovaná nejistota.

Celkový index kvality spojení LQI pro vzdálenost 20 m tedy je 104/175,6 ± 2/9,6.

## 20 metrů – perioda 0,5 sekundy



Obr. 5.1: Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,5 s

- Vypočtený celkový čas – 500 s
- Skutečný celkový čas – 507,376 s

- **Průměrná perioda** – 0,5029 s
- **Počet úspěšných packetů** – 747
- **Počet ztracených packetů** – 250
- **Počet zdvojených packetů** – 5
- **Packety neuvažované pro výpočty** – 8
- **Střední hodnota zpoždění** – 0,54501 ms
- **Jitter** – 0,54517  $\mu$ s

Průměrná perioda byla získána obdobně jako LQI použitím rovnice 5.1, kdy jsou jednotlivé hodnoty tvořeny rozdíly dvou po sobě jdoucích časů odeslaných packetů.

Počet úspěšných packetů je brán jako počet všech packetů, kterým bylo potvrzeno úspěšné doručení, počet ztracených packetů je počet všech packetů, kterým doručení nebylo potvrzeno, a počet zdvojených packetů je rozdíl mezi přijatými packety a skutečným odeslaným počtem packetů (1000). Packety neuvažované pro výpočet jsou všechny packety, které měly velice odlišné hodnoty a zkreslovaly naměřená data.

Střední hodnota zpoždění je získána použitím rovnice 5.1, kdy jsou hodnotami jednotlivá zpoždění, tedy čas mezi odesláním packetu a přijetím potvrzení o doručení daného packetu.

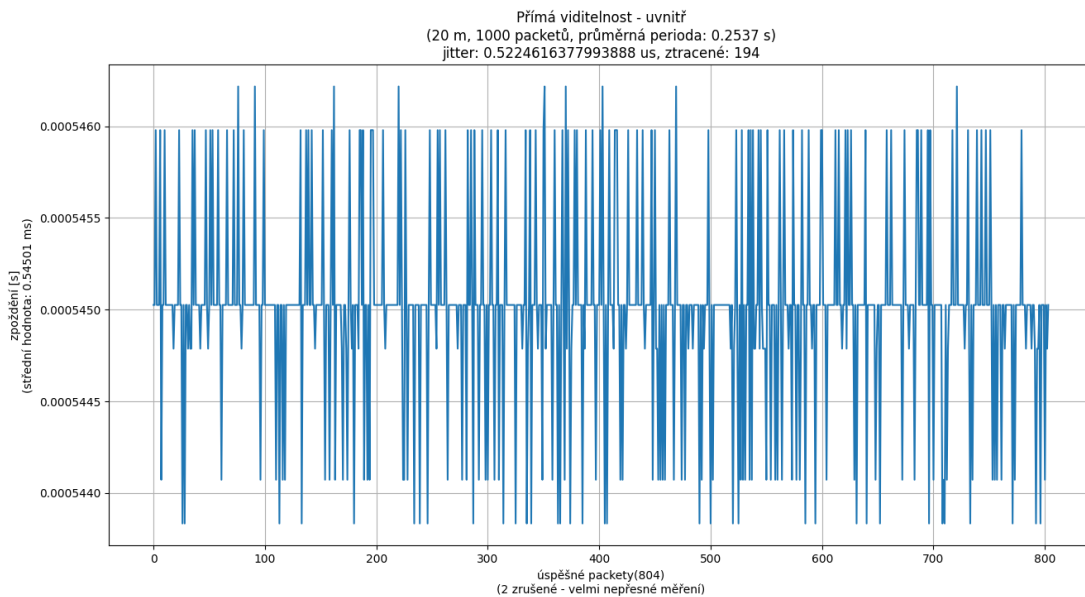
Jitter je následně vypočítán jako směrodatná odchylka z hodnot latence dle následující rovnice:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum (x_i - \mu)^2} \quad (5.4)$$

kde  $\sigma$  ... směrodatná odchylka (jitter),  $N$  ... počet hodnot,  $x_i$  ... hodnota,  $\mu$  ... aritmetický průměr.

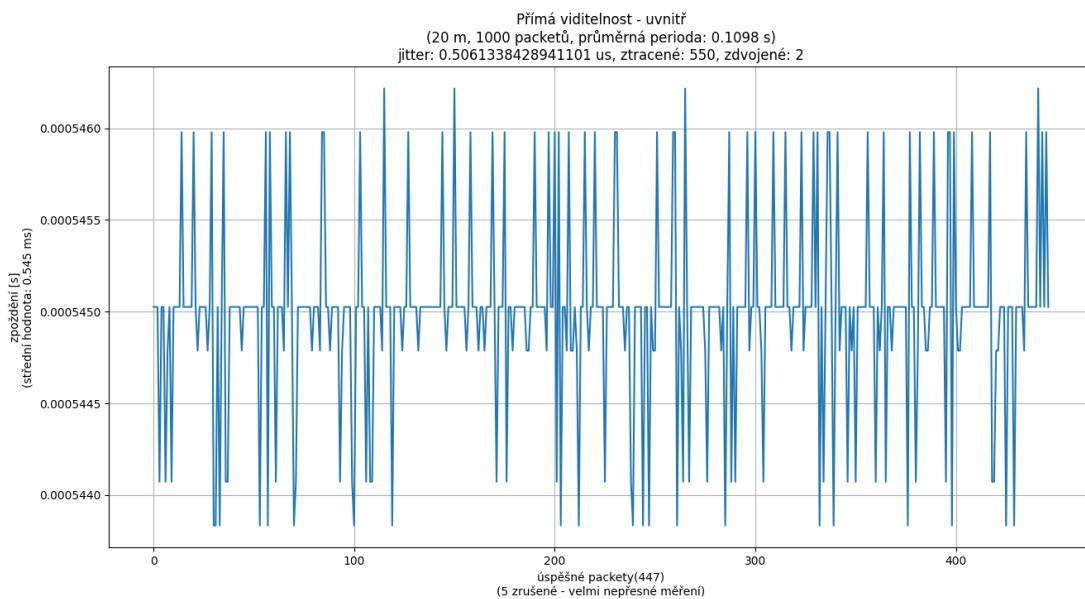
## **20 metrů – perioda 0,25 sekundy**

- **Vypočtený celkový čas** – 250 s
- **Skutečný celkový čas** – 253,788 s
- **Průměrná perioda** – 0,2537 s
- **Počet úspěšných packetů** – 804
- **Počet ztracených packetů** – 194
- **Packety neuvažované pro výpočty** – 2
- **Střední hodnota zpoždění** – 0,54501 ms
- **Jitter** – 0,52246  $\mu$ s



Obr. 5.2: Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,25 s

### 20 metrů – perioda 0,1 sekundy



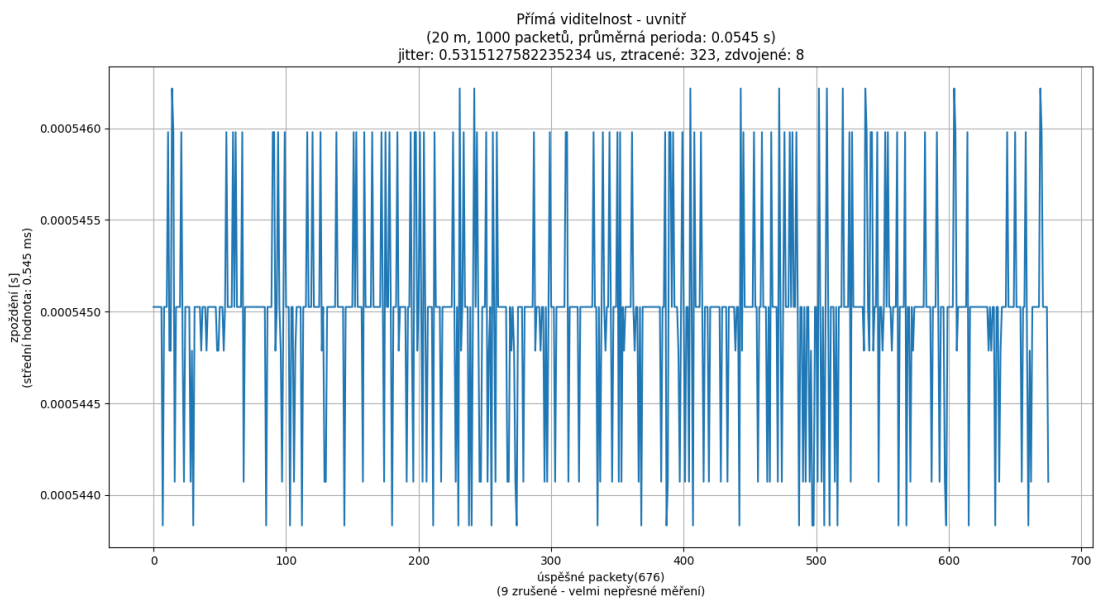
Obr. 5.3: Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,1 s

- Vypočtený celkový čas – 100 s
- Skutečný celkový čas – 110,291 s
- Průměrná perioda – 0,1098 s

- Počet úspěšných packetů – 447
- Počet ztracených packetů – 550
- Počet zdvojených packetů – 2
- Packety neuvažované pro výpočty – 5
- Střední hodnota zpoždění – 0,545 ms
- Jitter – 0,50613  $\mu$ s

## 20 metrů – perioda 0,050 sekundy

Původní perioda tohoto měření měla být 0,01 s, ovšem jak bylo popsáno v kapitole 5.1.1 je uvedena nejnižší dosažitelná perioda. Obdobně tomu je i u následujících grafů.



Obr. 5.4: Měření Zigbee sítě 20 m – perioda 0,050 s

- Skutečný celkový čas – 16,164 s
- Průměrná perioda – 0,0545 s
- Počet úspěšných packetů – 676
- Počet ztracených packetů – 323
- Počet zdvojených packetů – 8
- Packety neuvažované pro výpočty – 9
- Střední hodnota zpoždění – 0,545 ms
- Jitter – 0,53151  $\mu$ s



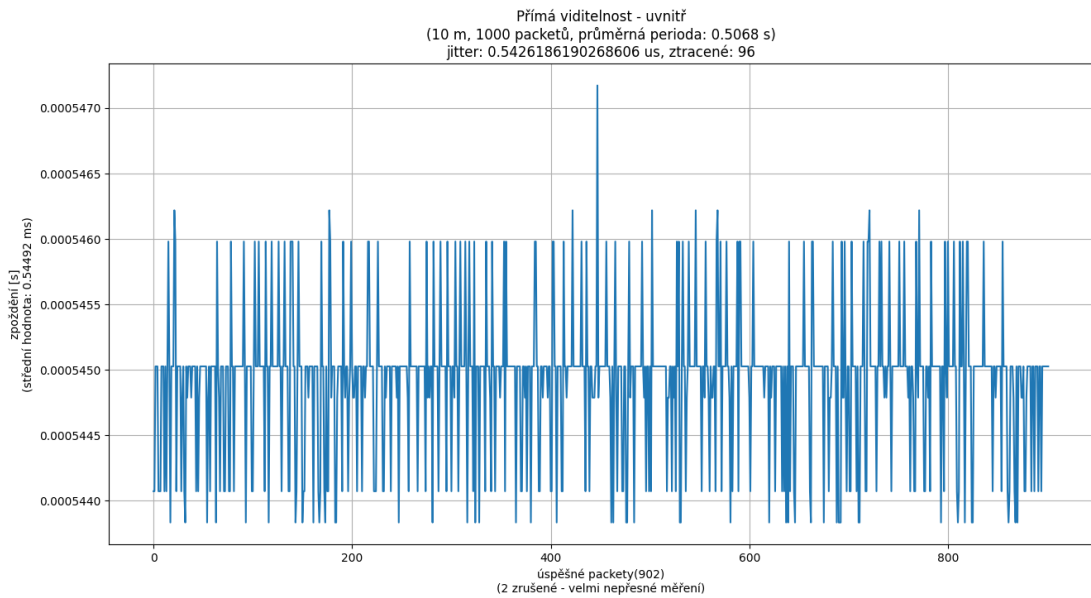
## 10 metrů – LQI

Tab. 5.2: Zigbee síť LQI – 10 metrů (uzavřený prostor – přímá viditelnost)

	Koordinátor -> Zigbee zařízení	Zigbee zařízení -> Koordinátor
1	112	164
2	116	168
3	112	169
4	112	172
5	116	174
6	108	174
7	112	174
8	120	175
9	116	175
10	116	177

- Aritmetický průměr  $\mu$  – 114/172,2
- LQI – 114/172,2  $\pm$  2,1/2,5

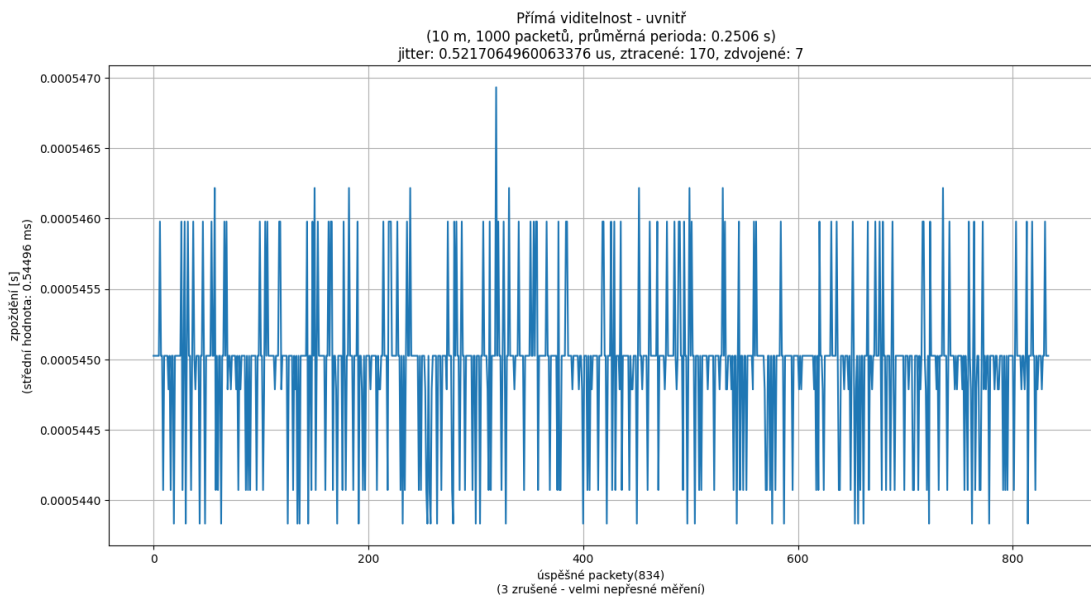
## 10 metrů – perioda 0,5 sekundy



Obr. 5.5: Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,5 s

- Vypočtený celkový čas – 500 s
- Skutečný celkový čas – 507,192 s
- Průměrná perioda – 0,5068 s
- Počet úspěšných packetů – 902
- Počet ztracených packetů – 96
- Packety neuvažované pro výpočty – 2
- Střední hodnota zpoždění – 0,54492 ms
- Jitter – 0,54262  $\mu$ s

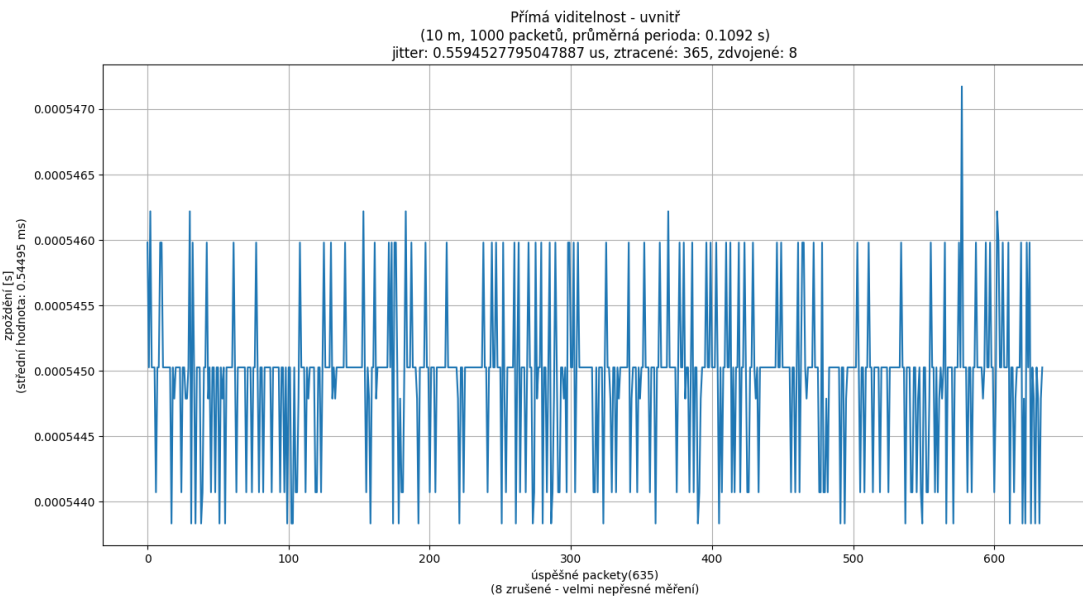
### 10 metrů – perioda 0,25 sekundy



Obr. 5.6: Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,25 s

- Vypočtený celkový čas – 250 s
- Skutečný celkový čas – 253,931 s
- Průměrná perioda – 0,2506 s
- Počet úspěšných packetů – 834
- Počet ztracených packetů – 170
- Počet zdvojených packetů – 7
- Packety neuvažované pro výpočty – 3
- Střední hodnota zpoždění – 0,54496 ms
- Jitter – 0,52171  $\mu$ s

## 10 metrů – perioda 0,1 sekundy

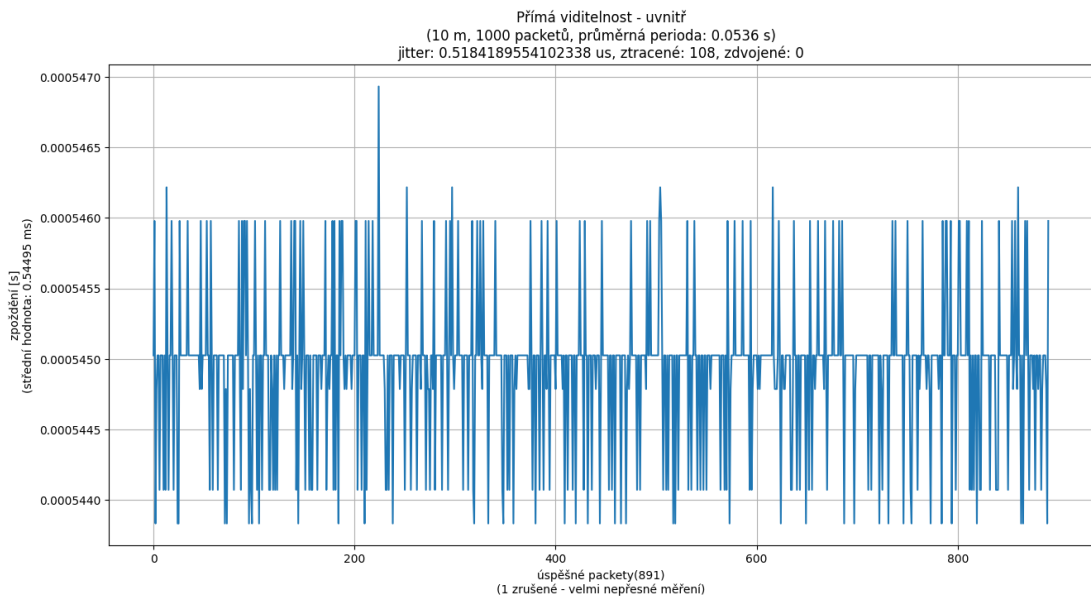


Obr. 5.7: Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,1 s

- Vypočtený celkový čas – 100 s
- Skutečný celkový čas – 110,469 s
- Průměrná perioda – 0,1092 s
- Počet úspěšných packetů – 635
- Počet ztracených packetů – 365
- Počet zdvojených packetů – 8
- Packety neuvažované pro výpočty – 8
- Střední hodnota zpoždění – 0,54495 ms
- Jitter – 0,55945  $\mu$ s

## 10 metrů – perioda 0,050 sekundy

- Skutečný celkový čas – 16,158 s
- Průměrná perioda – 0,0536 s
- Počet úspěšných packetů – 891
- Počet ztracených packetů – 108
- Packety neuvažované pro výpočty – 1
- Střední hodnota zpoždění – 0,54495 ms
- Jitter – 0,51842  $\mu$ s



Obr. 5.8: Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,050 s

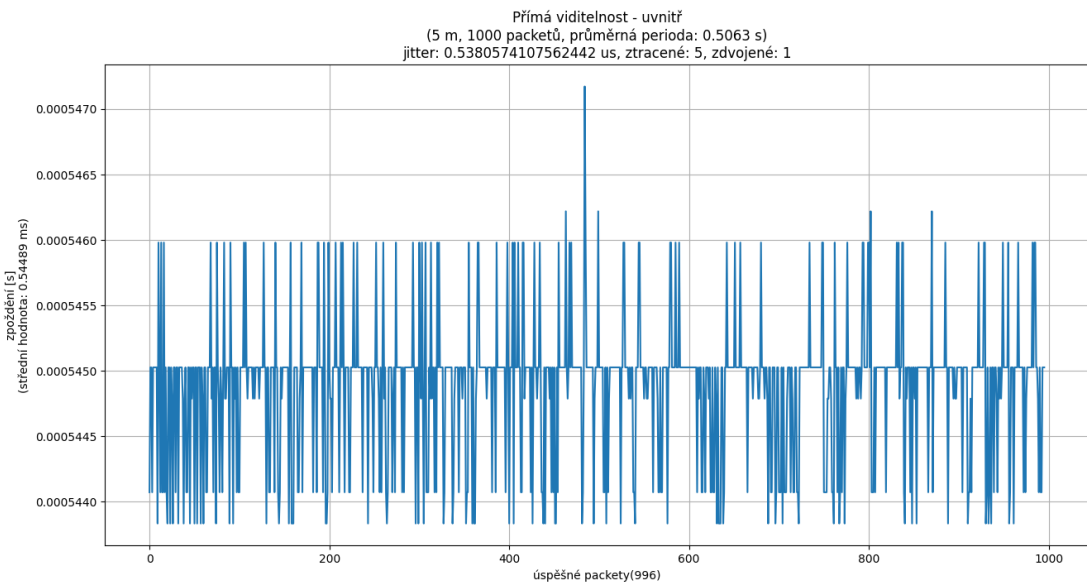
## 5 metrů – LQI

Tab. 5.3: Zigbee síť LQI – 5 metrů (uzavřený prostor – přímá viditelnost)

	Koordinátor -> Zigbee zařízení	Zigbee zařízení -> Koordinátor
1	128	192
2	120	193
3	120	192
4	128	192
5	128	193
6	124	194
7	108	195
8	132	193
9	144	194
10	124	197

- Aritmetický průměr  $\mu$  – 125,6/193,5
- LQI – 125,6/193,5  $\pm$  5,9/1

## 5 metrů – perioda 0,5 sekundy

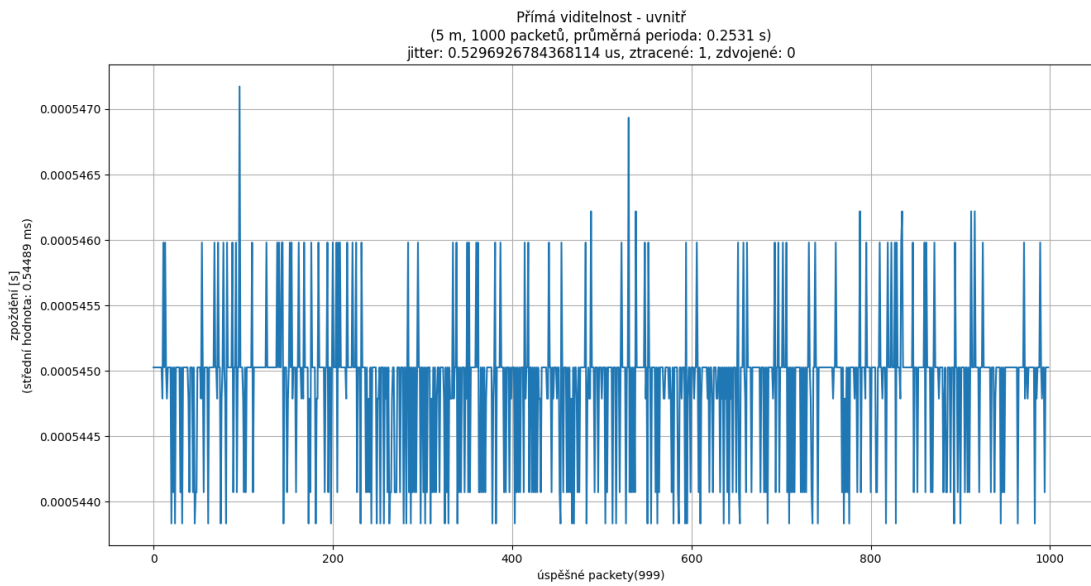


Obr. 5.9: Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,5 s

- Vypočtený celkový čas – 500 s
- Skutečný celkový čas – 507,317 s
- Průměrná perioda – 0,5063 s
- Počet úspěšných packetů – 996
- Počet ztracených packetů – 5
- Počet zdvojených packetů – 1
- Střední hodnota zpoždění – 0,54489 ms
- Jitter – 0,53806  $\mu$ s

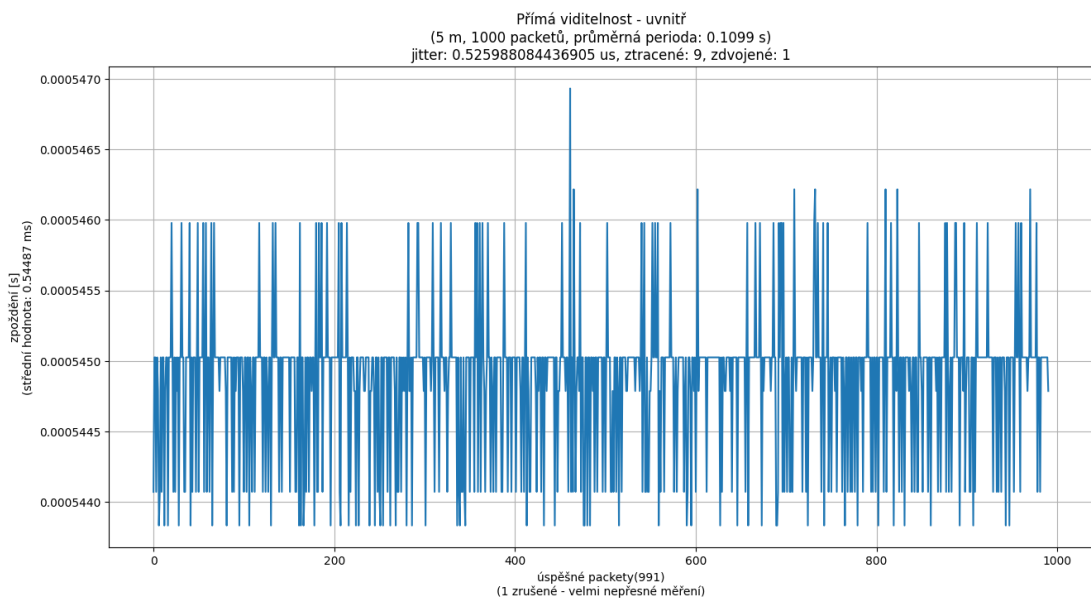
## 5 metrů – perioda 0,25 sekundy

- Vypočtený celkový čas – 250 s
- Skutečný celkový čas – 253,649 s
- Průměrná perioda – 0,2531 s
- Počet úspěšných packetů – 999
- Počet ztracených packetů – 1
- Střední hodnota zpoždění – 0,54489 ms
- Jitter – 0,52969  $\mu$ s



