

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Komunikační prostředky pro IoT

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vít ZÁRUBA**
Osobní číslo: **E16B0096P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Komunikační prostředky pro IoT**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

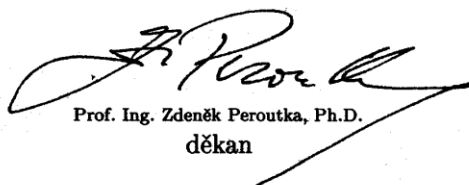
Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Zpracujte přehled komunikačních technologií a protokolů pro IoT a proveďte srovnání aktuálně dostupných modulů a komponent.


1. Charakterizujte pojem "Internet věcí" (IoT - Internet of Things) a klasifikujte obsah jeho infrastruktury.
2. Pro každou z komponent infrastruktury IoT uveďte klíčové vlastnosti a kritéria pro jejich použití.
3. Následně proveďte detailnější rozbor komunikační hierarchie IoT a popište její základní prvky, principy a vazby.
4. Podrobně specifikujte vlastnosti a možnosti komunikačních protokolů a technologií na všech úrovních IoT komunikace.
5. Proveďte rešerši aktuálně dostupných komunikačních modulů pro IoT a srovnajte jejich vlastnosti a možnosti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
<https://www.iot-portal.cz/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Krist, Ph.D.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na seznámení s problematikou technologií a protokolů internetu věcí. V první části je uvedení do internetu věcí, jejich základních prvků, požadovaných kritérií a topologií. V druhé části jsou popsány protokoly a technologie internetu věcí napříč ISO/OSI modelem s uvedením jejich základních vlastností. V závěrečné části je pro jednotlivé protokoly a technologie uveden přehled aktuálně dostupných komunikačních modulů od několika výrobců.

Klíčová slova

Internet věcí, IoT, IoT moduly, IoT protokoly, IoT technologie, topologie

Abstract

The bachelor thesis is focused on familiarization with the problems of technologies and protocols of the Internet of Things. The first part is an introduction to the Internet of Things, their basic elements required criteria and topologies. The second part describes the Internet of Things protocols and technologies across the ISO/OSI model with their basic features. In the final part, an overview of currently available communication modules from several manufacturers is provided for each protocol and technology.

Key words

Internet of things, IoT, IoT modules, IoT protocols, IoT technologies, topology

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.6.2019

Vít Záruba

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Kristovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	15
ÚVOD	16
1 IOT	17
1.1 KONKRÉTNÍ UPLATNĚNÍ IoT	17
1.2 STRUKTURA IoT SÍTĚ	19
1.2.1 <i>Senzory</i>	19
1.2.2 <i>Akční členy</i>	20
1.2.3 <i>Brána</i>	21
1.2.4 <i>Mikrokontroléry</i>	22
1.2.5 <i>Cloud</i>	22
1.3 VLASTNOSTI A KRITÉRIA	23
1.4 TOPOLOGIE IoT SÍTÍ	24
1.4.1 <i>Hvězda</i>	25
1.4.2 <i>Mesh</i>	25
1.4.3 <i>Strom</i>	26
1.5 ISO/OSI MODEL.....	26
2 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOLY A TECHNOLOGIE	28
2.1 SIGFOX	28
2.2 LoRa a LoRaWAN	29
2.3 IQRF.....	31
2.4 Z-WAVE.....	32
2.5 NB-IoT.....	33
2.6 6LoWPAN	34
2.7 ZIGBEE	35
2.8 BLUETOOTH 5 LOW ENERGY	36
2.9 MQTT	37
2.10 CoAP.....	38
2.11 SHRNUŤI.....	40
3 KOMUNIKAČNÍ MODULY	41
3.1 LoRa a LoRaWAN	41
3.1.1 <i>Semtech</i>	41
3.1.2 <i>RF Solutions</i>	42
3.1.3 <i>Murata</i>	42
3.1.4 <i>Microchip</i>	43
3.1.5 <i>STMicroelectronics</i>	44
3.2 SIGFOX.....	44
3.2.1 <i>NXP Semiconductors</i>	44
3.2.2 <i>STMicroelectronics</i>	45

3.2.3	<i>Atmel</i>	45
3.2.4	<i>ON Semiconductor</i>	46
3.2.5	<i>WiSOL</i>	46
3.2.6	<i>Murata</i>	47
3.3	IQRF	47
3.3.1	<i>MICRORISC</i>	47
3.4	Z-WAVE	49
3.4.1	<i>Silicon Laboratories</i>	49
3.5	NB-IOT	51
3.5.1	<i>Nordic Semiconductor</i>	51
3.5.2	<i>Quectel</i>	51
3.5.3	<i>u-blox</i>	52
3.6	6LOWPAN	52
3.6.1	<i>Integrated Device Technology</i>	52
3.6.2	<i>Atmel</i>	54
3.7	ZIGBEE	54
3.7.1	<i>Atmel</i>	54
3.7.2	<i>Silicon Laboratories</i>	54
3.7.3	<i>STMicroelectronics</i>	55
3.7.4	<i>Nordic Semiconductor</i>	56
3.8	BLUETOOTH 5 LOW ENERGY	56
3.8.1	<i>Toshiba</i>	56
3.8.2	<i>Nordic Semiconductor</i>	56
3.8.3	<i>Silicon Laboratories</i>	57
3.8.4	<i>STMicroelectronics</i>	58
3.9	POROVNÁNÍ	58
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	62
4	PŘÍLOHY	I

Seznam symbolů a zkratek

<i>3GPP</i>	3rd Generation Partnership Project (partnerský projekt třetí generace)
<i>6LoWPAN</i>	IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks (IPv6 přes bezdrátové osobní sítě s nízkým výkonem)
<i>AES</i>	Advanced Encryption Standard (pokročilý standard šifrování)
<i>aQFN</i>	Advanced Quad Flat No-lead package (pokročilé ploché čtvercové bezvývodové pouzdro)
<i>ARM</i>	Advanced RISC (Reduced Instruction Set Computer) Machine (vyspělý počítač s redukovanou instrukční sadou)
<i>ASK</i>	Amplitude Shift Keying (klíčování amplitudovým posuvem)
<i>BGA</i>	Ball Grid Array (mřížkové pole kuliček)
<i>BPSK</i>	Binary Phase Shift Keying (binární klíčování fázovým posuvem)
<i>CAN</i>	Controller