Obr. 5.10: Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,25 s

### 5 metrů – perioda 0,1 sekundy

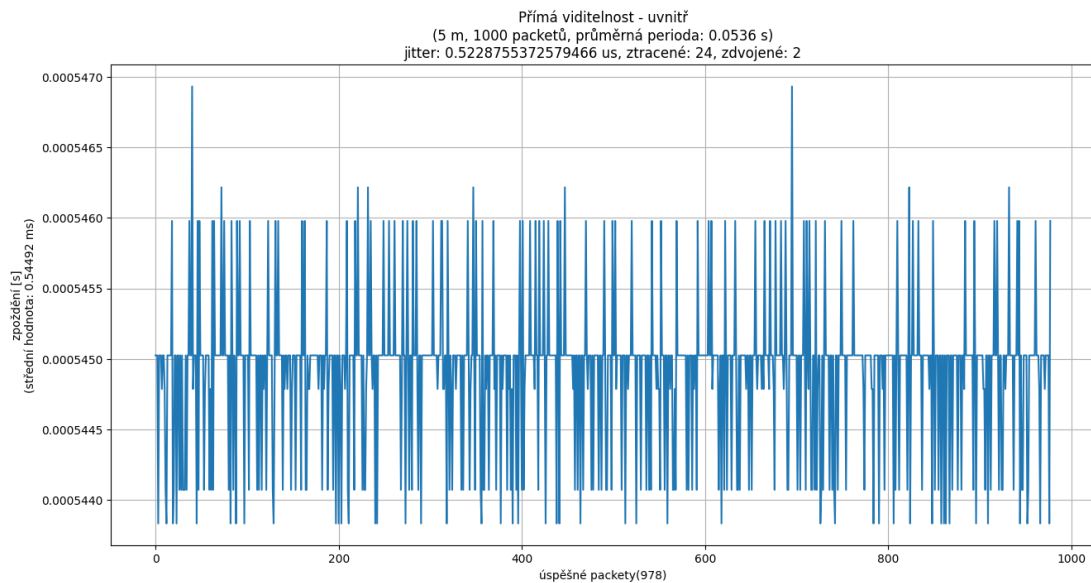


Obr. 5.11: Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,1 s

- Vypočtený celkový čas – 100 s
- Skutečný celkový čas – 110,255 s
- Průměrná perioda – 0,1099 s

- Počet úspěšných packetů – 991
- Počet ztracených packetů – 9
- Počet zdvojených packetů — 1
- Packety neuvažované pro výpočty – 1
- Střední hodnota zpoždění – 0,54487 ms
- Jitter – 0,52599  $\mu$ s

### 5 metrů – perioda 0,050 sekundy

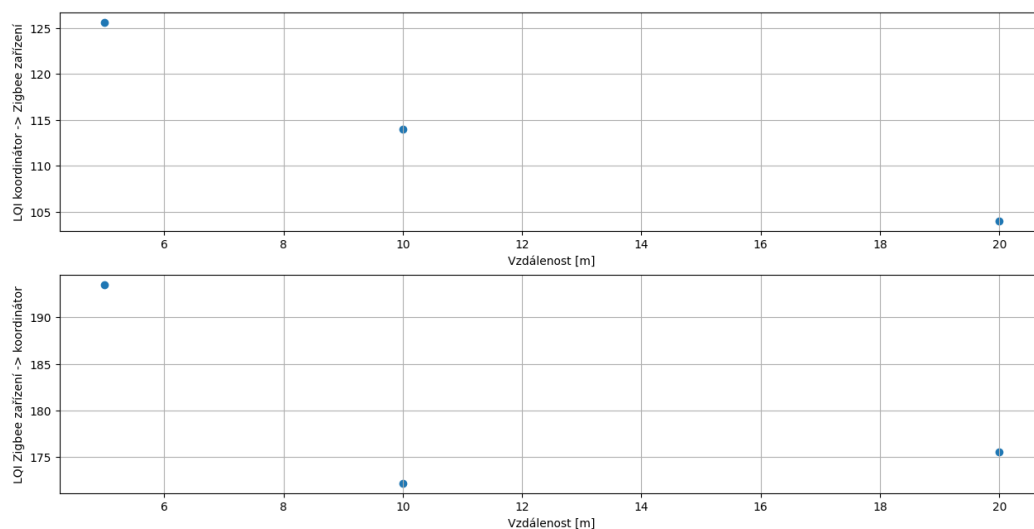


Obr. 5.12: Měření Zigbee sítě 5 m – perioda 0,050 s

- Skutečný celkový čas – 16,178 s
- Průměrná perioda – 0,0536 s
- Počet úspěšných packetů – 978
- Počet ztracených packetů – 24
- Počet zdvojených packetů — 2
- Střední hodnota zpoždění – 0,54492 ms
- Jitter – 0,52288  $\mu$ s

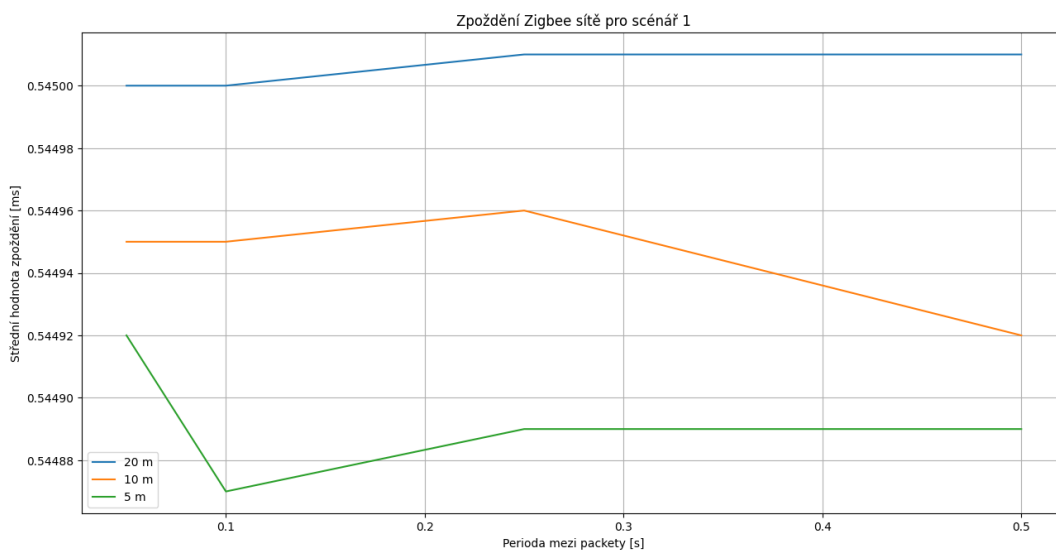
### Souhrn scénáře 1 (uzavřený prostor – přímá viditelnost)

Z naměřených hodnot indexu kvality spojení LQI lze říci, že s rostoucí vzdáleností dle očekávání klesá LQI, také je patrné že dosah USB donglu (koordinátoru) je podstatně kratší než Zigbee zařízení. Tato skutečnost je zachycena na následujícím grafu 5.13.



Obr. 5.13: Měření Zigbee sítě – LQI pro scénář 1

Průměrná hodnota zpoždění pro jednotlivé periody mezi packety ukazuje, že s delší vzdáleností, jak lze očekávat, dochází k vyšším zpožděním. Hodnoty zpoždění pro scénář 1 jsou přehledně znázorněné na následujícím grafu 5.14.

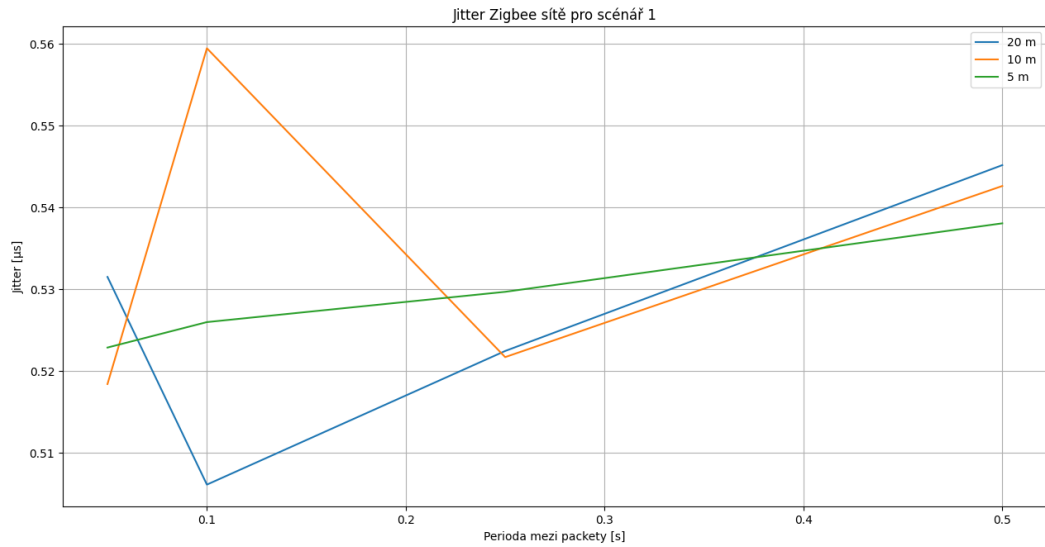


Obr. 5.14: Měření Zigbee sítě – Zpoždění pro scénář 1

Při LQI převážně naměřených nad hodnotou 100 ve scénáři 1 nemá perioda

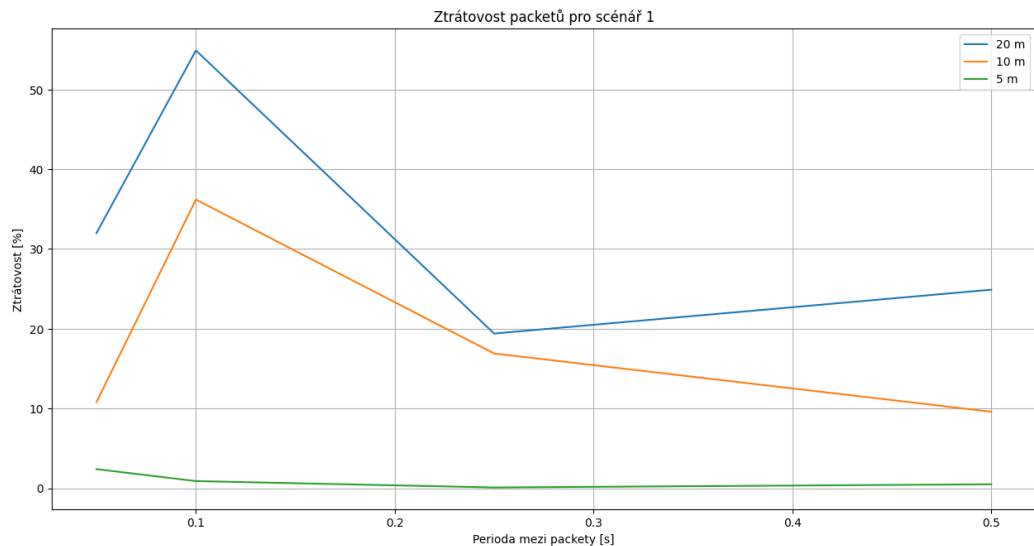


významnější vliv na jitter, jak je patrné z následujícího grafu.



Obr. 5.15: Měření Zigbee sítě – Jitter pro scénář 1

Pro scénář 1 byla také vypočítána ztrátovost packetů jako poměr počtu ztracených packetů a všech odeslaných packetů. Je patrné, že na ztrátovost má vliv vzdálenost mezi zařízeními a také při periodě 0,1 s docházelo k vyšší ztrátovosti.



Obr. 5.16: Měření Zigbee sítě – Ztrátovost packetů pro scénář 1

### 5.1.3 Scénář 2: venkovní prostor – přímá viditelnost

Vzhledem k předchozímu měření, kdy se ukázalo, že pro hodnoty indexu kvality spojení nad 100 nedochází k výraznějšímu navýšení jitteru v závislosti na periodě mezi packety, ale především hraje roli vzdálenost zařízení mezi sebou, byla v tomto scénáři měřena nejdlejší možná vzdálenost, kdy jsou zařízení schopná komunikovat, a pro hraniční vzdálenost bylo provedeno měření.

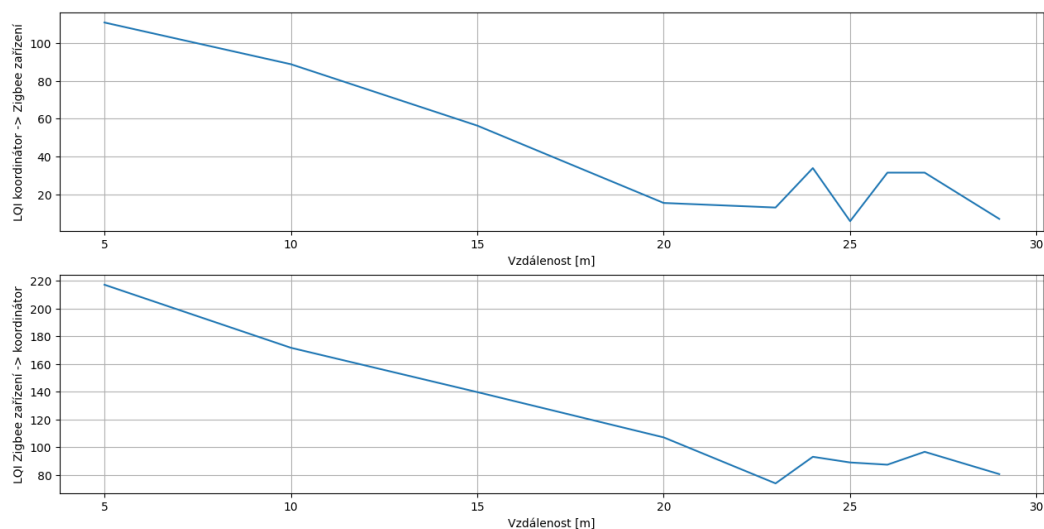
Pro jednotlivé vzdálenosti byl měřen pouze LQI. Pro hraniční měření byly obdobné podmínky jako u předchozího scénáře.

- 1000 packetů
- velikost packetu – 59 B
- velikost datového rámce – 8 B
- 10 vzdáleností (5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 23 m, 24 m, 25 m, 26 m, 27 m, 29 m)
- 1 hraniční měření (28 m, 0,1 s perioda mezi packety)

Tab. 5.4: Zigbee síť LQI – scénář 2 (venkovní prostor – přímá viditelnost)

5 m	10 m	15 m	20 m	23 m	24 m	25 m	26 m	27 m	29 m
120/249	68/182	60/157	16/123	12/74	20/88	12/100	28/79	32/96	20/87
108/241	84/174	68/153	8/120	0/74	28/87	4/95	32/80	28/96	20/86
104/228	104/173	64/150	12/117	0/73	36/89	0/95	28/82	32/96	0/85
112/221	92/172	64/149	8/113	4/73	24/90	8/91	28/84	32/96	8/82
116/215	100/171	60/137	16/108	4/73	40/93	8/89	28/88	32/96	8/80
116/208	96/171	52/135	24/105	12/73	40/94	12/87	40/90	36/96	0/79
116/205	104/170	52/132	16/101	16/74	40/96	12/86	28/92	32/97	4/75
116/204	84/170	44/129	20/100	16/73	36/97	4/84	32/92	36/98	4/77
104/202	80/168	52/128	20/98	36/74	40/98	0/82	40/92	24/98	8/77
96/199	76/166	48/127	16/85	32/77	36/98	0/80	32/94	32/97	0/77

- **5 m** – 110,8/217,2 ± 4,8/10,9
- **10 m** – 88,8/171,7 ± 7,8/2,7
- **15 m** – 56,4/139,7 ± 5/7,2
- **20 m** – 15,6/107 ± 3,3/7,4
- **23 m** – 13,2/73,8 ± 7,9/0,8
- **24 m** – 34/93 ± 4,7/2,7
- **25 m** – 6/88,9 ± 3,2/4
- **26 m** – 31,6/87,3 ± 3/3,5
- **27 m** – 31,6/96,6 ± 2,2/0,5
- **29 m** – 7,2/80,5 ± 4,7/2,7



Obr. 5.17: Měření Zigbee sítě – LQI pro scénář 2

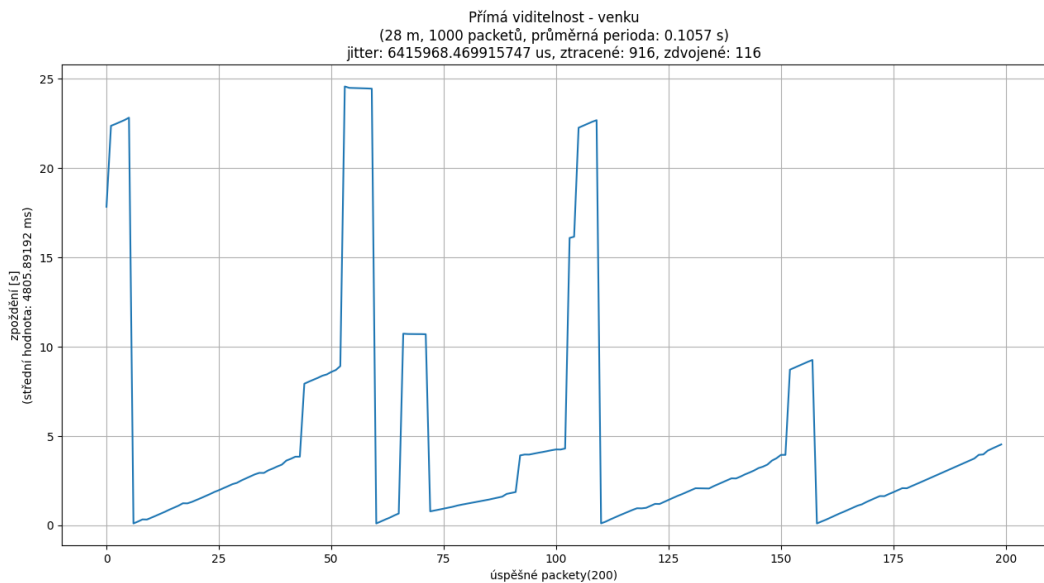
Tímto měřením bylo zjištěno, že dosah komunikace při přímé viditelnosti ve venkovním prostředí se pohybuje okolo 30 m, kdy u větší vzdálenosti začíná být důležitější faktor vzájemných pozic antén (koordinátor v nižší pozici než Zigbee zařízení pro hodnoty na 23 m), viz příložená tabulka 5.4 a graf 5.17.

Z grafu je také jasně patrné, že mnohem větší vliv na limit vzdálenosti má USB dongle (koordinátor Zigbee sítě), jelikož při vzdálenostech, kde již LQI z koordinátoru není tak velký, má měřicí zařízení (Zigbee zařízení) stále LQI okolo hodnoty 80, jde ale o hodnotu menší než polovina možné, a dle různých dostupných zdrojů by komunikace s takto nízkou hodnotou indexu kvality spojení byla spíše problémová.

Měření komunikace mezi zařízeními s takto nízkými hodnotami LQI bylo provedeno obdobným způsobem jako při měření ve scénáři 1, viz následující graf 5.18

### 28 metrů – perioda 0,1 sekundy (venkovní prostor – přímá viditelnost)

- Vypočtený celkový čas – 100 s
- Skutečný celkový čas – 110,19 s
- Průměrná perioda – 0,1057 s
- Počet úspěšných packetů – 200
- Počet ztracených packetů – 916
- Počet zdvojených packetů – 116
- Střední hodnota zpoždění – 4,806 s
- Jitter – 6,416 s



Obr. 5.18: Měření Zigbee sítě 28 m – perioda 0,1 s (venkovní prostor – přímá viditelnost)

### 5.1.4 Scénář 3: venkovní prostor – překážka

U tohoto scénáře byl obdobně jako u předchozího zjišťován index kvality spojení a maximální možná vzdálenost komunikace, pokud se v cestě nachází překážka.

- 1000 paketů
- velikost packetu – 59 B
- velikost datového rámce – 8 B
- 2 vzdálenosti (5 m, 10 m)

Tab. 5.5: Zigbee síť LQI – scénář 3 (venkovní prostor – překážka) – řádek 1 = 5 m, řádek 2 = 10 m

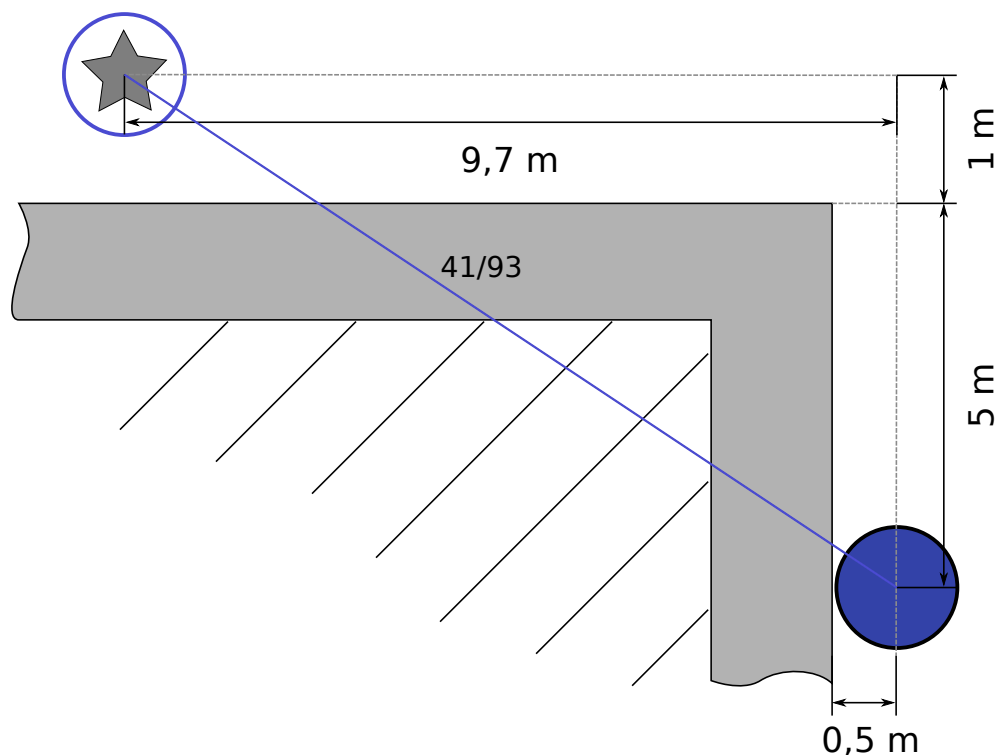
56/146	44/133	32/128	36/125	40/123	44/122	36/120	36/118	36/116	28/115
8/109	28/104	24/103	32/101	20/101	24/99	28/98	24/97	32/97	28/97

- **5 m** – 38,8/124,6 ± 4,9/5,9
- **10 m** – 24,8/100,6 ± 4,4/2,5

Pro vzdálenost 15 m již nebylo možné hodnoty naměřit, bylo zjištěno, že ke ztrátě spojení dochází okolo vzdálenosti 13 m za rohem (14,32 m vzdušnou čarou). Zigbee zařízení se nacházelo 0,5 m od budovy, stejně jako koordinátor, měřené vzdálenosti

pro LQI vycházely od rohu budovy, kdy Zigbee zařízení bylo od tohoto rohu vzdáleno stále 5 m. Rozmístění je možné vidět na obrázku 5.19, kde jsou uvedeny vzdálenosti pro měření latence a jittu.

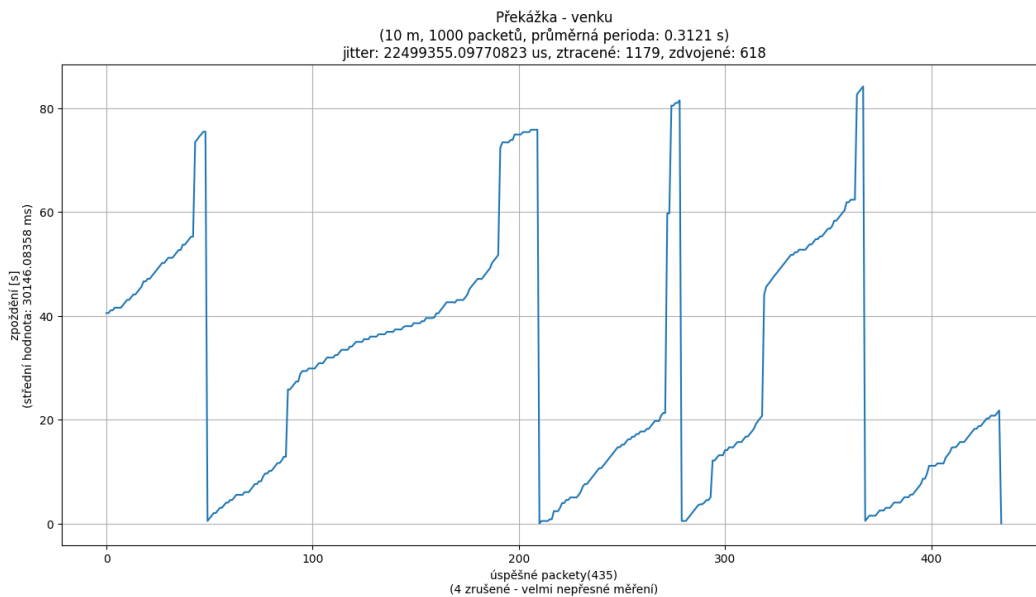
### 10 metrů – perioda 0,5 sekundy (venkovní prostor – překážka)



Obr. 5.19: Rozmístění měření 10 m (venkovní prostor – překážka)

- **LQI** –  $40,8/93,4 \pm 3/5,9$
- **Vypočtený celkový čas** – 500 s
- **Skutečný celkový čas** – 507,073 s
- **Průměrná perioda** – 0,3121 s
- **Počet úspěšných packetů** – 435
- **Počet ztracených packetů** – 1179
- **Počet zdvojených packetů** – 618
- **Střední hodnota zpoždění** – 30,146 s
- **Jitter** – 22,499 s

Jak se ukázalo již při měření ve scénáři 2, tak pro nízké hodnoty indexu kvality spojení ( $40,8/93,4 \pm 3/5,9$  v případě uvedeném na grafu 5.20) dochází k veliké ztrátovosti packetů a také k mnohem větším zpožděním včetně jejich kolísání, tedy vzrůstu jittu.



Obr. 5.20: Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,5 s (venkovní prostor – překážka)

Z grafu 5.20 a přehledového výčtu je také patrné, že při měřených vzdálenostech s daným LQI dochází k většímu počtu opakovaného odeslání, a hodnota periody mezi odesílanými packety je tím ovlivněna.

### 5.1.5 Scénář 4: venkovní prostor – přeskok packetu

V tomto scénáři bylo provedeno měření mesh sítě, kdy dojde ke ztrátě spojení mezi jedním zařízením a koordinátorem, a packet do cílového Zigbee zařízení tak musí být odeslán skrze jiné zařízení.

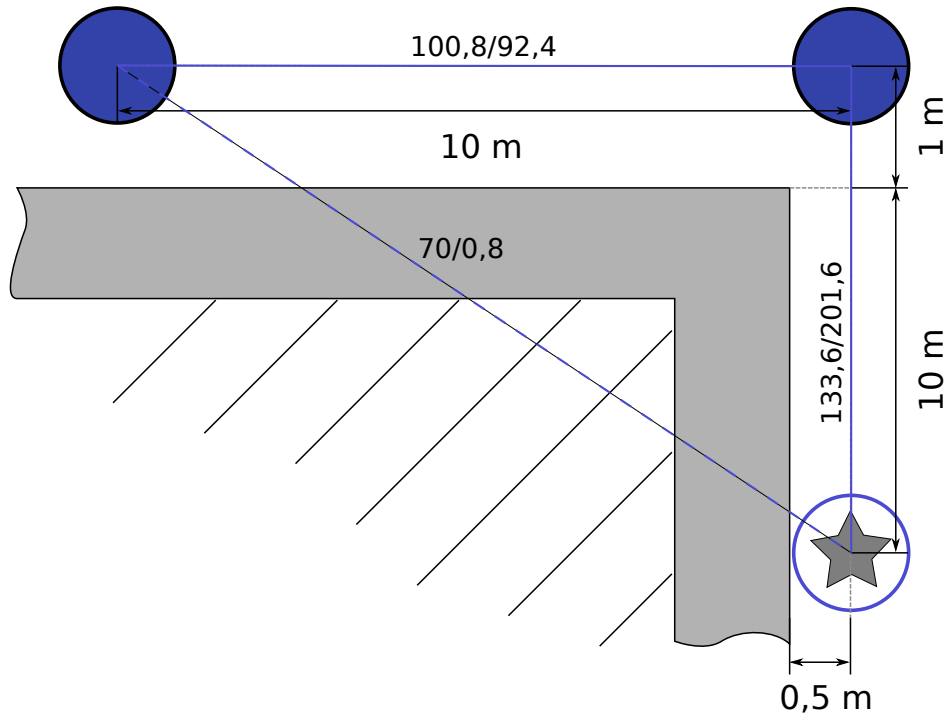
- 1000 packetů
- velikost packetu – 59 B
- velikost datového rámce – 8 B
- 2 vzdálenosti (10 m, 25 m)
- 2 periody mezi packety (1 s; 0,1 s)

## 10 metrů – LQI

Tab. 5.6: Zigbee síť LQI – 10 metrů (venkovní prostor – přeskok packetu)

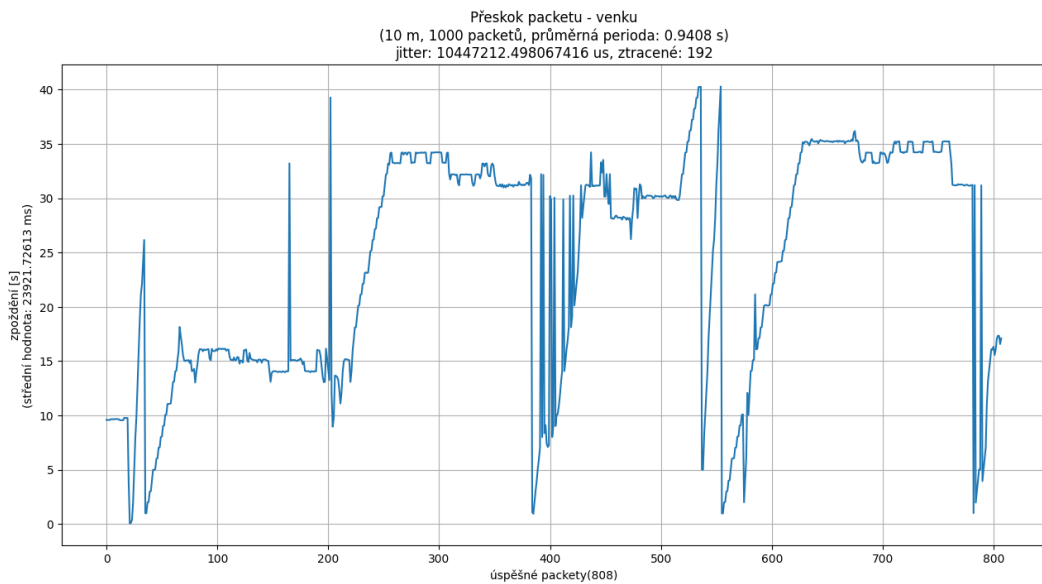
	ZC/ZR <sub>1</sub>	ZC/ZR <sub>2</sub>	ZR <sub>1</sub> /ZR <sub>2</sub>
<b>1</b>	85/0	132/194	100/96
<b>2</b>	75/0	136/197	100/92
<b>3</b>	71/0	136/201	104/84
<b>4</b>	69/0	136/202	96/92
<b>5</b>	68/0	132/204	100/92
<b>6</b>	67/8	132/204	100/92
<b>7</b>	68/0	132/203	100/92
<b>8</b>	66/0	132/204	104/96
<b>9</b>	66/0	132/203	104/96
<b>10</b>	65/0	136/204	100/92

- ZC/ZR<sub>1</sub> LQI – 70/0,8 ± 3,8/1,6
- ZC/ZR<sub>2</sub> LQI – 133,6/201,6 ± 1,3/2,2
- ZR<sub>1</sub>/ZR<sub>2</sub> LQI – 100,8/92,4 ± 1,6/2,2



Obr. 5.21: Rozmístění měření 10 m (venkovní prostor – přeskok packetu)

## 10 metrů – perioda 1 sekunda



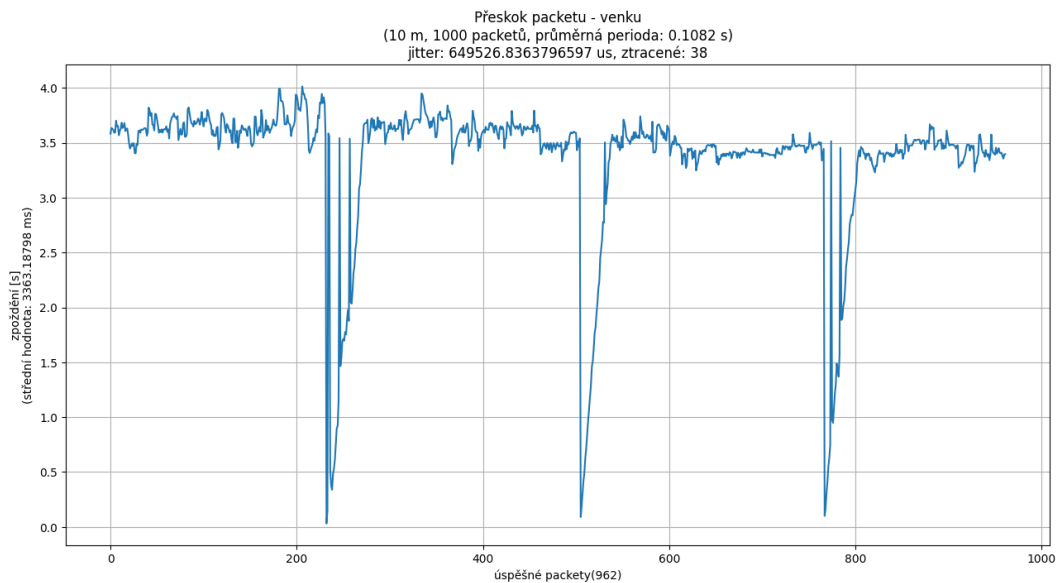
Obr. 5.22: Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 1 s (venkovní prostor – přeskok packetu)

- Vypočtený celkový čas – 1000 s
- Skutečný celkový čas – 1007,61 s
- Průměrná perioda – 0,9408 s
- Počet úspěšných packetů – 808
- Počet ztracených packetů – 192
- Střední hodnota zpoždění – 23,9217 s
- Jitter – 10,4472 s

## 10 metrů – perioda 0,1 sekundy

- Vypočtený celkový čas – 100 s
- Skutečný celkový čas – 110,195 s
- Průměrná perioda – 0,1082 s
- Počet úspěšných packetů – 962
- Počet ztracených packetů – 38
- Střední hodnota zpoždění – 3,3632 s
- Jitter – 0,6495 s





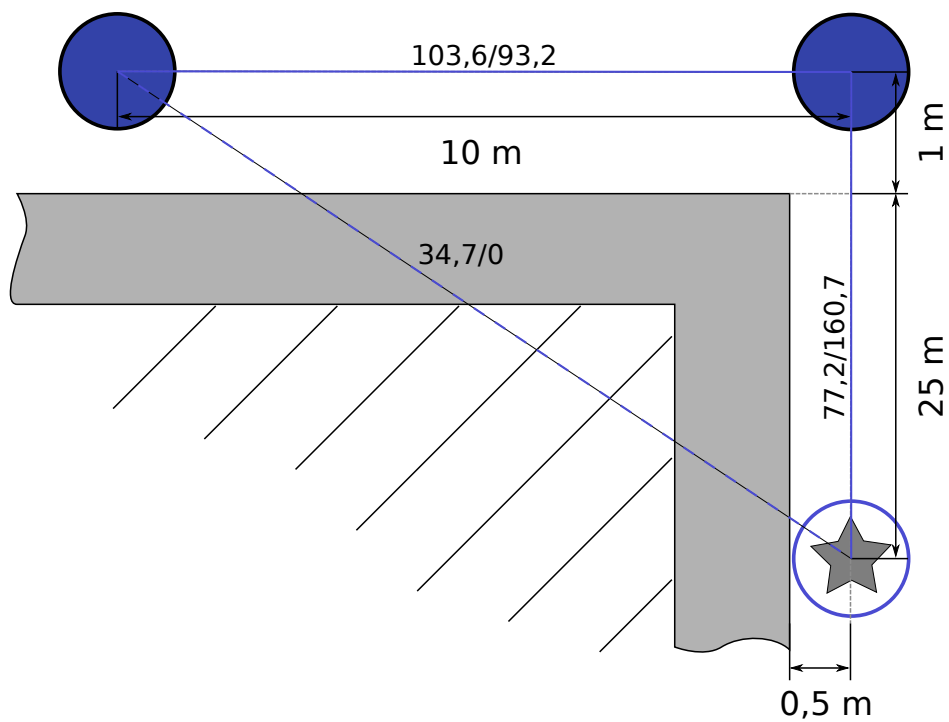
Obr. 5.23: Měření Zigbee sítě 10 m – perioda 0,1 s (venkovní prostor – přeskok packetu)

## 25 metrů – LQI

Tab. 5.7: Zigbee síť LQI – 25 metrů (venkovní prostor – přeskok packetu)

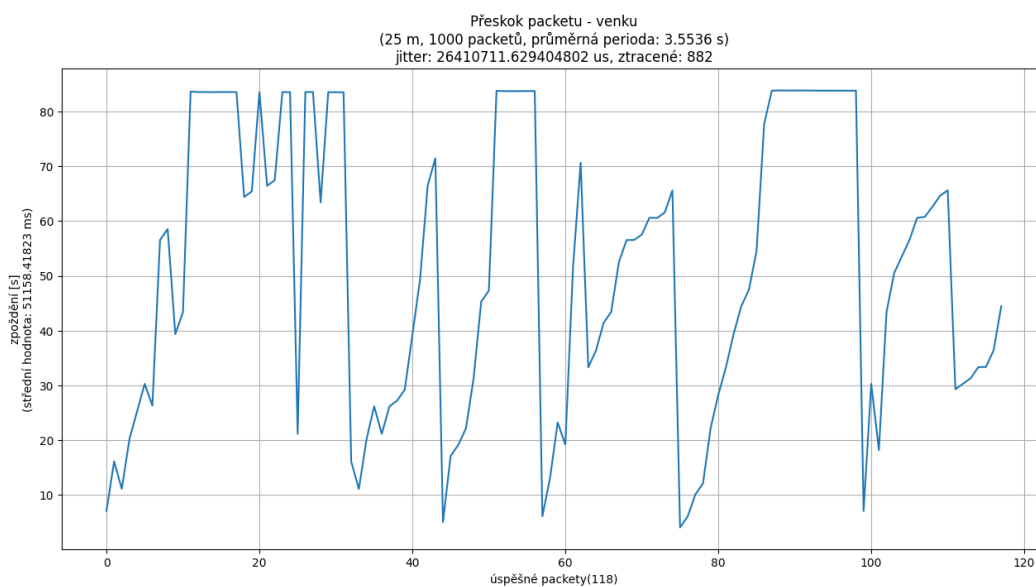
	ZC/ZR <sub>1</sub>	ZC/ZR <sub>2</sub>	ZR <sub>1</sub> /ZR <sub>2</sub>
<b>1</b>	63/0	76/179	104/92
<b>2</b>	59/0	84/170	104/96
<b>3</b>	59/0	84/167	104/96
<b>4</b>	57/0	80/162	104/96
<b>5</b>	0/0	80/160	104/92
<b>6</b>	0/0	84/157	104/92
<b>7</b>	55/0	72/156	104/92
<b>8</b>	0/0	72/154	104/92
<b>9</b>	0/0	76/151	100/92
<b>10</b>	54/0	64/151	104/92

- ZC/ZR<sub>1</sub> LQI – 34,7/0 ± 19/0
- ZC/ZR<sub>2</sub> LQI – 77,2/160,7 ± 4,1/5,7
- ZR<sub>1</sub>/ZR<sub>2</sub> LQI – 103,6/93,2 ± 0,8/1,2



Obr. 5.24: Rozmístění měření 25 m (venkovní prostor – přeskok packetu)

### 25 metrů – perioda 1 sekunda

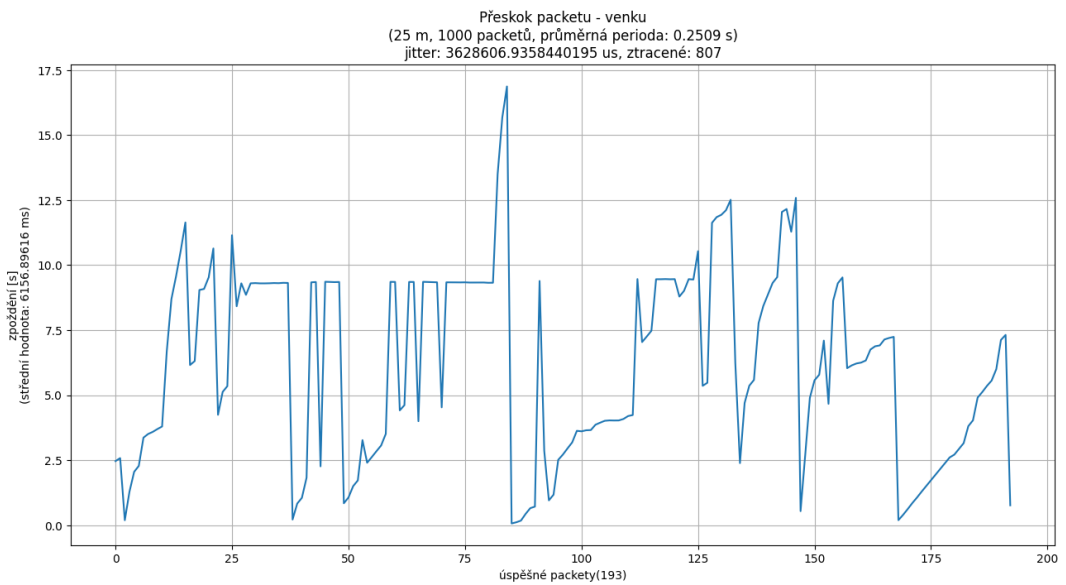


Obr. 5.25: Měření Zigbee sítě 25 m – perioda 1 s (venkovní prostor – přeskok packetu)

- Vypočtený celkový čas – 1000 s

- Skutečný celkový čas – 1008,958 s
- Průměrná perioda – 3,5536 s
- Počet úspěšných packetů – 118
- Počet ztracených packetů – 882
- Střední hodnota zpoždění – 51,1584 s
- Jitter – 26,4107 s

## 25 metrů – perioda 0,1 sekundy



Obr. 5.26: Měření Zigbee sítě 25 m – perioda 0,1 s (venkovní prostor – přeskok packetu)

- Vypočtený celkový čas – 100 s
- Skutečný celkový čas – 110,122 s
- Průměrná perioda – 0,2509 s
- Počet úspěšných packetů – 193
- Počet ztracených packetů – 807
- Střední hodnota zpoždění – 6,1569 s
- Jitter – 3,6286 s

## 5.2 Senzorická měření

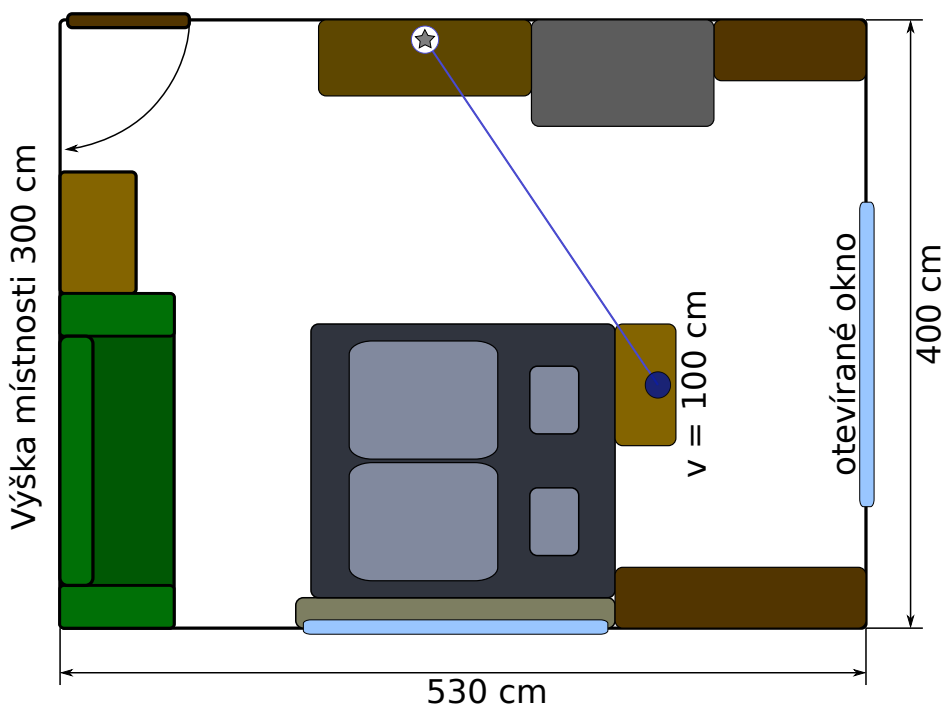
V této kapitole jsou zobrazena a popsána reálná naměřená data získaná ze senzorů měřicího zařízení. Všechny zobrazené průběhy jsou také uvedeny v příloze D ve větším formátu.

### 5.2.1 Měření 24 hodin

Následující text popisuje 24 hodin anotovaného měření.

#### Poloha zařízení

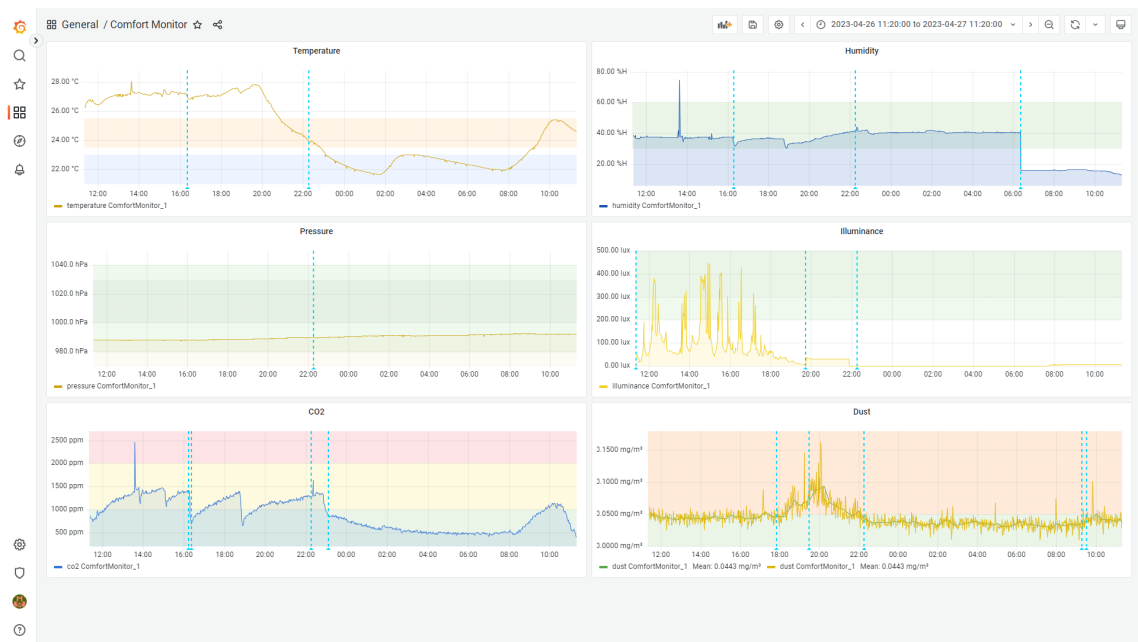
Měřicí zařízení se nacházelo v převážně okupované místnosti o rozměrech  $4 \times 5,3 \times 3$  m, tedy o objemu  $63,6 \text{ m}^3$ . Vzdálenost mezi Zigbee koordinátorem a Zigbee zařízením byla přibližně 2,5 m. Poloha zařízení v místnosti je patrná z obrázku 5.27.



Obr. 5.27: Poloha Zigbee zařízení – senzorická měření

V uspořádání zobrazeném na obrázku polohy zařízení (5.27) byla prováděna veškerá senzorická měření. Veličiny byly zaznamenávány každou jednu minutu do databáze. Ve webové aplikaci Grafana byl vytvořen dashboard (zobrazovací panel se všemi grafy měřených veličin). V jednotlivých grafech jsou vyznačeny komfortní nebo jinak doporučené intervaly hodnot.

Dashboard se všemi grafy je zobrazen na obrázku 5.28. Grafy také obsahují značky na časové ose, které odpovídají anotovaným událostem. Obrázek dashboardu je uveden ve větším měřítku v příloze D.1



Obr. 5.28: Náhled 24 hodin měření – dashboard

## Anotace událostí

Následující výčet je anotací významných událostí, které mohou ovlivnit měřené veličiny.

- **11:25** – měření bez vrchního krytu
- **15:13** – měření bez napájení
- **16:15** – otevření okna do **16:22**
- **17:50** – začátek pájení
- **18:43** – otevření okna do **18:52**
- **19:30** – ukončení pájení
- **19:45** – rozsvícení světel
- **22:17** – nasazení vrchního krytu
- **23:06** – okno na mikroventilaci
- **07:42** – denní osvětlení s nasazeným krytem
- **09:18** – začátek pájení
- **09:31** – ukončení pájení
- **10:32** – otevření okna do **11:19**

Přesnost některých snímačů je ovlivněna vnějšími vlivy (dopadající světlo na kryt, připojení napájení a nabíjení baterie, ...), pro získání přesných hodnot bude ještě nutné provést kalibraci senzorů, ale měření koncentrace oxidu uhličitého se ukázalo jako nejvíce spolehlivé a je z něho dobře patrný vliv otevírání a zavírání okna v místnosti.

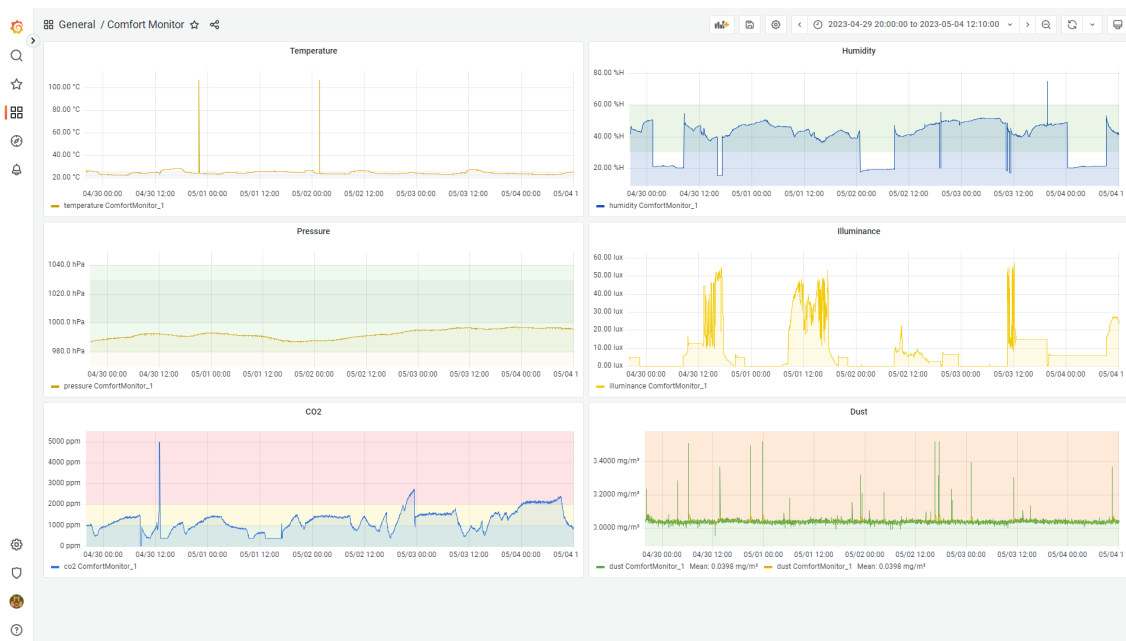
Na naměřených hodnotách koncentrace pevných částic (spodní pravý graf z obrázku 5.28) je také například vidět nárůst koncentrace v průběhu pájení při aktuálně nevětrané místnosti.

Vlhkost v místnosti se v 6:21:53 skokově změnila, tato změna je způsobena chybou jednoho ze senzorů, jelikož výsledná veličina vlhkosti se získává průměrem hodnot ze dvou senzorů, pokud tedy jeden přestane měřit, dojde k této chybě. Chybu bude nutné vyřešit kontrolou hodnot získávaných ze senzorů a při zjištění provést restart daného senzoru.

## 5.2.2 Vícedenní měření

Vícedenní měření trvalo 4,5 dne. Na obrázku 5.29 je zobrazen náhled celého vícedenního měření, tento náhled a jednotlivé rozdělené dny včetně anotace významných událostí jsou uvedeny v příloze D.2.

Na náhledu jsou patrné některé chybové hodnoty, které bude nutné ještě ošetřit, stejně tak chybu u měření vlhkosti popsanou v předchozí kapitole.



Obr. 5.29: Náhled vícedenního měření – dashboard

# Závěr

Diplomová práce se zabývala definicí systému pro monitorování komfortu v budově. Byl popsán bezdrátový komunikační protokol pro osobní síť Zigbee, který je využit ke komunikaci dat ze sensorických zařízení. Sensorická zařízení využitá v systému byla také popsána včetně komfortních nebo bezpečných hodnot pro člověka.

Popsané senzory byly testovány v zapojení na nepájivém poli, a ověřila se tak jejich funkčnost včetně přepočtů výstupních hodnot na reálné fyzikální veličiny, které je možné dále využívat, vizualizovat a vytvářet statistiky. Tato testovací zapojení byla implementována na desku plošného spoje, která je rozdělena na řídicí DPS a sensorickou DPS. Sensorická DPS byla vytvořena jako kompatibilní s patičí Adafruit Feather, tím vznikla možnost volby řídicí DPS a použité technologie z důvodu snadné dostupnosti řady těchto desek a také open-source designu. Připravená EEPROM na sběrnici sensorické DPS v této podobě návrhu nemá větší využití, ale je připravena pro budoucí rozšiřování tohoto systému.

Dále byla vytvořena Zigbee síť, popsány výkonnostní indikátory sítě a tyto indikátory byly následně s dalšími vlastnostmi změřeny. Při sestavování sítě byla testována i varianta s SoC ESP32-H2, která se ukázala jako vyhovující pro tento systém, bohužel její komerční nedostupnost v době návrhu systému byla rozhodující pro odklonění se k jiné řídicí desce plošného spoje. Obě varianty řídicích SoC byly také zkoušeny na jedné sestavené síti.

Měřicí zařízení neboli Zigbee zařízení vytvořené na řídicí desce plošného spoje bylo implementováno v jazyce C s použitím knihovny ZBOSS. Jelikož knihovna zatím neobsahuje veškeré clusterly definované Zigbee standardem, clusterly koncentrace oxidu uhličitého a pevných částic byly do knihovny doimplementovány pro potřebu tohoto systému. Všechny potřebné clusterly byly následně spojeny a byl vytvořen jeden měřicí koncový bod, jak je uvedeno v kapitole s přehledem profilu Zigbee zařízení. Tomuto koncovému bodu byl nastaven hlídač událostí (event listener), který po zaznamenání požadavku na daný bod zavolá funkci, která provede sensorická měření, a získané hodnoty mohou být odeslány skrze síť.

K tomuto softwarovému vybavení měřicího zařízení bylo implementováno softwarové řešení Zigbee koordinátoru sítě. Hostitelské zařízení neboli Zigbee koordinátor implementuje skripty v jazyce Python, které odesílají na měřicí zařízení skrze Zigbee síť požadavky měření a také příchozí hodnoty zpracovávají a ukládají do lokální databáze, která je rovněž implementována na hostitelském zařízení. Hodnoty z databáze jsou poté získávány a vizualizovány webovou aplikací Grafana, kde je vytvořen jeden přehledový panel s grafy pro všechna sensorická měření. Webová aplikace je dostupná na lokální síti s běžnou autentizací.

Změřené vlastnosti Zigbee zařízení na síti prokázaly využitelnost v běžné domác-

nosti, popřípadě i větší budově za použití dostatečného počtu opakovačů signálu.

Senzorická měření odhalila určité chybové stavy, které byly popsány v příslušné kapitole, společně s definovanými kroky pro jejich budoucí nápravu. Pro reálné využívání je nutné ještě senzory zkalibrovat dle přesnějších měřidel, jelikož některé jsou ovlivněny návrhem krytu měřicího zařízení. Naměřená sensorická data jsou anotována v příloze a dostupná také jako elektronická příloha.

Měřicí zařízení byla testována jako Zigbee routery k vytvoření mesh sítě a sensorické měření prováděno s frekvencí jedné minuty. V důsledku režimu routeru byla ovlivněna jejich spotřeba, protože ve funkci routeru není podporována možnost přecházení zařízení do režimu spánku. Do sestavené Zigbee sítě by pro snížení spotřeby bylo vhodnější zařízení implementovat jako Zigbee koncové zařízení (ZED). Spotřeba zařízení, pokud bude provozováno jako ZED, bude ovlivněna frekvencí sensorického měření, a tedy probouzením zařízení.

Změřená a přibližně stanovená spotřeba zařízení z velikosti protékaného proudu při napájení z USB ukázala, že spotřeba zařízení se v režimu routeru prakticky nemění, a největší vliv má sensorická DPS, konkrétně senzor CO<sub>2</sub> (více v tabulce spotřeby), pokud by bylo zařízení provozováno neustále ve výše popsaném režimu, teoreticky určená výdrž baterie by poté byla 2,5 dne. Velikost měřicího zařízení je 86 × 56 × 36 mm včetně zabudovaného Li-Po bateriového článku s kapacitou 1200 mAh.

Dalším záměrem je systém nadále vyvíjet včetně jeho reálného nasazení.



# Literatura

- [1] ZIGBEE ON MARS!: The smart home protocol arrives on the Red Planet [online]. THE VERGE: VOX MEDIA, 2021 [cit. 2022-10-21]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2021/5/20/22445330/zigbee-on-mars-ingenuity-helicopter-perseverance-rover>
- [2] ZigBee Specification [online]. ZigBee Alliance: ZigBee Alliance, 2015 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>
- [3] ZigBee Cluster Library Specification [online]. ZigBee Alliance: ZigBee Alliance, 2016 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/12/07-5123-06-zigbee-cluster-library-specification.pdf>
- [4] Connectivity Standards Alliance [online]. CSA: CSA, 2022 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://csa-iot.org>
- [5] Announcing ESP32-H2, an IEEE 802.15.4 + Bluetooth 5 (LE) RISC-V SoC [online]. Shanghai, China: Espressif Systems, 2021 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: [https://www.espressif.com/en/news/ESP32\\_H2](https://www.espressif.com/en/news/ESP32_H2)
- [6] NRF52833 SoC Product Brief Version 2.1 [online]. <https://www.nordicsemi.com/Products/nRF5340>: Nordic Semiconductor, b.r. [cit. 2022-10-24]. Dostupné z: <https://www.nordicsemi.com/-/media/Software-and-other-downloads/Product-Briefs/nRF52833-SoC-Product-Brief.pdf?la=en&hash=9F1B7341D0CB046BB32900C8B520B843EBC8DF06>
- [7] HTU21D(F) RH/T SENSOR IC: Digital Relative Humidity sensor with Temperature output [online]. Mouser Electronics: Measurement Specialties, Inc., a TE Connectivity company, 2017 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/418/5/NG\\_DS\\_HPC199\\_6\\_A1-1128627.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/418/5/NG_DS_HPC199_6_A1-1128627.pdf)
- [8] ČSN EN ISO 7730. Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2006.

- [9] HABEL, Jiří. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [10] ROHM Semiconductor BH1750FVI-TR [online]. Texas USA: Mouser Electronics, 2022 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://eu.mouser.com/ProductDetail/ROHM-Semiconductor/BH1750FVI-TR?qs=phc6PQ%252BTPUNy881RCs6mVA%3D%3D>
- [11] Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC: BH1750FVI [online]. Mouser Electronics: ROHM Co., 2011 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: [https://components101.com/sites/default/files/component\\_datasheet/BH1750.pdf](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/BH1750.pdf)
- [12] Carbon Dioxide [online]. Wisconsin: Department of Health Services, 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>
- [13] MH-Z19B CO2 sensor [online]. <https://www.winsen-sensor.com/>: Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2003 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.winsen-sensor.com/d/propic/MH-Z19B.jpg>
- [14] Infrared CO2 Sensor Module: (Model: MH-Z19B) [online]. <https://www.winsen-sensor.com/>: Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., 2019 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MH-Z19B.pdf>
- [15] PETRLÍK, RNDr. Jindřich Petrlík, Ing. Petr Válek VÁLEK a Ing. Milan Havel HAVEL. Polétavý prach – PM [online]. Praha: Arnika, 2010, 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/poletavy-prach-pm>
- [16] Obrázek GP2Y1014AU0F [online]. Indie: Graylogix ® Embedded Software & Hardware Solutions, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.graylogix.in/wp-content/uploads/2021/05/HTB15kEhB8mWBuNkSndVq6AsApXaj.jpg>
- [17] GP2Y1014AU0F: Compact Optical Dust Sensor [online]. Philippines: Sharp [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: [https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_e.pdf)
- [18] BME280: Combined humidity and pressure sensor [online]. Německo: Bosch, 2022 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: [https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811141121\\_Bosch-Sensortec-BME280\\_C92489.pdf](https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1811141121_Bosch-Sensortec-BME280_C92489.pdf)

- [19] Obrázek – Grafana-HomeEnergy [online]. <https://grafana.com/grafana/>: Grafana Labs, 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: [https://grafana.com/products/assets/grafana/Grafana8\\_HomeEnergy.jpg](https://grafana.com/products/assets/grafana/Grafana8_HomeEnergy.jpg)
- [20] Zigbee 3.0 USB Dongle Plus [online]. <https://sonoff.tech/>: Sonoff, 2021 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://sonoff.tech/product/gateway-and-sensors/sonoff-zigbee-3-0-usb-dongle-plus-e/>
- [21] IEEE Std 802.15.4-2003: Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [online]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://people.iith.ac.in/tbr/teaching/docs/802.15.4-2003.pdf>
- [22] RSSI vs LQI? What is the difference?: FAQ discusses RSSI and LQI used in ZigBee, Lightweight Mesh, 6LoWPAN and IEEE802.15.4 wireless networks [online]. <https://microchipsupport.force.com/>: Microchip Technology, 2017 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://microchipsupport.force.com/s/article/RSSI-vs-LQI-What-is-the-difference>
- [23] NRF52 Series [online]. <https://www.nordicsemi.com>: Nordic Semiconductor, 2023 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: [https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fstruct\\_nrf52%2Fstruct%2Fnrf52.html](https://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fstruct_nrf52%2Fstruct%2Fnrf52.html)
- [24] Zigbee2mqtt [online]. <https://github.com>: Nordic Semiconductor, 2023 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://github.com/Koenkk/zigbee2mqtt>
- [25] MQTT [online]. MQTT.org, 2022 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://mqtt.org>
- [26] MQTT [online]. InfluxData Inc., 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.influxdata.com/mqtt/>
- [27] Mosquitto [online]. mosquitto.org: Eclipse Mosquitto™, 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://mosquitto.org>
- [28] Diagram funkčnosti MQTT (obrázek) [online]. influxdata.com: InfluxData, 2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://images.ctfassets.net/o7xu9whrs0u9/1UvuRDjPRyE2mmccXUuLQ/933359065a111aec22d636ccad75b7c0/how-MQTT-works-1024x503.png>

- [29] LEONARD, John. Nrf52840-feather-board: obrázek [online]. <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/adafruits-feather-nrf52840-express-board-and-developing-with-circuitpython>: Nordic Semiconductor, 2019 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://blog.nordicsemi.com/hs-fs/hubfs/nrf52840-feather-board.png?width=1200&name=nrf52840-feather-board.png>
- [30] Adafruit Feather nRF52840 pinout: obrázek [online]. <https://github.com/adafruit/Adafruit-Bluefruit-Feather-PCB/blob/master/Adafruit%20Feather%20nRF52840%20pinout.pdf>: Adafruit, 2021 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://github.com/adafruit/Adafruit-Bluefruit-Feather-PCB/blob/master/Adafruit%20Feather%20nRF52840%20pinout.pdf>
- [31] ZEPHYR PROJECT MEMBERS AND INDIVIDUAL CONTRIBUTORS. Adafruit Feather nRF52840 Express [online]. [developer.nordicsemi.com](https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/latest/zephyr/boards/arm/adafruit_feather_nrf52840/doc/index.html), 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: [https://developer.nordicsemi.com/nRF\\_Connect\\_SDK/doc/latest/zephyr/boards/arm/adafruit\\_feather\\_nrf52840/doc/index.html](https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/latest/zephyr/boards/arm/adafruit_feather_nrf52840/doc/index.html)
- [32] ZEPHYR PROJECT MEMBERS AND INDIVIDUAL CONTRIBUTORS. Zephyr [online]. [docs.zephyrproject.org](https://docs.zephyrproject.org/3.2.0/introduction/index.html), 2022 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://docs.zephyrproject.org/3.2.0/introduction/index.html>
- [33] NORDIC SEMICONDUCTOR. Zigbee architectures: Single-chip, single protocol (SoC) [online]. [developer.nordicsemi.com](https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/latest/nrf/protocols/zigbee/architectures.html#id6), 2022 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: [https://developer.nordicsemi.com/nRF\\_Connect\\_SDK/doc/latest/nrf/protocols/zigbee/architectures.html#id6](https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/latest/nrf/protocols/zigbee/architectures.html#id6)
- [34] DSR SUPPORTS ZIGBEE DIRECT [online]. [dsr-zboss.com](https://dsr-zboss.com/#!/updates/dsr-zigbee-direct), 2023 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://dsr-zboss.com/#!/updates/dsr-zigbee-direct>
- [35] Developing with ZBOSS for Zigbee [online]. [developer.nordicsemi.com/nRF\\_Connect\\_SDK/doc/zboss/3.11.2.1](https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/zboss/3.11.2.1/zigbee_prog_principles.html), 2023 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: [https://developer.nordicsemi.com/nRF\\_Connect\\_SDK/doc/zboss/3.11.2.1/zigbee\\_prog\\_principles.html](https://developer.nordicsemi.com/nRF_Connect_SDK/doc/zboss/3.11.2.1/zigbee_prog_principles.html)
- [36] PHILIPPE, Lucidarme. Most common baud rates table [online]. Lulu's blog, 2022 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://lucidar.me/en/serialib/most-used-baud-rates-table/>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>DPS</b>	Deska Plošného Spoje
<b>CSA</b>	Connectivity Standards Alliance
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network
<b>ZC</b>	Zigbee koordinátor – Zigbee Coordinator
<b>ZR</b>	Zigbee router – Zigbee Router
<b>ZED</b>	Zigbee koncové zařízení – Zigbee End Device
<b>SoC</b>	system na čipu – System on Chip
<b>RF</b>	rádiové frekvence – Radio Frequency
<b>PMV</b>	index predikce střední hodnoty hlasů – Predicted Mean Vote
<b>NDIR</b>	nedisperzním infračerveném principu – Nondispersive Infrared
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator
<b>ED</b>	Energy Detection
<b>LQI</b>	Link Quality Indicator
<b>GNU</b>	General Public License v3.0
<b>MQTT</b>	Message Queue Telemetry Transport
<b>M2M</b>	z jednoho zařízení do druhého – Machine to Machine
<b>EEPROM</b>	elektronicky mazatelná programovatelná paměť pouze pro čtení – Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
<b>FDM</b>	nanášení roztaveného materiálu po vrstvách – Fused Deposition Modeling
<b>SWD</b>	Serial Wire Debug
<b>IoT</b>	internet věcí – Internet of Things
<b>SDK</b>	nástroje pro tvorbu softwaru – Software Development Kit
<b>GPIO</b>	vstup/výstup pro obecné použití – General-Purpose Input/Output

<b>API</b>	rozhraní pro programování aplikací – Application Programming Interface
<b>ZCL</b>	knihovna clusterů Zigbee standardu – Zigbee Cluster Library
<b>ZDO</b>	Zigbee objekt zařízení – Zigbee Device Object
<b>COM</b>	Communication port

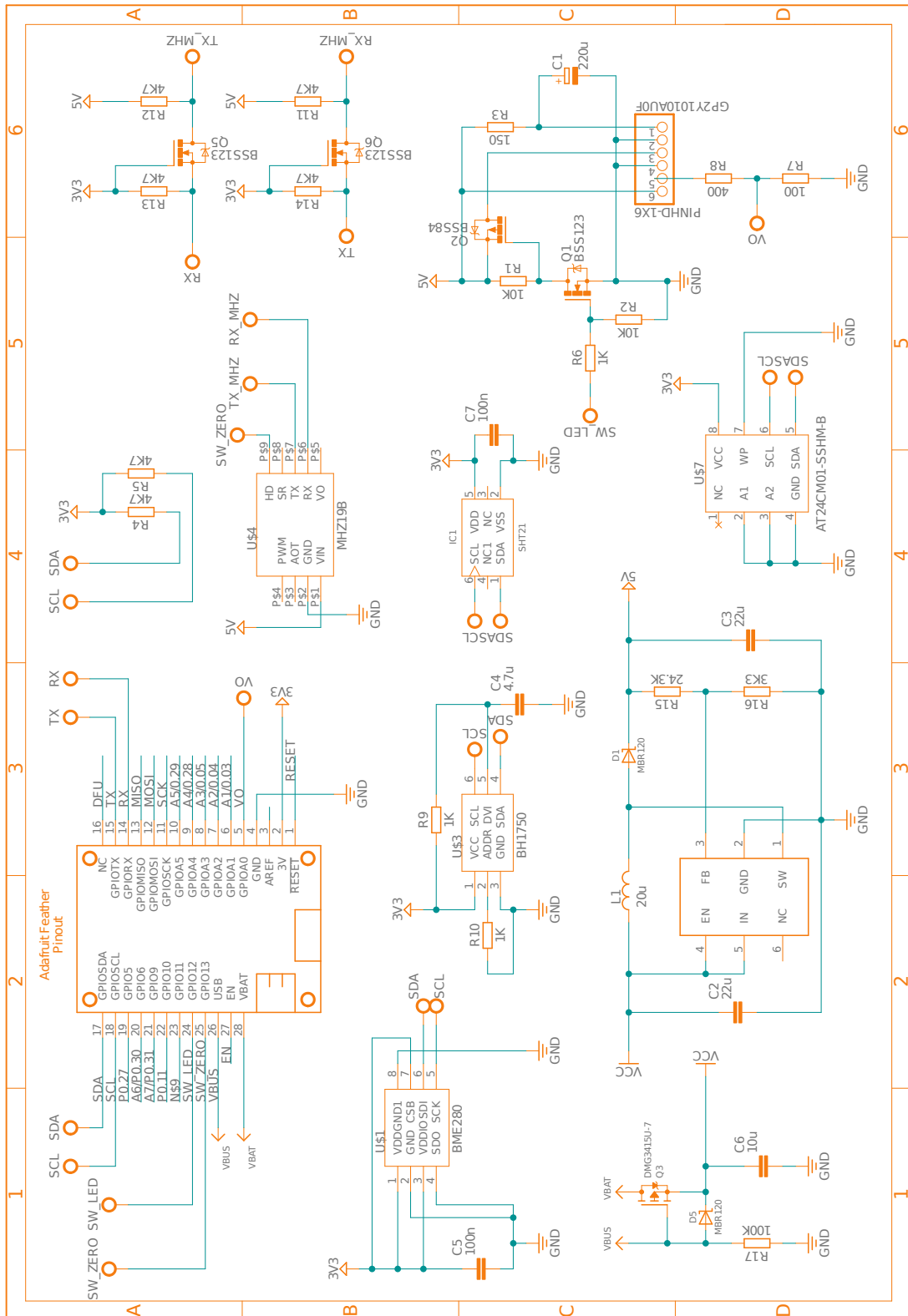
# Seznam příloh

<b>A</b>	<b>Elektrické schéma a deska plošného spoje</b>	<b>89</b>
A.1	Deska plošného spoje . . . . .	90
<b>B</b>	<b>Class diagram měřicího zařízení</b>	<b>91</b>
B.1	Popis funkcí . . . . .	92
B.1.1	Senzory . . . . .	92
B.1.2	Firmware . . . . .	93
<b>C</b>	<b>Grafy měření Zigbee sítě</b>	<b>94</b>
C.1	Uzavřený prostor – přímá viditelnost . . . . .	94
C.1.1	20 metrů – perioda 0,5 sekundy . . . . .	94
C.1.2	20 metrů – perioda 0,25 sekundy . . . . .	95
C.1.3	20 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	96
C.1.4	20 metrů – perioda 0,050 sekundy . . . . .	97
C.1.5	10 metrů – perioda 0,5 sekundy . . . . .	98
C.1.6	10 metrů – perioda 0,25 sekundy . . . . .	99
C.1.7	10 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	100
C.1.8	10 metrů – perioda 0,050 sekundy . . . . .	101
C.1.9	5 metrů – perioda 0,5 sekundy . . . . .	102
C.1.10	5 metrů – perioda 0,25 sekundy . . . . .	103
C.1.11	5 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	104
C.1.12	5 metrů – perioda 0,050 sekundy . . . . .	105
C.1.13	LQI . . . . .	106
C.1.14	Zpoždění . . . . .	107
C.1.15	Jitter . . . . .	108
C.1.16	Ztrátovost . . . . .	109
C.2	Venkovní prostor – přímá viditelnost . . . . .	110
C.2.1	LQI . . . . .	110
C.2.2	28 metrů – perioda 0,1 sekundy . . . . .	111
C.3	Venkovní prostor – překážka . . . . .	112
C.3.1	10 metrů — perioda 0,5 sekundy . . . . .	112
C.4	Venkovní prostor – přeskok packetu . . . . .	113
C.4.1	10 metrů — perioda 1 sekunda . . . . .	113
C.4.2	10 metrů — perioda 0,1 sekundy . . . . .	114
C.4.3	25 metrů — perioda 1 sekunda . . . . .	115
C.4.4	25 metrů — perioda 0,1 sekundy . . . . .	116

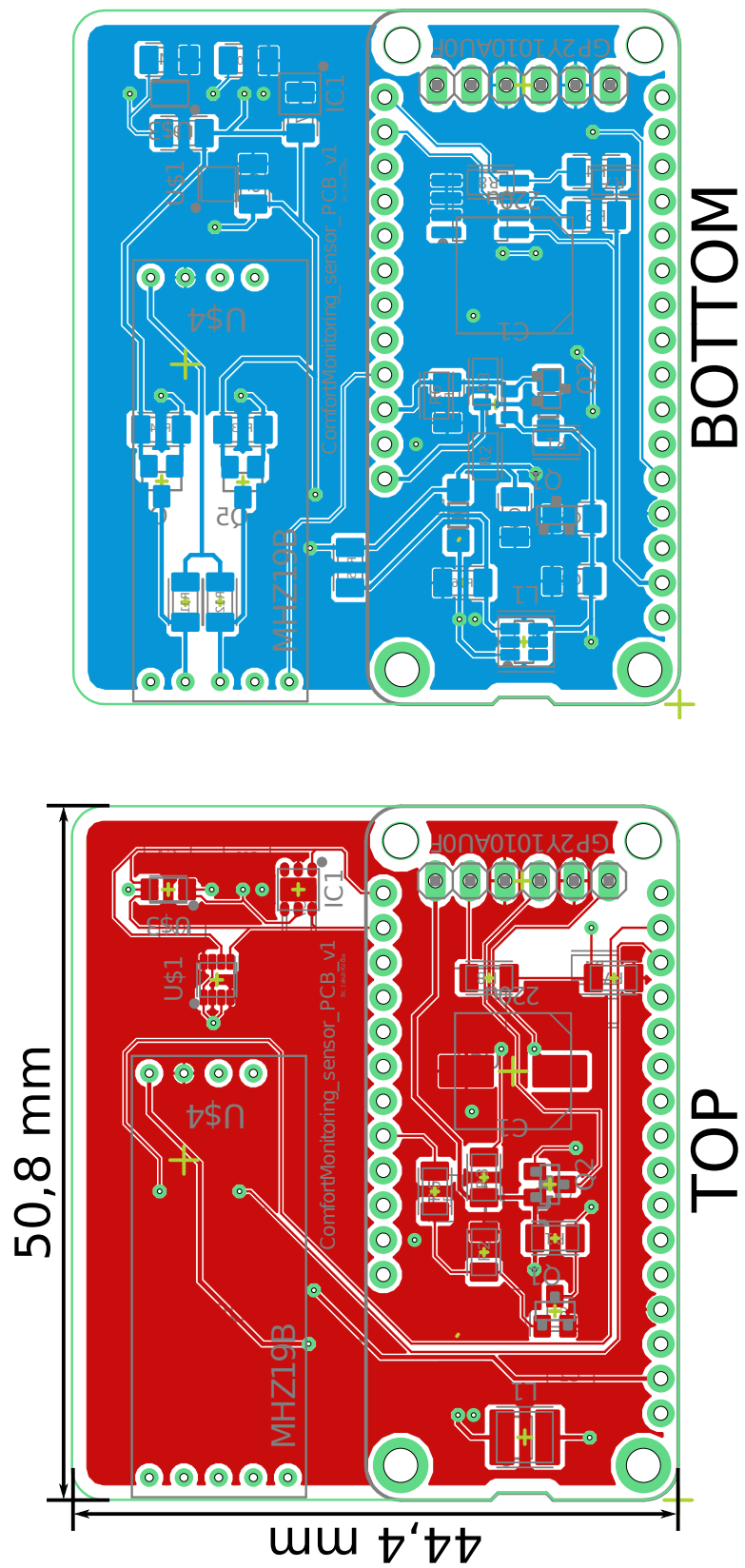
<b>D Grafy senzorického měření</b>	<b>117</b>
D.1 Dashboard – 24 hodin měření . . . . .	117
D.2 Vícedenní měření . . . . .	118
D.2.1 Den 1 . . . . .	119
D.2.2 Den 2 . . . . .	121
D.2.3 Den 3 . . . . .	123
D.2.4 Den 4 . . . . .	125
D.2.5 Den 5 . . . . .	127
<b>E Obsah elektronické přílohy</b>	<b>129</b>



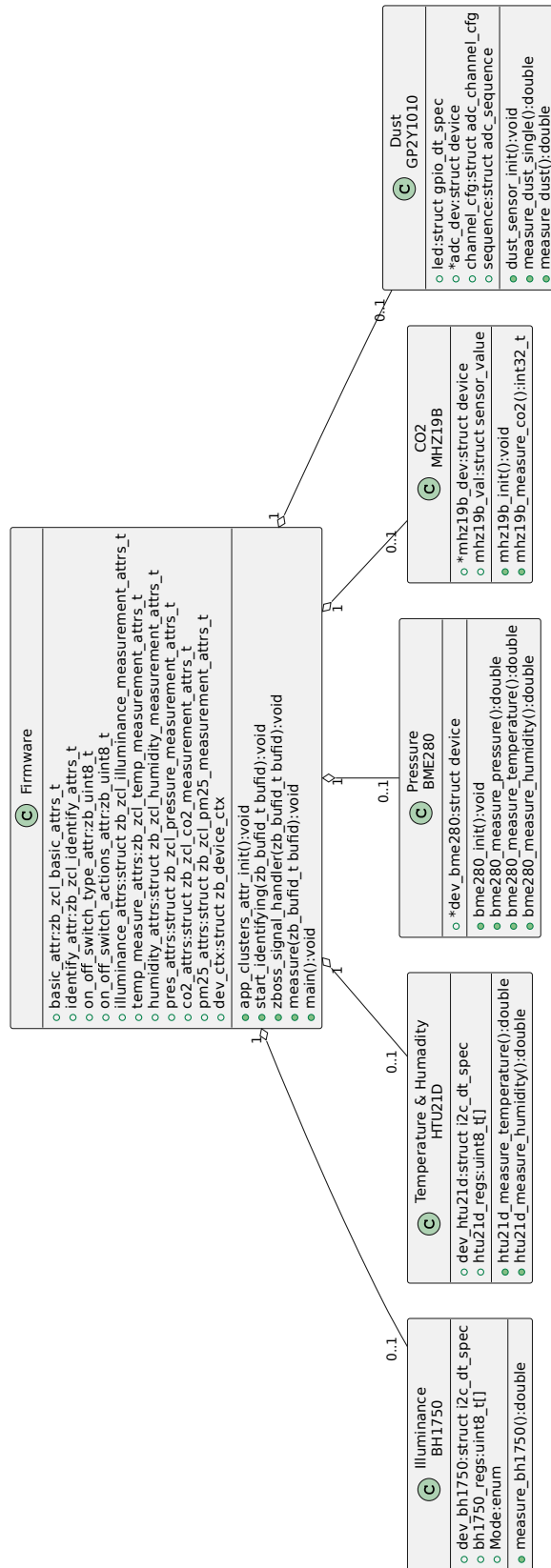
# A Elektrické schéma a deska plošného spoje



## A.1 Deska plošného spoje



# B Class diagram měřicího zařízení



## B.1 Popis funkcí

V následujícím textu je uveden popis funkcí pro diagram z přílohy B.

### B.1.1 Senzory

V návaznosti na kapitolu 4.1 je uveden popis funkcí pro senzorická zařízení.

#### Intenzita osvětlení – BH1750

Pro senzor intenzity osvětlení jsou definovány potřebné registry, které uvádí kapitola 1.4.2.

- **double measure\_bh1750()** – funkce pro I2C zápis a čtení měřené hodnoty intenzity osvětlení a její zpracování

#### Teplota a vlhkost – HTU21D

Obdobně jako u senzoru intenzity osvětlení byly i pro tento senzor definovány potřebné registry, které jsou popsány v kapitole 1.4.1.

- **double htu21d\_measure\_temperature()** – funkce pro I2C zápis a čtení měřené hodnoty teploty a její zpracování
- **double htu21d\_measure\_humidity()** – funkce pro I2C zápis a čtení měřené hodnoty relativní vlhkosti a její zpracování

#### Tlak – BME280

- **void bme280\_init()** – inicializace senzoru z definice zařízení (soubor s příponou .overlay)
- **double bme280\_measure\_pressure()** – funkce pro I2C zápis a čtení měřené hodnoty tlaku a její zpracování
- **double bme280\_measure\_temperature()** – funkce pro I2C zápis a čtení měřené hodnoty teploty a její zpracování
- **double bme280\_measure\_humidity()** – funkce pro I2C zápis a čtení měřené hodnoty relativní vlhkosti a její zpracování

#### Koncentrace oxidu uhličitého – MH-Z19B

- **void mhz19b\_init()** – inicializace senzoru z definice zařízení (soubor s příponou .overlay)
- **int32\_t mhz19b\_measure\_co2()** – funkce pro UART zápis a čtení měřené hodnoty CO<sub>2</sub> a její zpracování

## Koncentrace pevných částic – GP2Y1010

U tohoto senzoru byl nejdříve nastaven AD kanál pro měření a přidána infračervená LED do specifikací desky (soubor s příponou .dst), která odpovídá pinu s MOSFET tranzistorem, který IR LED uvnitř senzoru ovládá.

- **void dust\_sensor\_init()** – inicializace senzoru a AD kanálu, definice zařízení
- **double measure\_dust\_single()** – provedení jednoho měření dle postupu uvedeného v [17]
- **double measure\_dust** – opakované volání funkce `measure_dust_single()` a získání průměrné hodnoty koncentrace pevných částic

### B.1.2 Firmware

V návaznosti na kapitolu 4.1 je uveden popis funkcí pro SoC. Pomocí ZBOSS API a doplněním tohoto API jsou definovány koncové body (endpoints) a clustery společně s funkcemi pro obsluhu událostí.

#### **void app\_clusters\_attr\_init()**

Funkce pro nastavení počátečních hodnot některým clusterům.

#### **void start\_identifying(zb\_bufid\_t bufid)**

Funkce pro představení zařízení v nové Zigbee síti – identifikace.

#### **void zboss\_signal\_handler(zb\_bufid\_t bufid)**

Funkce pro zpracování událostí Zigbee komunikace.

#### **void measure(zb\_bufid\_t bufid)**

Funkce pro senzorická měření.

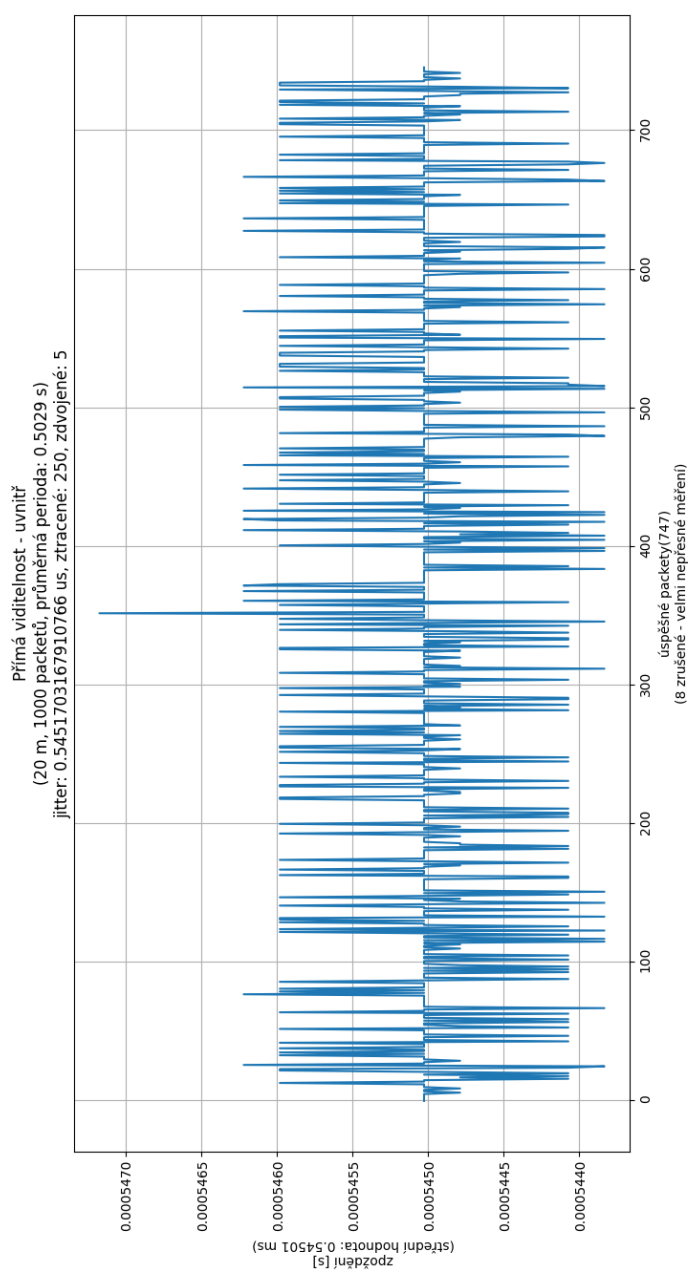
#### **void main()**

Hlavní funkce, ve které dochází k inicializaci senzorů, nastavení GPIO, registraci koncových bodů aplikace, registraci obsluhy událostí koncových bodů (například: funkce `measure()` se vykoná vždy při požadavku na koncový bod s měřicími clustery) a zapnutí Zigbee vlákna.

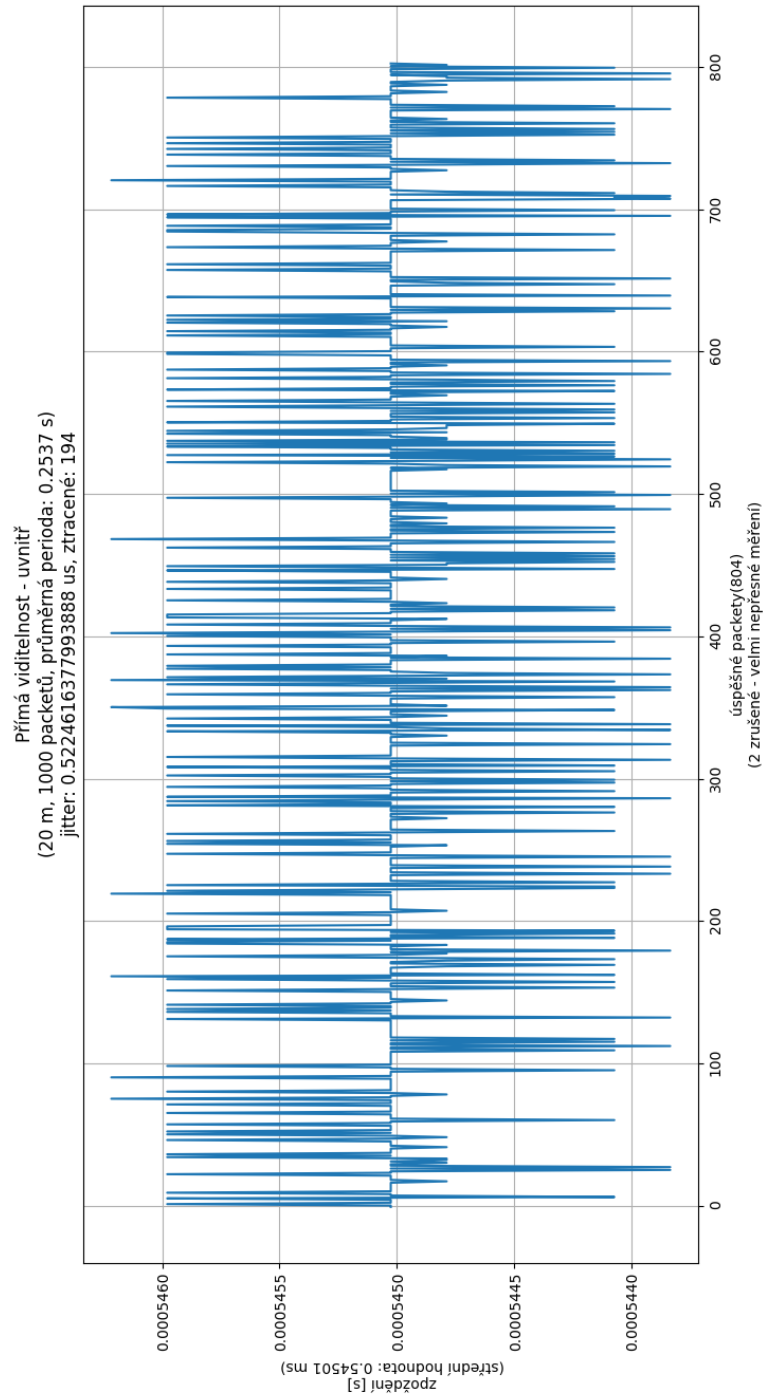
# C Grafy měření Zigbee sítě

## C.1 Uzavřený prostor – přímá viditelnost

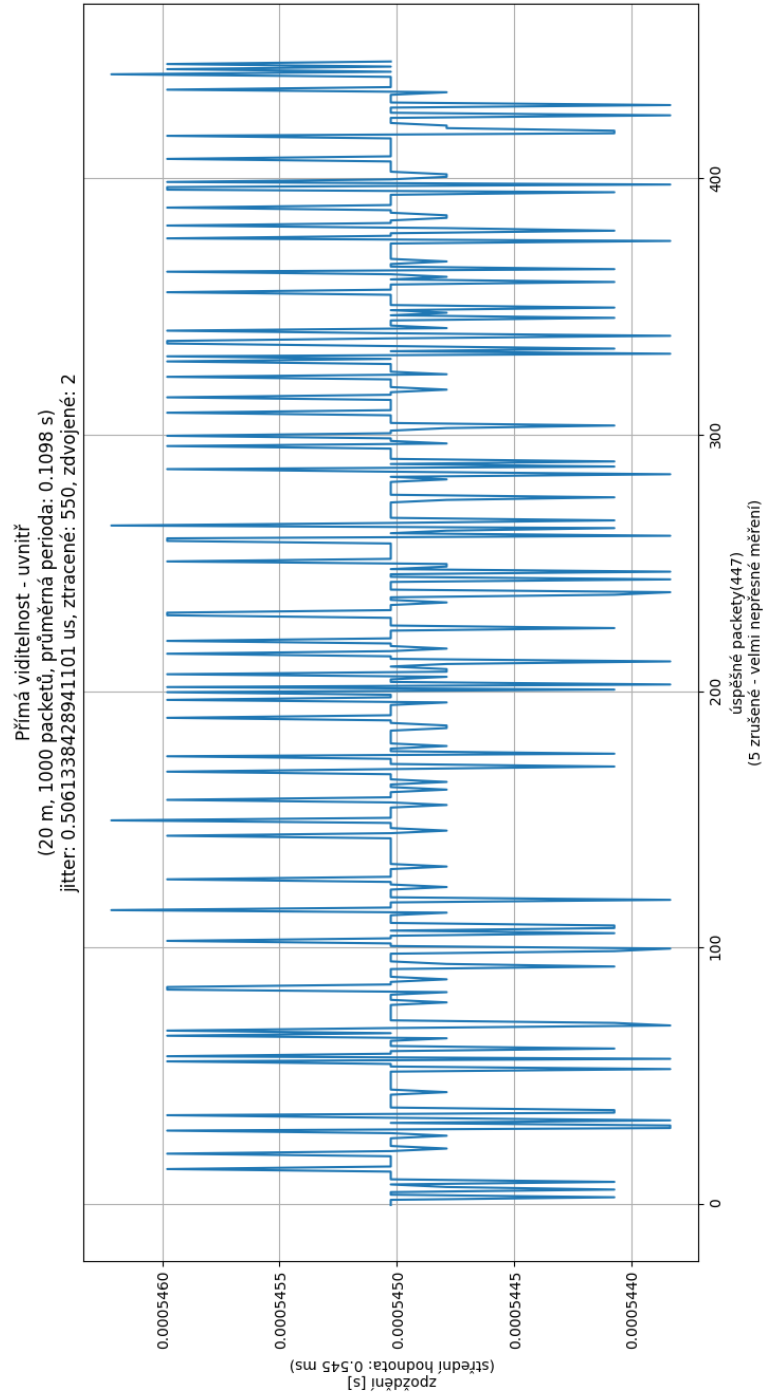
### C.1.1 20 metrů – perioda 0,5 sekundy



## C.1.2 20 metrů – perioda 0,25 sekundy

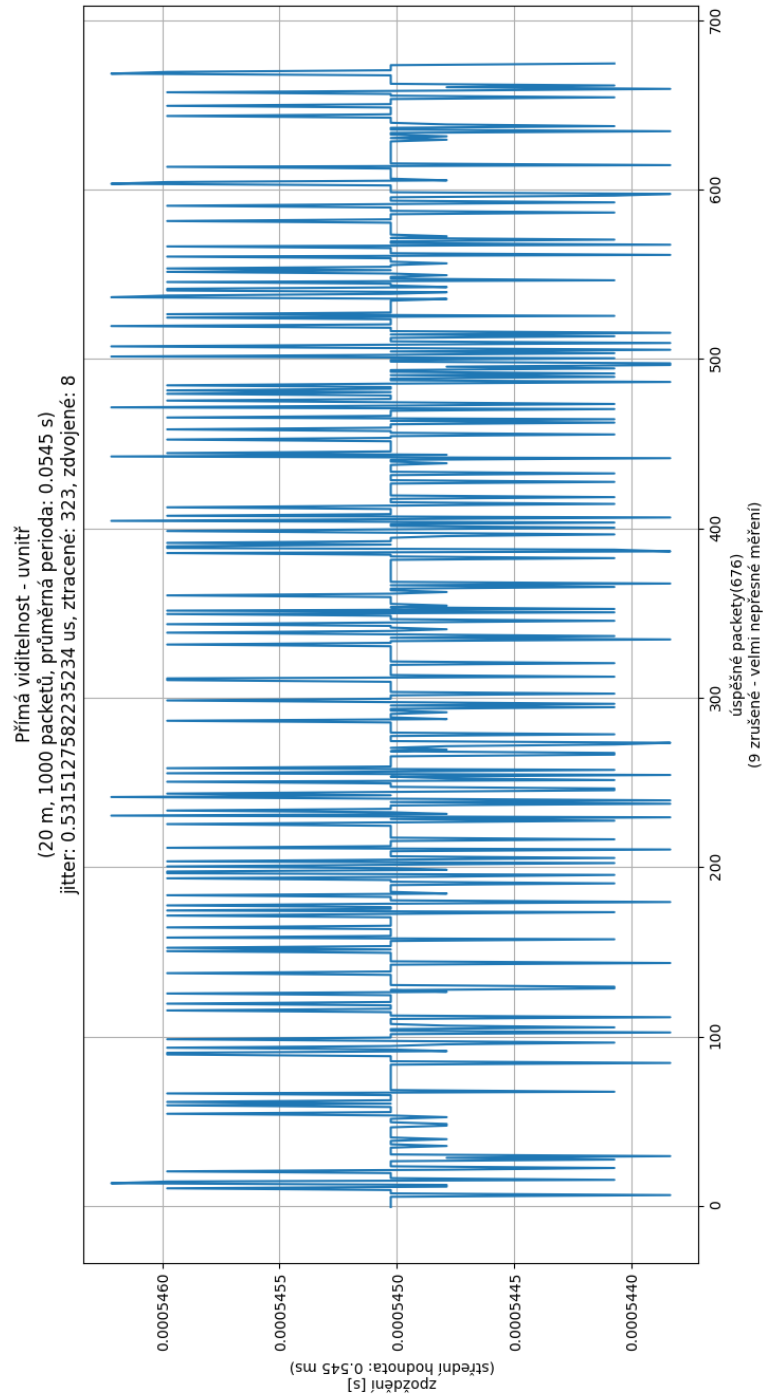


### C.1.3 20 metrů – perioda 0,1 sekundy

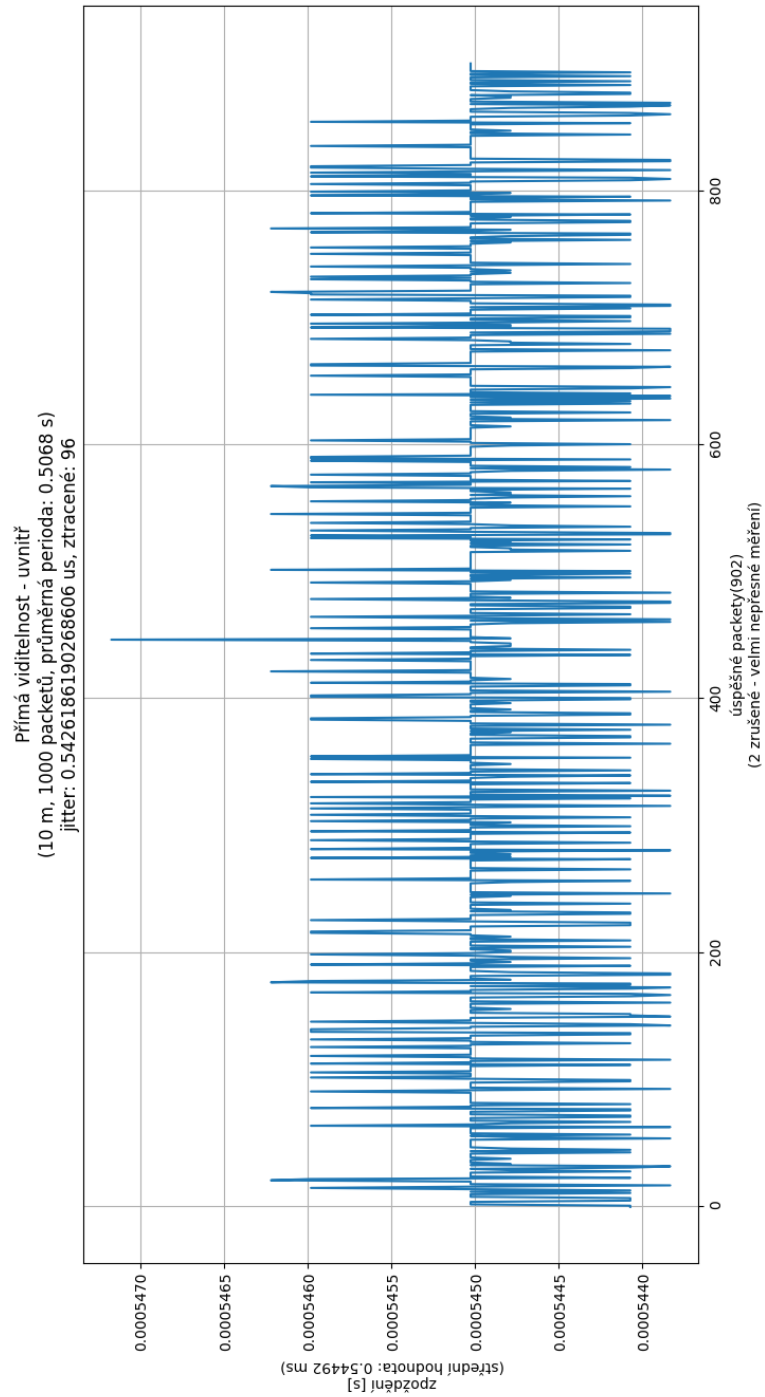




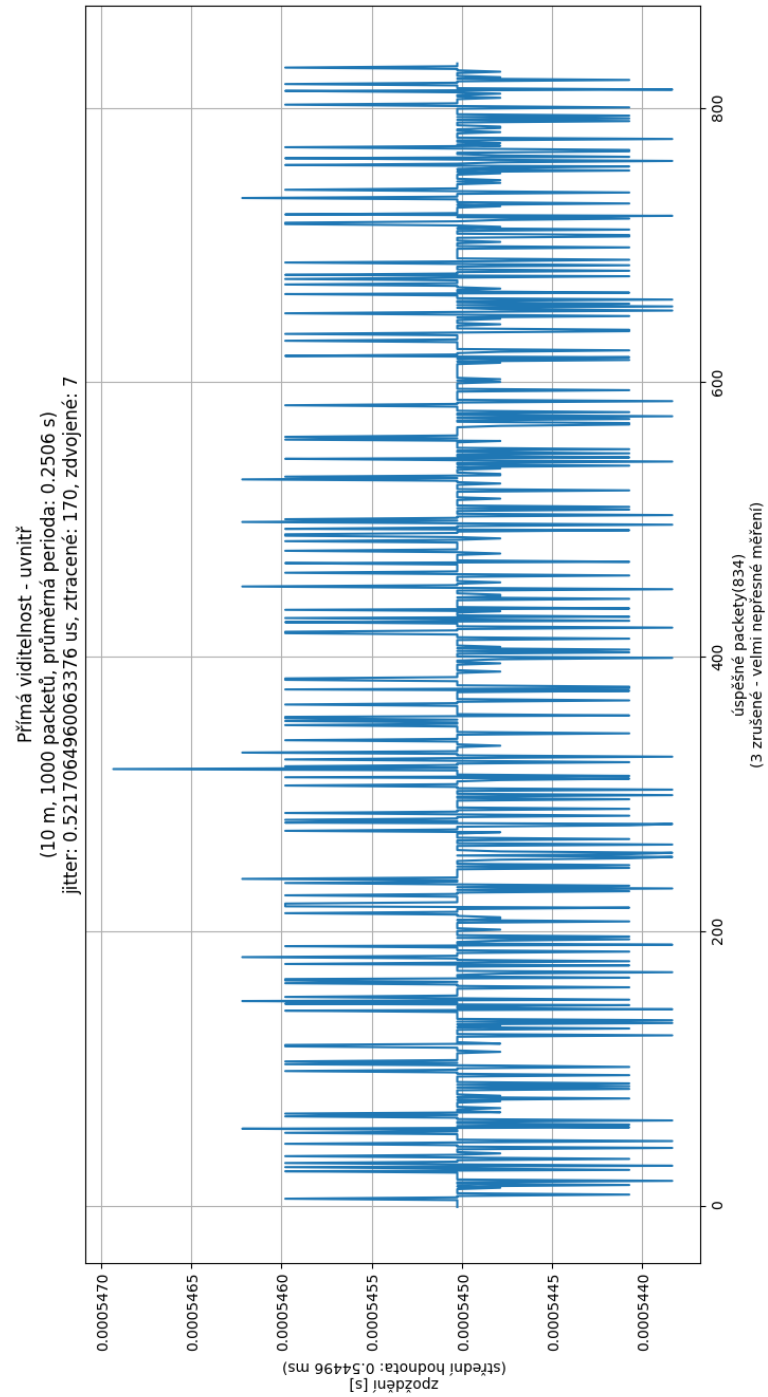
## C.1.4 20 metrů – perioda 0,050 sekundy



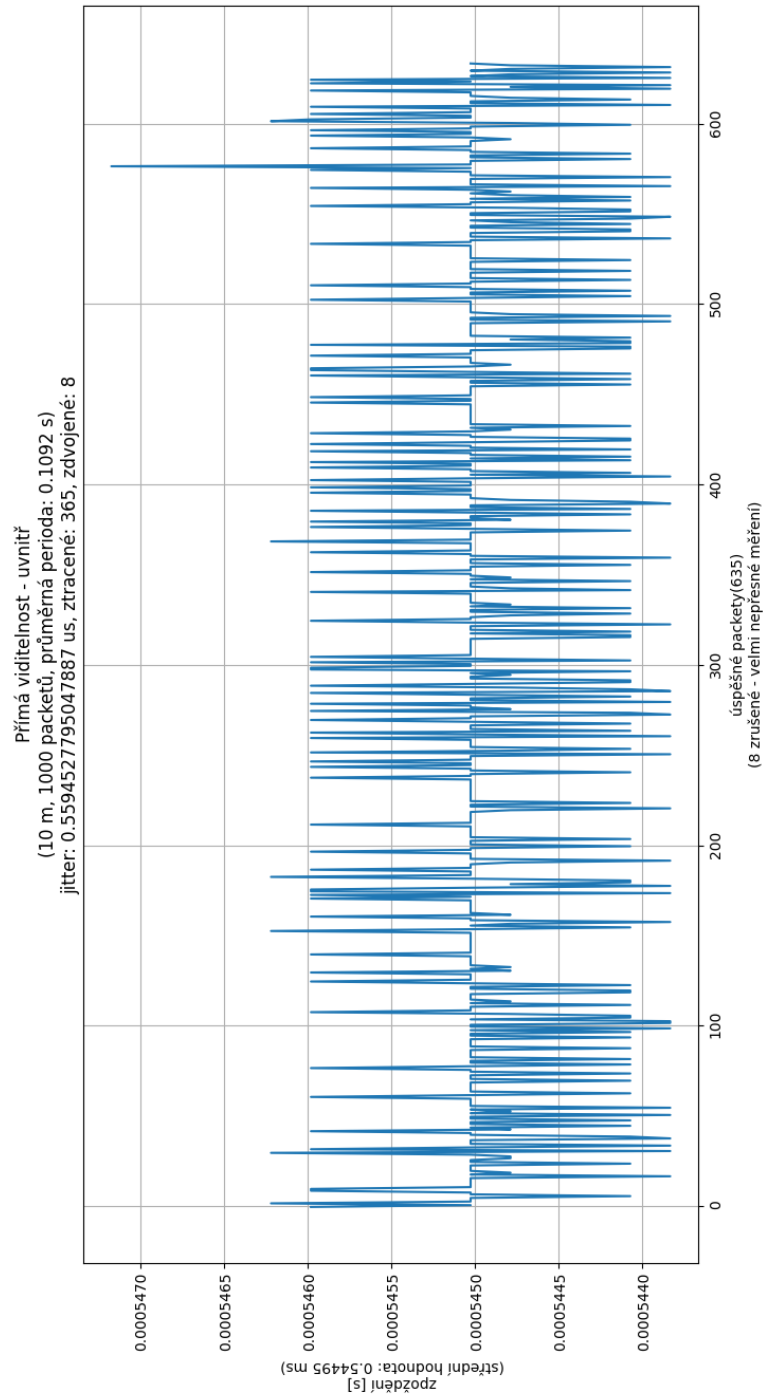
## C.1.5 10 metrů – perioda 0,5 sekundy



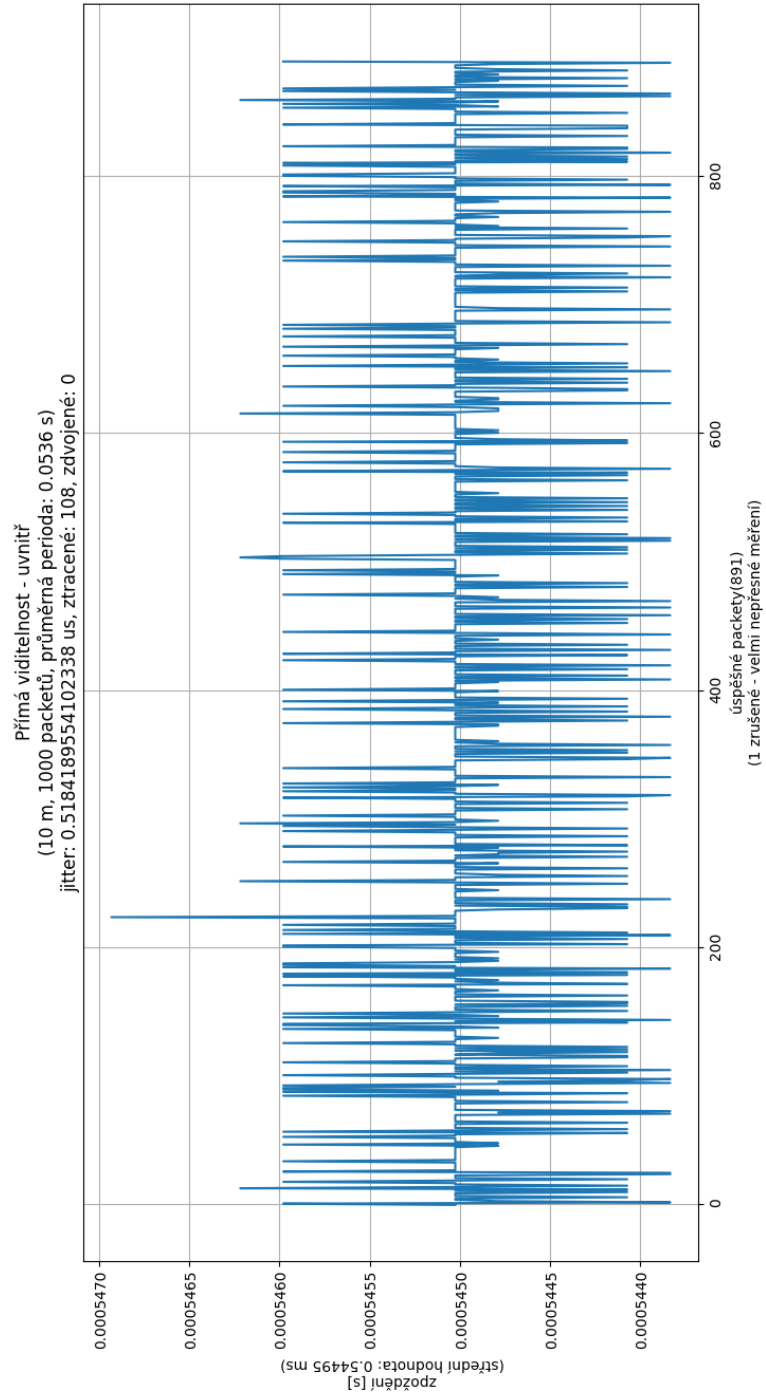
## C.1.6 10 metrů – perioda 0,25 sekundy



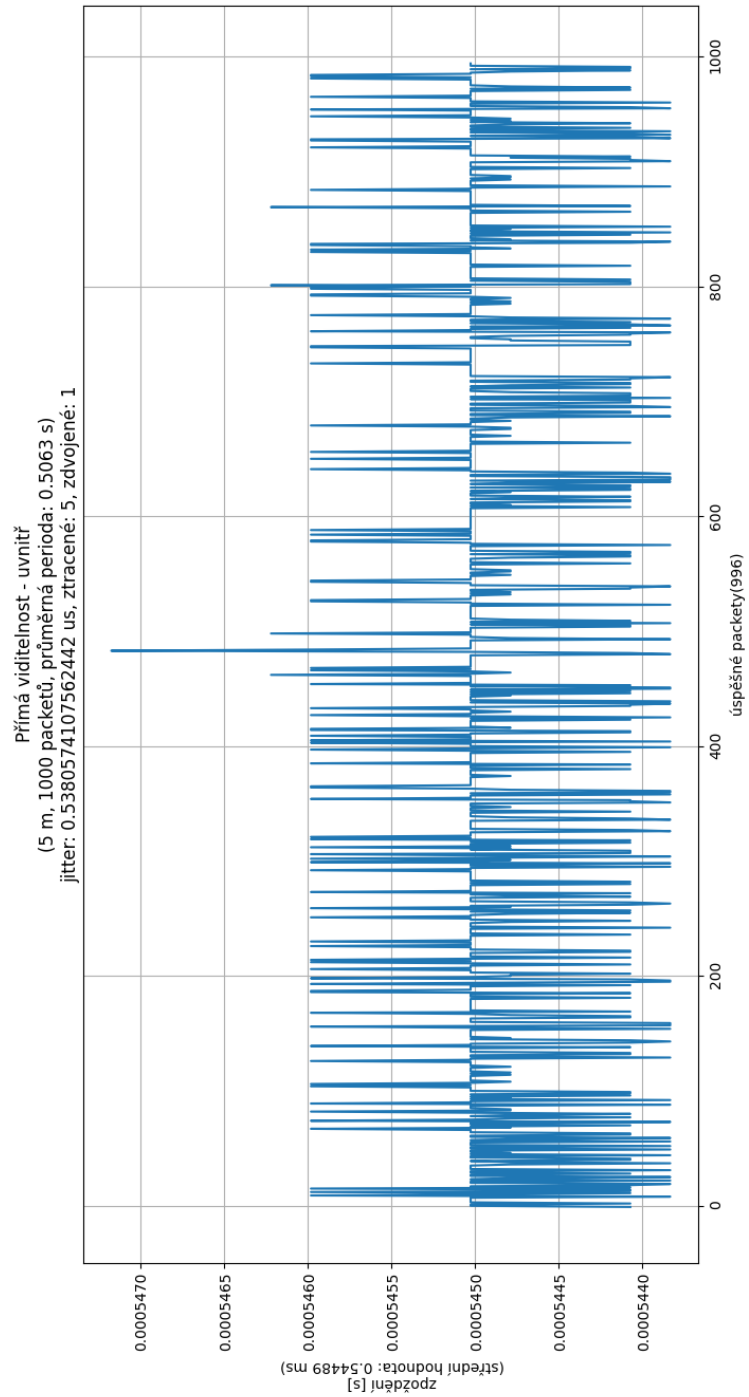
## C.1.7 10 metrů – perioda 0,1 sekundy



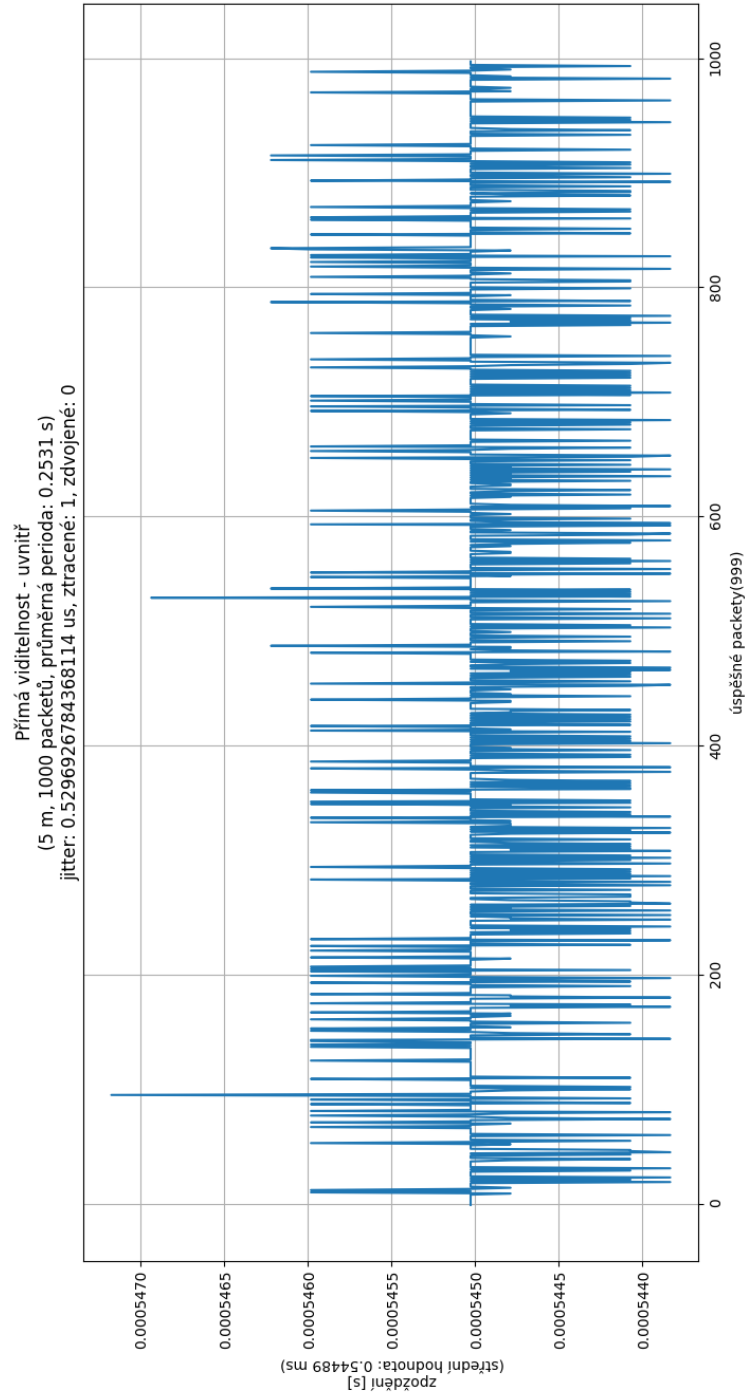
## C.1.8 10 metrů – perioda 0,050 sekundy



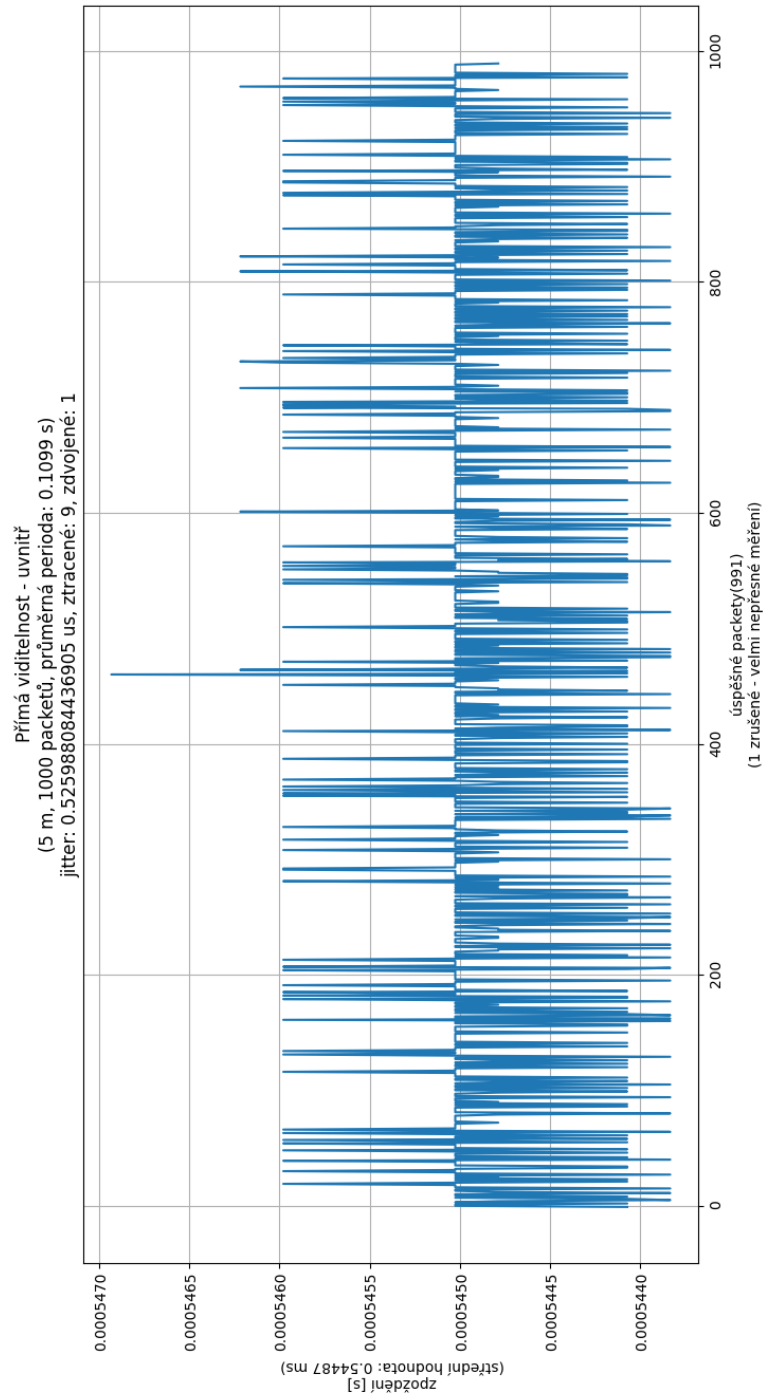
## C.1.9 5 metrů – perioda 0,5 sekundy



## C.1.10 5 metrů – perioda 0,25 sekundy

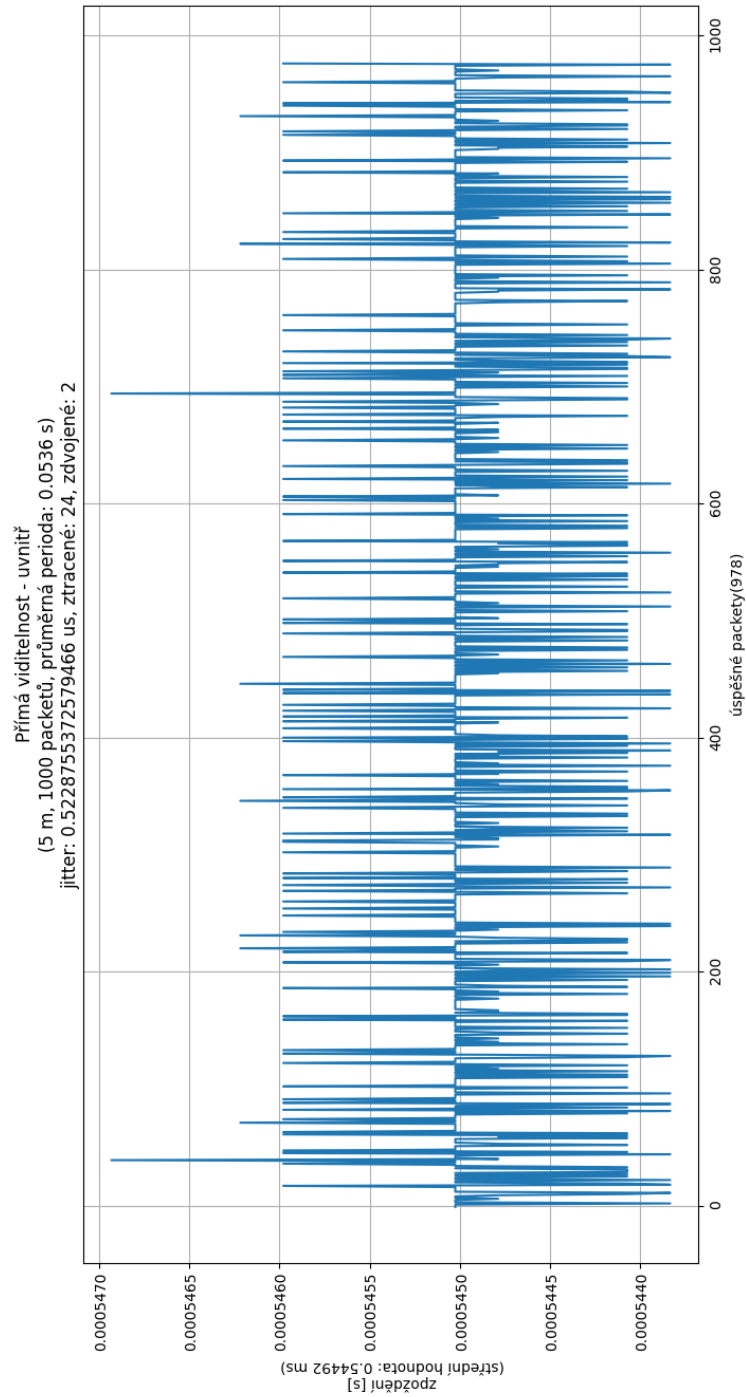


### C.1.11 5 metrů – perioda 0,1 sekundy

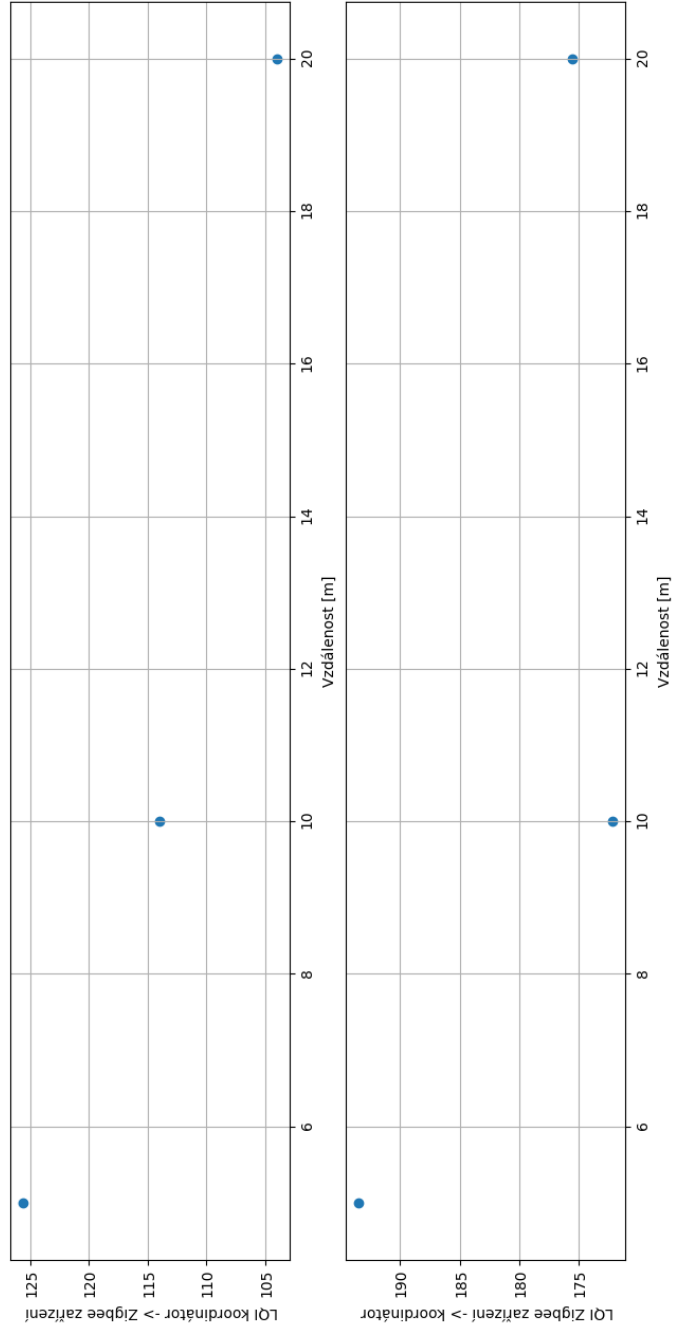




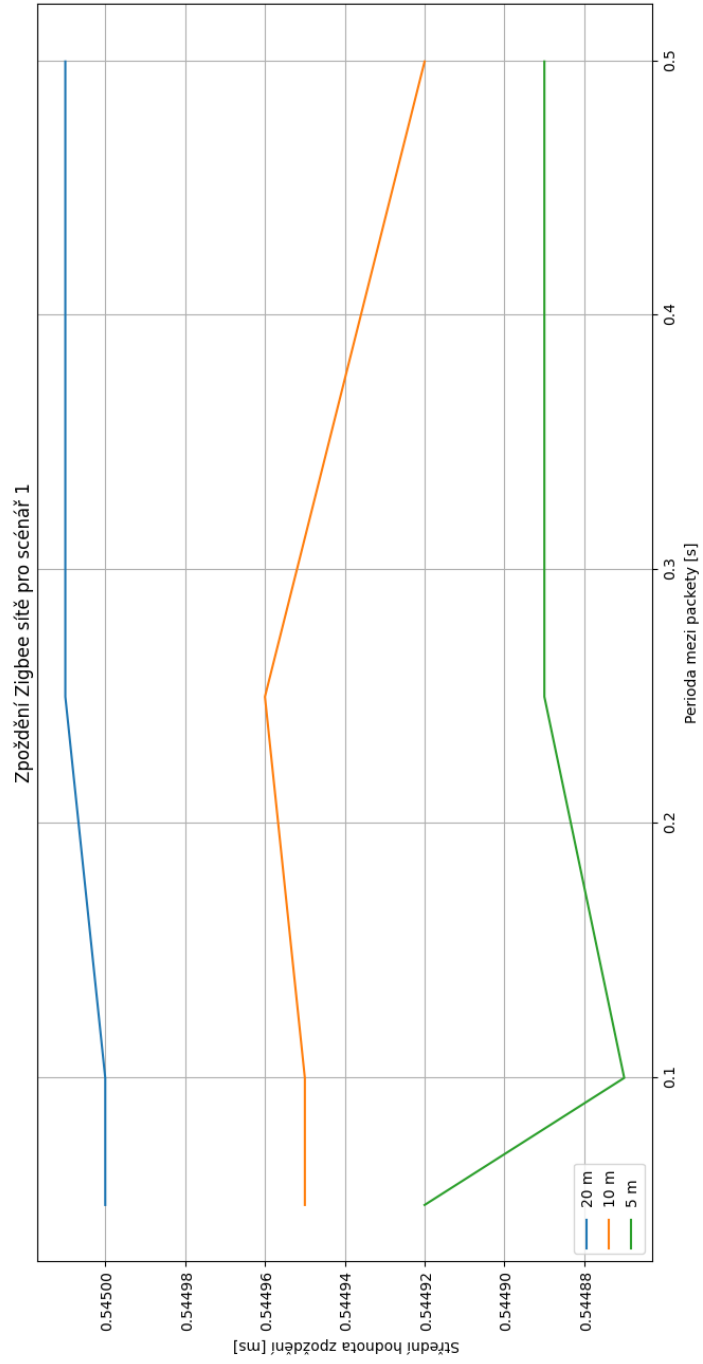
## C.1.12 5 metrů – perioda 0,050 sekundy



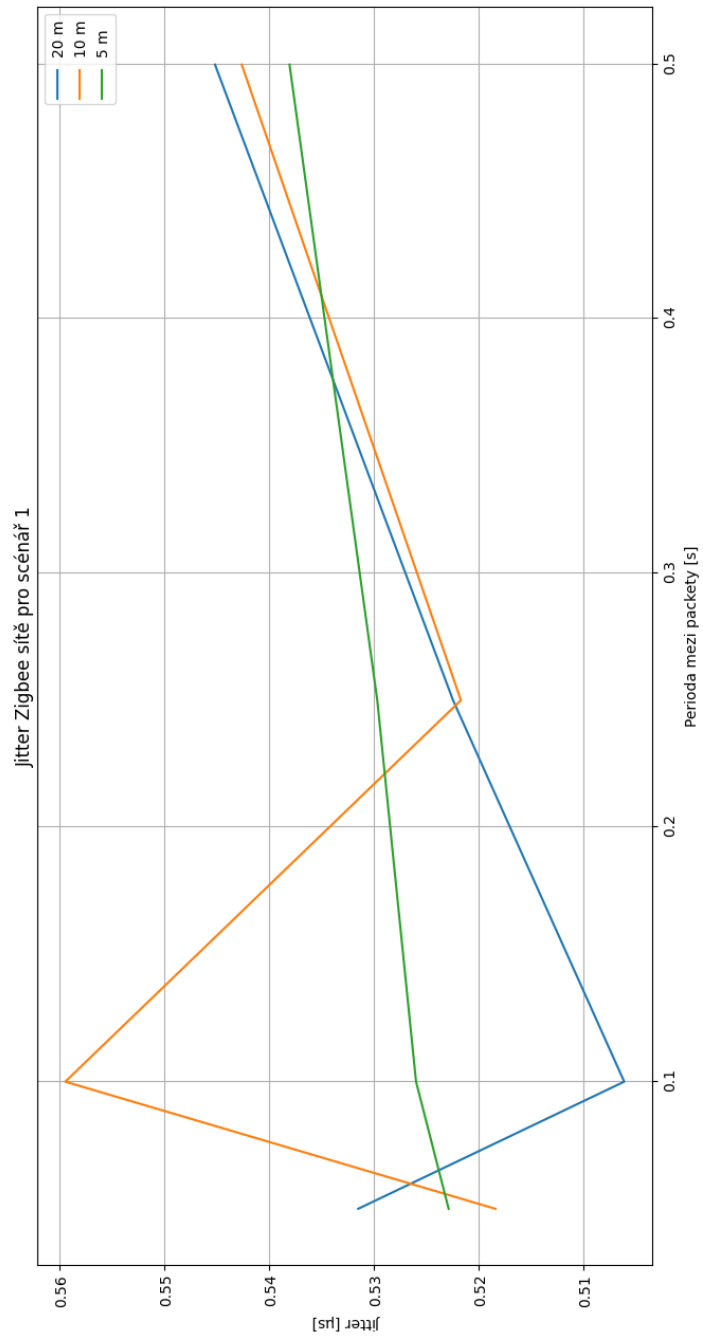
### C.1.13 LQI



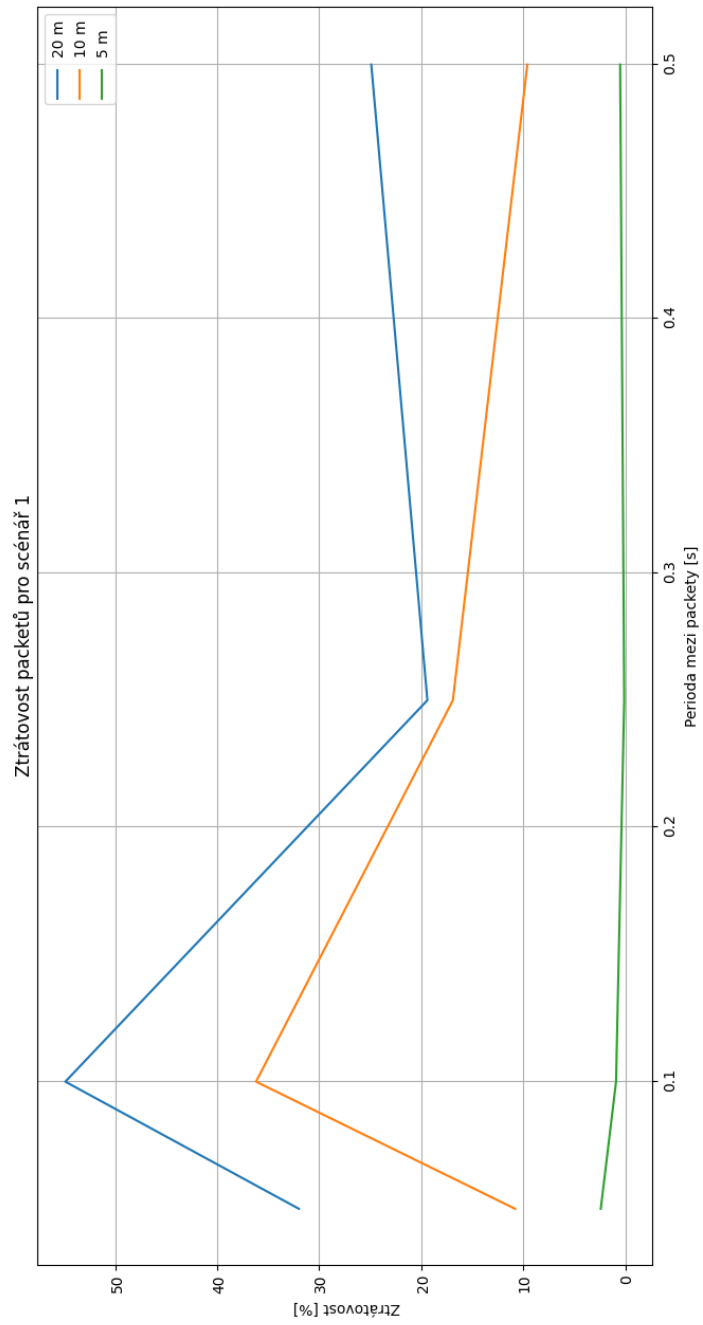
## C.1.14 Zpoždění



## C.1.15 Jitter

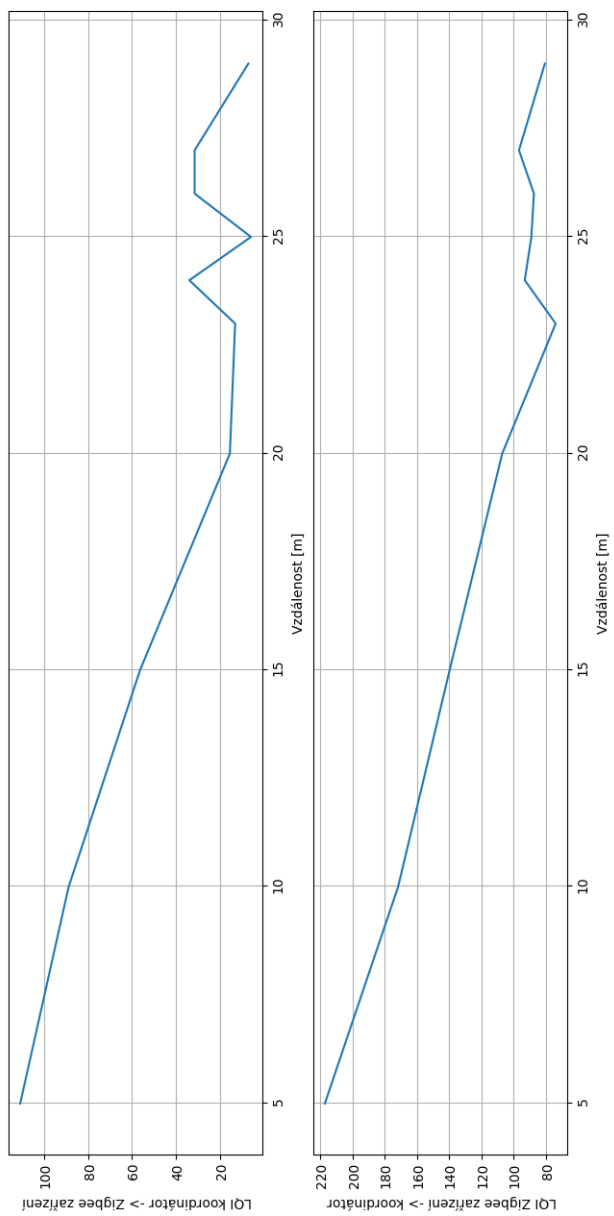


## C.1.16 Ztrátovost

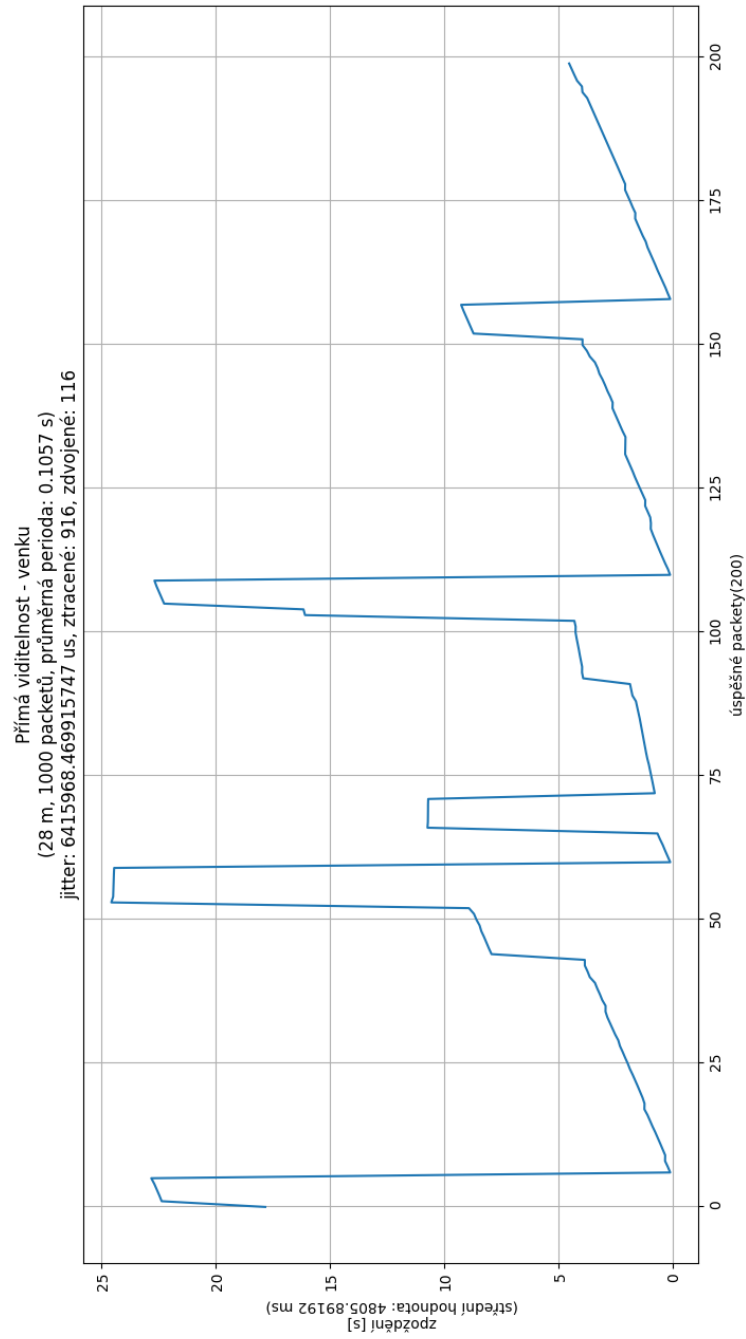


## C.2 Venkovní prostor – přímá viditelnost

### C.2.1 LQI

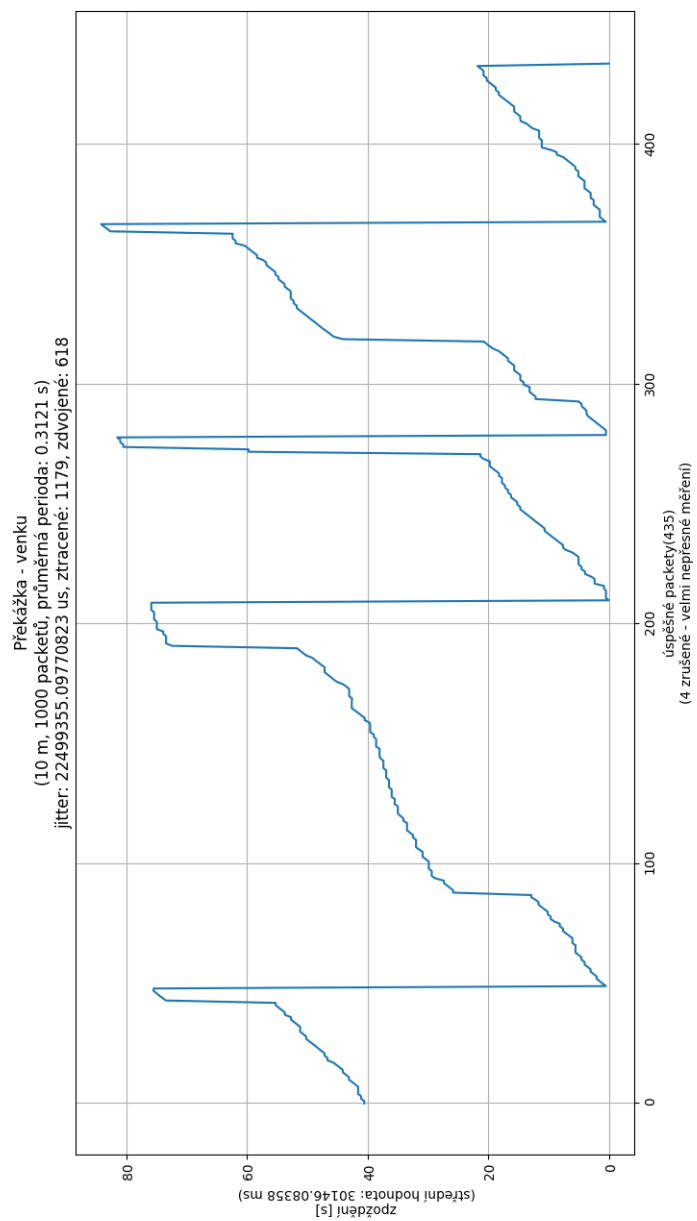


## C.2.2 28 metrů – perioda 0,1 sekundy



## C.3 Venkovní prostor – překážka

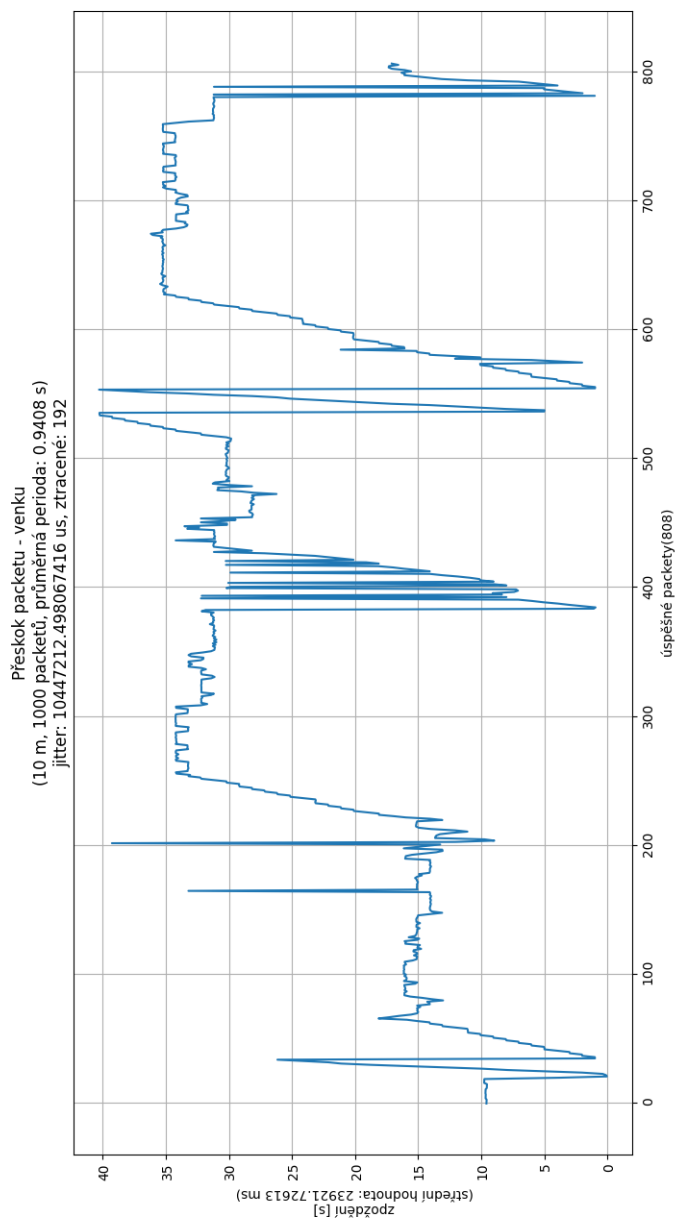
### C.3.1 10 metrů — perioda 0,5 sekundy



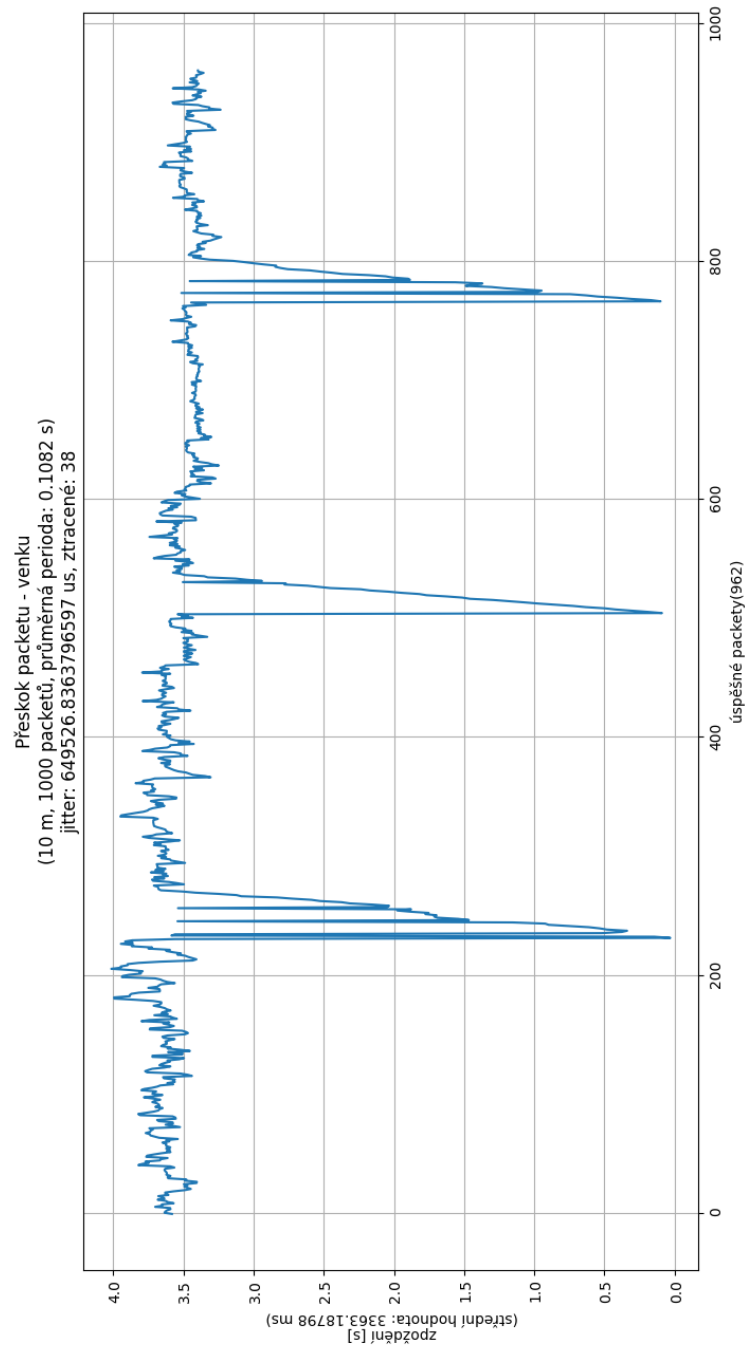


## C.4 Venkovní prostor – přeskok packetu

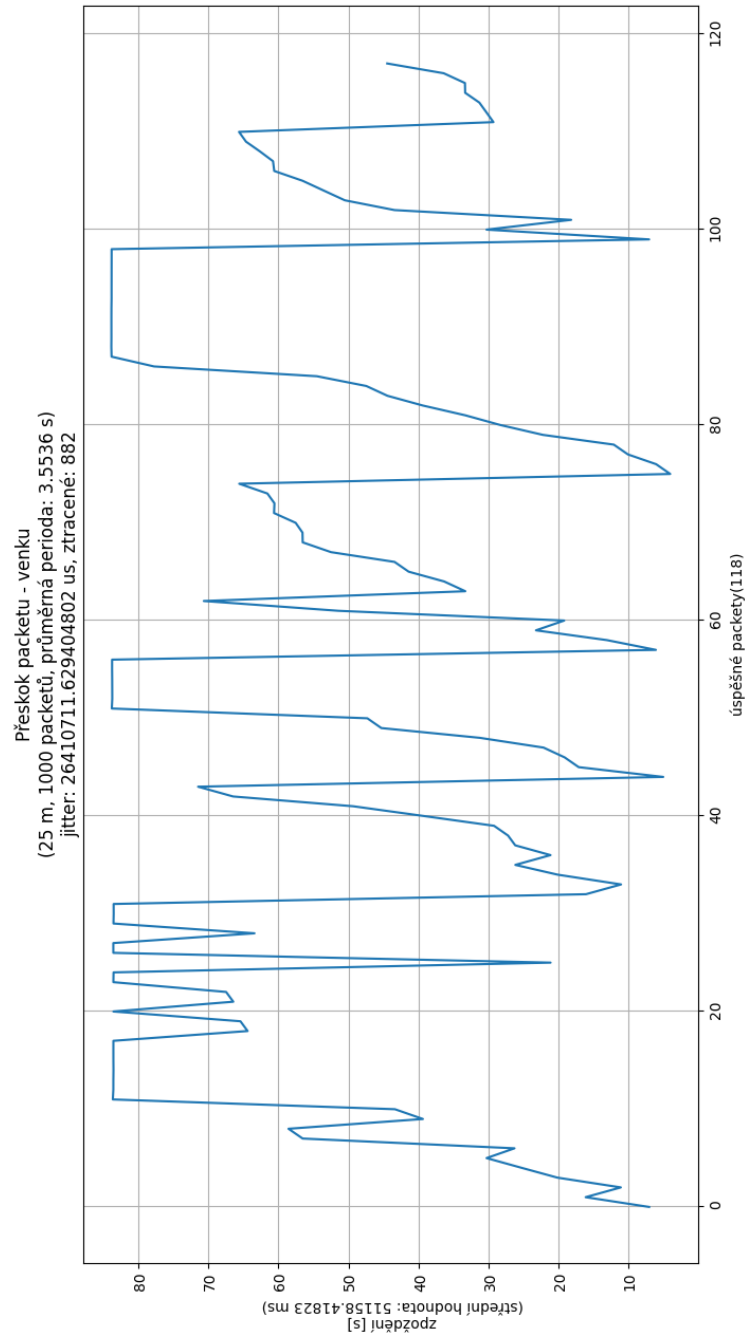
### C.4.1 10 metrů — perioda 1 sekunda



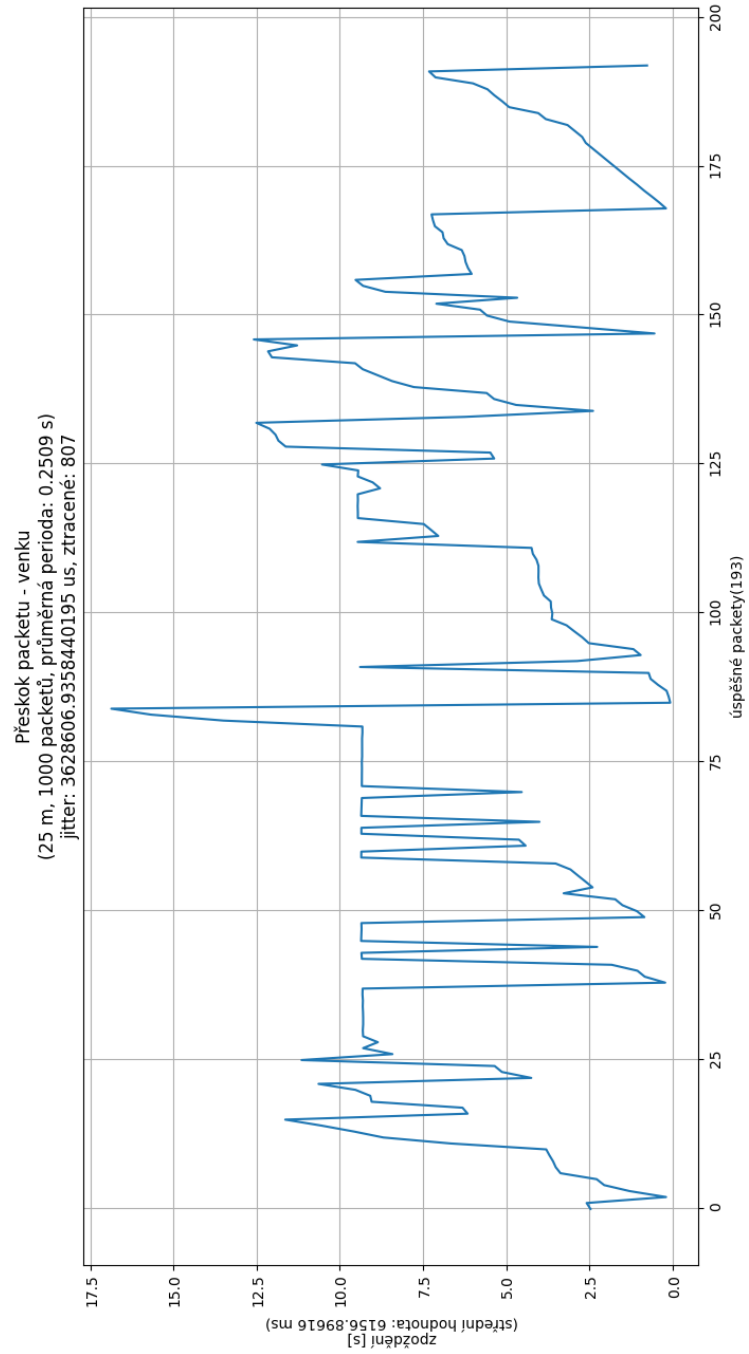
## C.4.2 10 metrů — perioda 0,1 sekundy



### C.4.3 25 metrů — perioda 1 sekunda



## C.4.4 25 metrů — perioda 0,1 sekundy

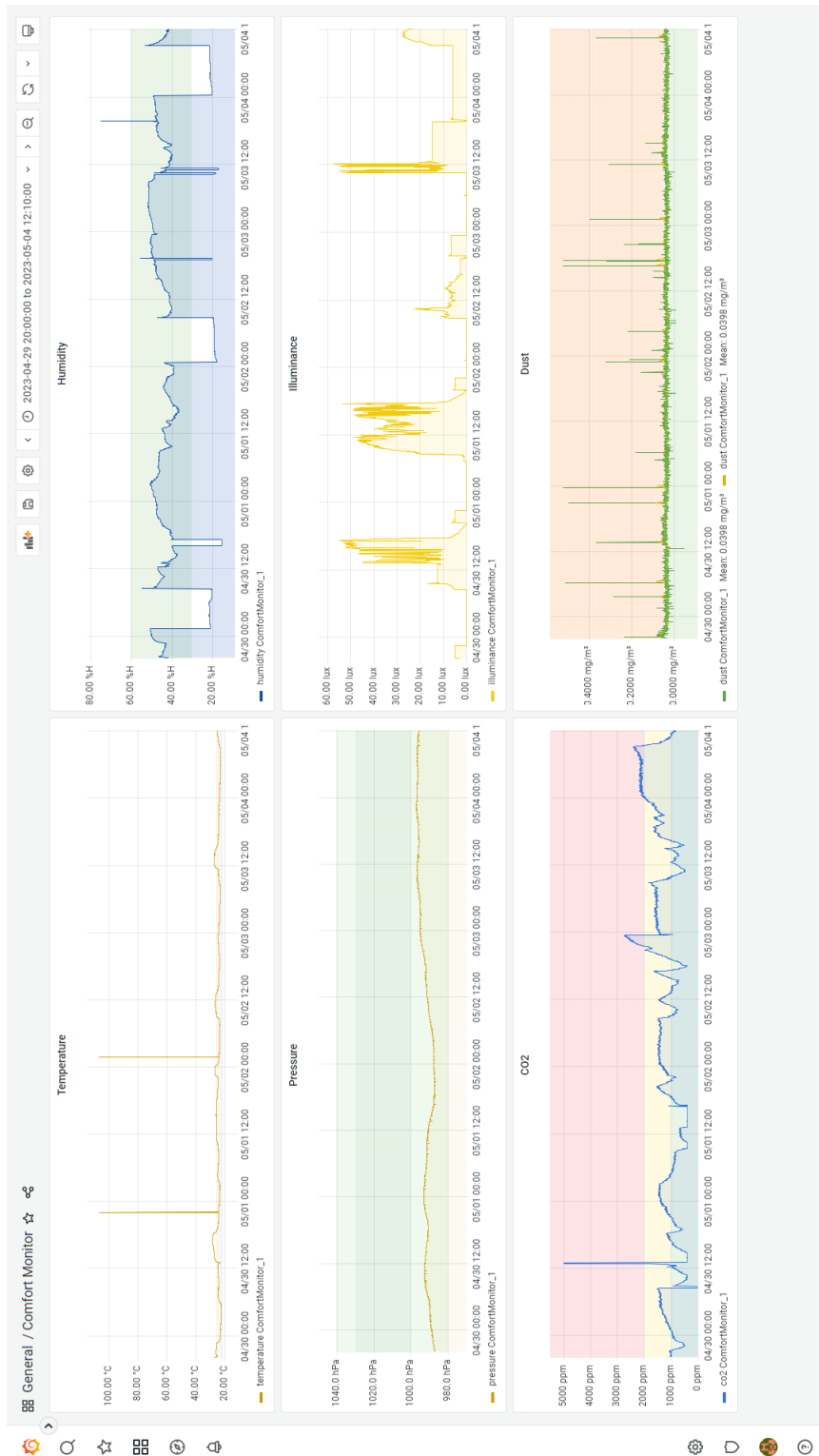


# D Grafy senzorkého měření

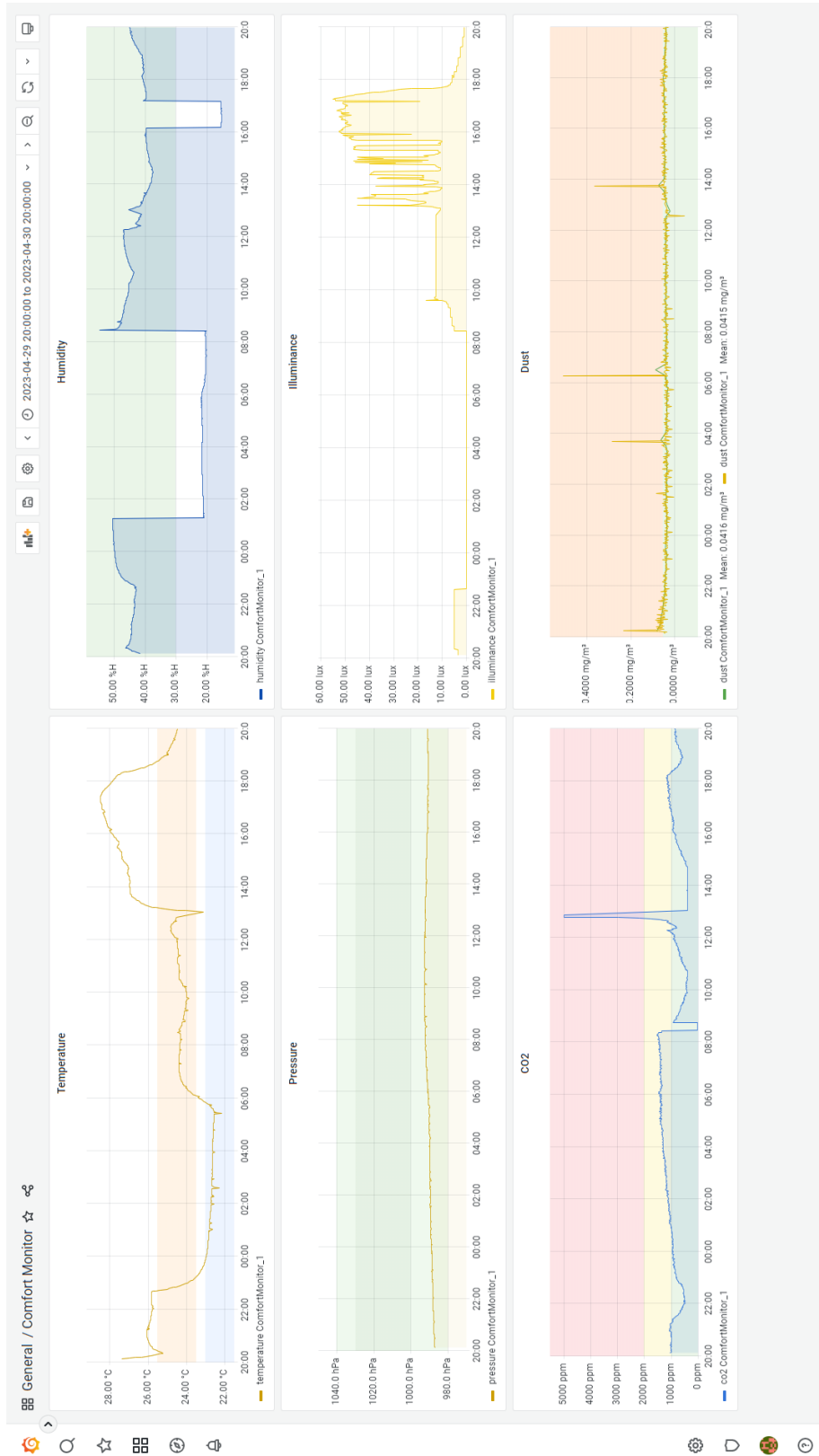
## D.1 Dashboard – 24 hodin měření



## D.2 Vícedenní měření



# D.2.1 Den 1



## Venkovní počasí

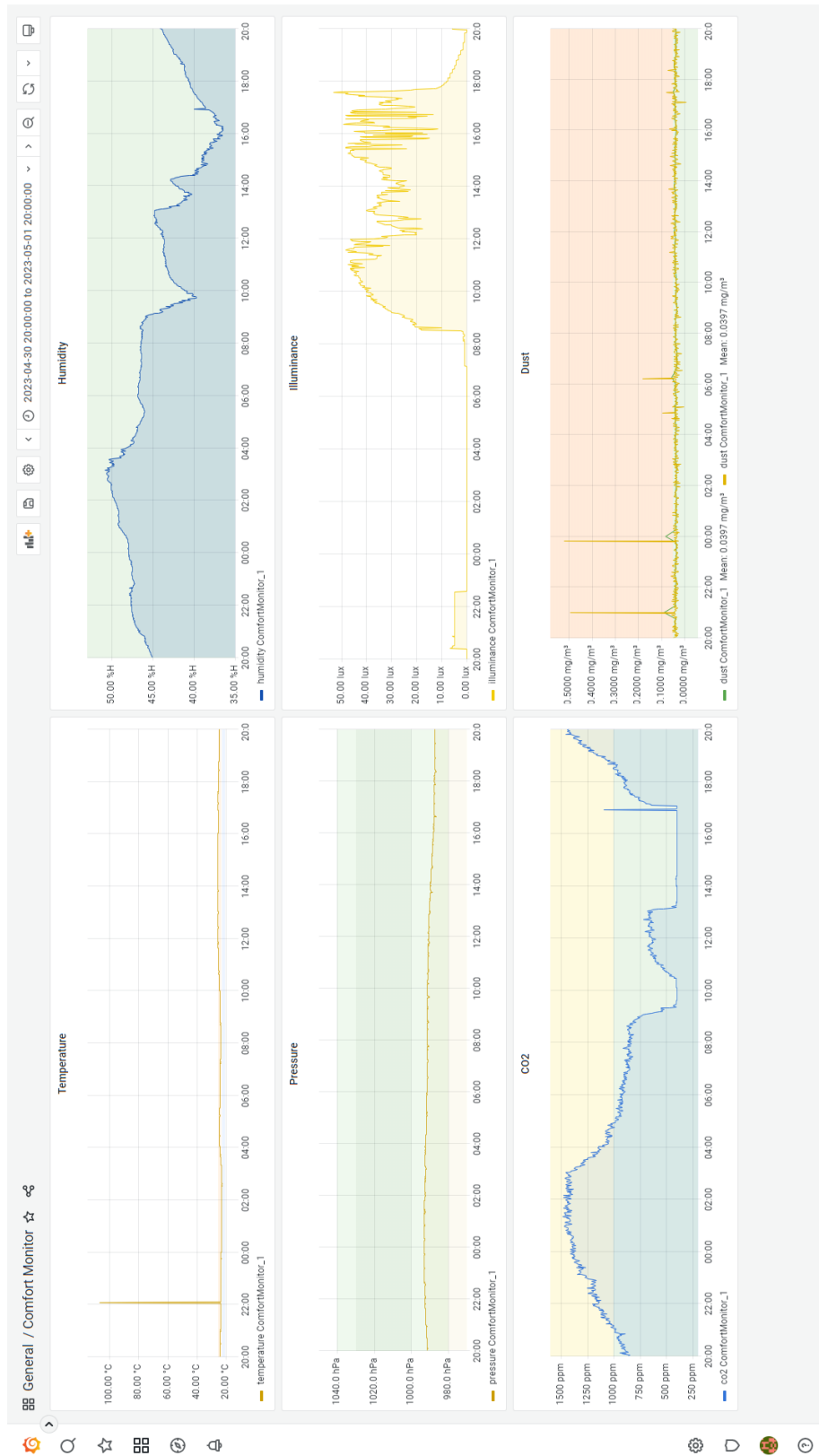
- **Ráno**
  - Zataženo
  - 11 °C
  - 78 % relativní vlhkost
  - 1019 hPa
- **Odpoledne**
  - Polojasno
  - 15 °C
  - 54 % relativní vlhkost
  - 1020 hPa
- **Večer**
  - Jasno
  - 16 °C
  - 45 % relativní vlhkost
  - 1019 hPa

## Anotace událostí

- **20:05** – začátek měření (rozsvíceno, okno na mikroventilaci, otevřené dveře)
- **20:19** – připojeno nabíjení
- **21:10** – okno otevřené na ventilaci
- **22:00** – zavření okna
- **22:37** – zhasnutí světel, odpojeno nabíjení
- **08:15** – okno otevřené na ventilaci
- **08:26** – restart zařízení
- **08:44** – restart zařízení
- **10:36** – zavření okna
- **12:15** – okno otevřené úplně
- **12:50** – zařízení se vypnulo (vybitá baterie)
- **13:02** – připojeno na nabíjení (restart zařízení)
- **13:30** – okno otevřené na ventilaci (2×)
- **13:38** – restart zařízení
- **14:28** – zavření okna
- **17:10** – restart zařízení
- **18:05** – okno otevřené na ventilaci (2×)
- **18:18** – odpojeno nabíjení
- **18:53** – zavření okna



## D.2.2 Den 2



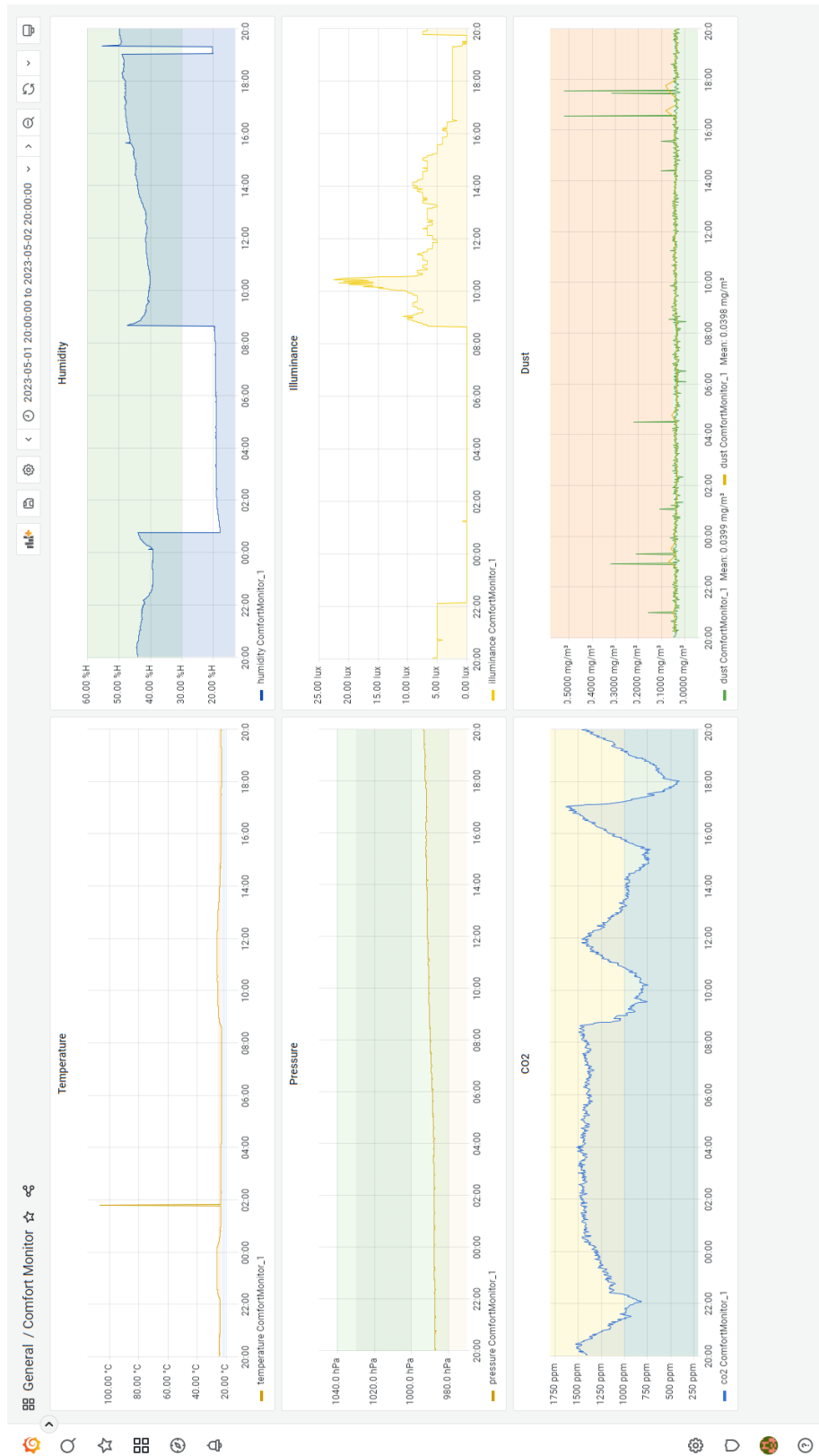
## Venkovní počasí

- **Ráno**
  - Jasno
  - 9 °C
  - 67 % relativní vlhkost
  - 1019 hPa
- **Odpoledne**
  - Jasno
  - 17 °C
  - 56 % relativní vlhkost
  - 1018 hPa
- **Večer**
  - Oblačno
  - 17 °C
  - 58 % relativní vlhkost
  - 1015 hPa

## Anotace událostí

- **20:25** – rozsvícení světel
- **22:34** – zhasnutí světel
- **02:42** – okno otevřené na mikroventilaci
- **08:30** – roztažení závěsů oken
- **09:02** – okno otevřené na ventilaci (2×)
- **09:50** – zavření okna
- **13:00** – okno otevřené na ventilaci (2×)
- **13:40** – zavření okna
- **19:24** – pájení do **19:35**
- **19:57** – rozsvícení světel

## D.2.3 Den 3



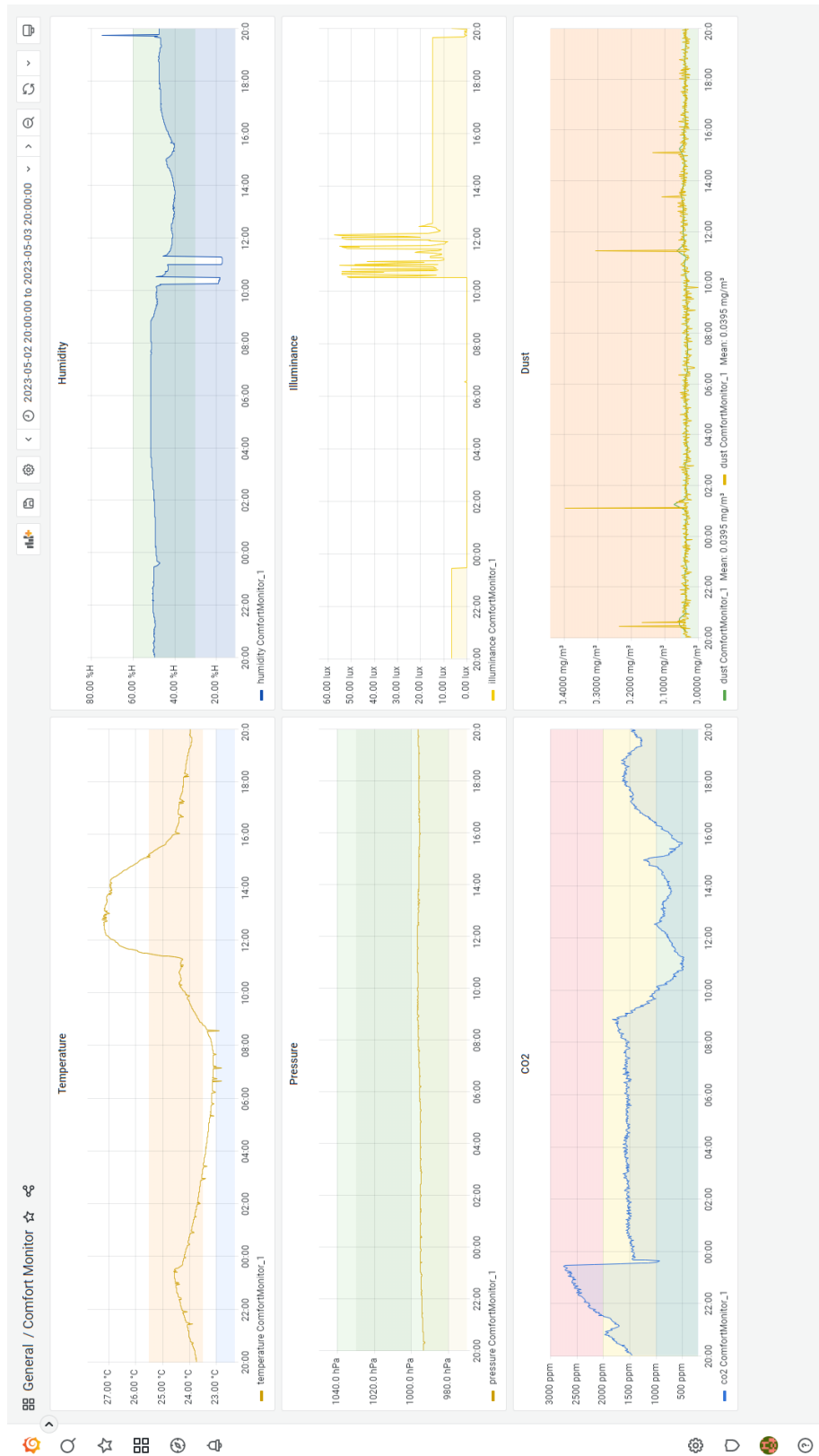
## Venkovní počasí

- **Ráno**
  - Oblačno
  - 11 °C
  - 82 % relativní vlhkost
  - 1017 hPa
- **Odpoledne**
  - Zataženo
  - 15 °C
  - 71 % relativní vlhkost
  - 1019 hPa
- **Večer**
  - Dešťové přeháňky
  - 16 °C
  - 75 % relativní vlhkost
  - 1019 hPa

## Anotace událostí

- **20:21** – okno otevřené na ventilaci
- **22:08** – zhasnutí světel, okno otevřené na mikroventilaci
- **22:10** – připojeno na nabíjení
- **00:07** – odpojeno nabíjení
- **08:28** – roztažení závěsů oken
- **08:33** – okno otevřené na ventilaci (2×)
- **08:35** – připojeno na nabíjení
- **08:38** – restart zařízení
- **10:10** – zavření okna
- **11:58** – okno otevřené na ventilaci
- **15:22** – zavření okna
- **15:37** – odpojeno nabíjení
- **17:01** – okno otevřené úplně
- **18:00** – zavření okna
- **19:19** – restart zařízení
- **19:44** – rozsvícení světel

## D.2.4 Den 4



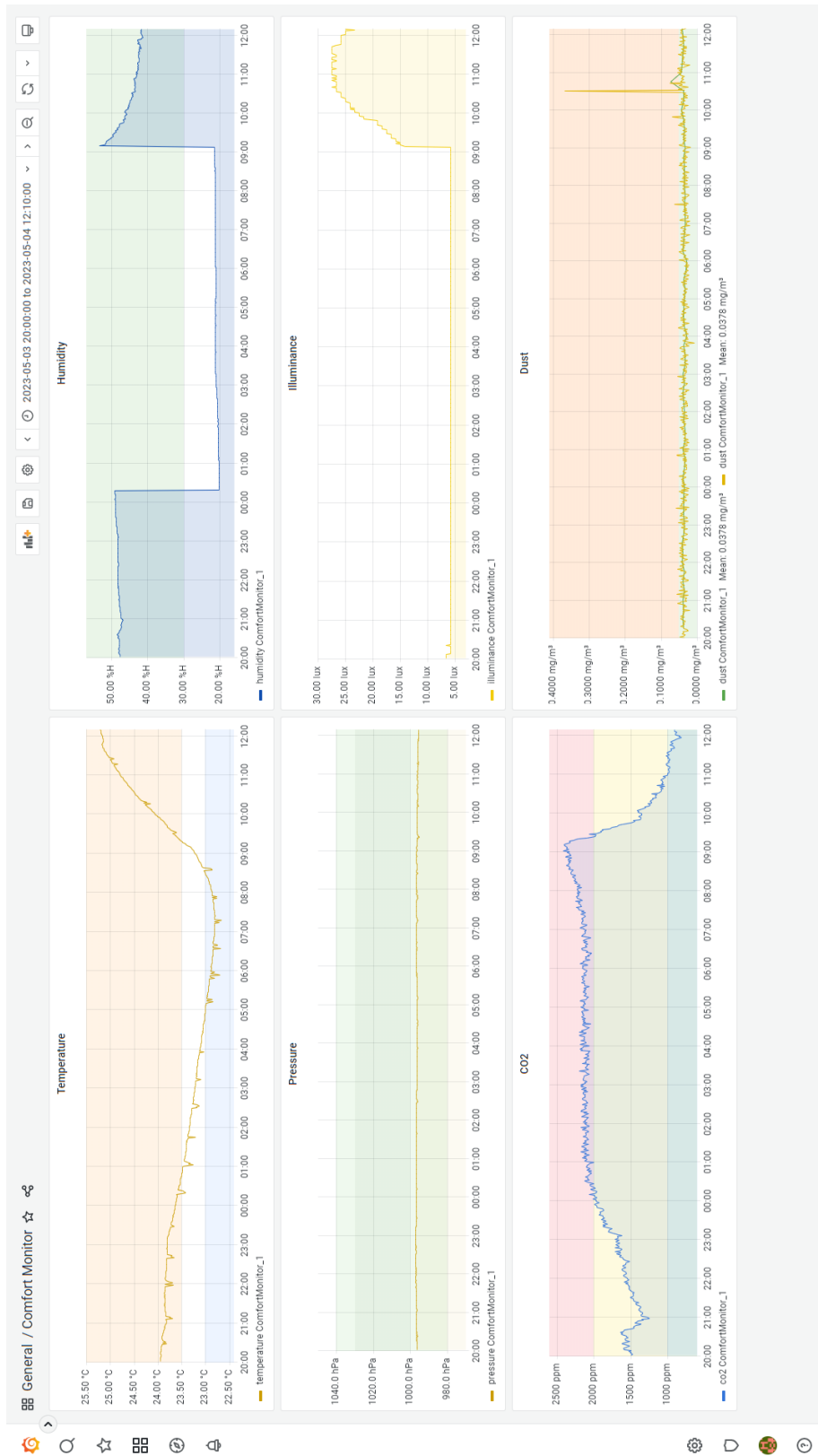
## Venkovní počasí

- **Ráno**
  - Jasno
  - 12 °C
  - 81 % relativní vlhkost
  - 1024 hPa
- **Odpoledne**
  - Jasno
  - 16 °C
  - 49 % relativní vlhkost
  - 1024 hPa
- **Večer**
  - Polojasno
  - 14 °C
  - 54 % relativní vlhkost
  - 1024 hPa

## Anotace událostí

- **20:47** – okno otevřené úplně
- **21:03** – zavření okna
- **23:26** – okno otevřené úplně
- **23:27** – zhasnutí světel
- **23:36** – okno otevřené na mikroventilaci
- **08:39** – roztažení závěsů oken
- **08:48** – okno otevřené na ventilaci
- **10:31** – restart zařízení
- **10:41** – pájení
- **11:12** – zavření okna
- **11:18** – konec pájení, připojeno na nabíjení, reset zařízení
- **14:10** – zapálení svíčky přibližně 30 cm od zařízení
- **15:00** – okno otevřené úplně
- **15:07** – pájení
- **15:22** – konec pájení, sfouknutá svíčka
- **15:36** – zavření okna, odpojeno nabíjení
- **18:45** – okno otevřené na ventilaci (2×)
- **19:28** – zavření okna
- **19:40** – restart zařízení
- **19:59** – rozsvícení světel

# D.2.5 Den 5



## **Venkovní počasí**

- **Ráno**
  - Jasno
  - 12 °C
  - 55 % relativní vlhkost
  - 1024 hPa

## **Anotace událostí**

- **20:34** – okno otevřené na ventilaci
- **20:57** – zavření okna
- **23:05** – zhasnutí světel
- **09:09** – restart zařízení
- **09:10** – roztažení závěsů oken
- **09:13** – okno otevřené na ventilaci
- **09:09** – ukončení měření



## E Obsah elektronické přílohy

/	kořenový adresář přiloženého archivu
├	pomocne_skripty.....skripty v jazyce Python
│	├ DataPlotter.py.....skript pro zpracování a vykreslení měřených dat
│	└ TestMeasurement_publisher.py ..... MQTT publisher pro měření dat
├	senzoricka_mereni.....naměřená senzorická data
│	├ 24h_mereni.csv
│	└ vicedenni_mereni.csv
├	software.....softwarové vybavení systému
│	├ ComfortMonitor ..... zdrojový kód měřicího zařízení
│	├ mqtt_publisher.py
│	└ mqtt_to_influxDB.py
├	DPS_spodni_vrstva.pdf ..... spodní vrstva desky plošného spoje
├	DPS_vrchni_vrstva.pdf.....vrchní vrstva desky plošného spoje
├	Elektricke_schema.pdf.....elektrické schéma senzorické DPS
├	Kryt_horni_cast.step ..... 3D model krytu měřicího zařízení (horní)
└	Kryt_spodni_cast.step.....3D model krytu měřicího zařízení (spodní)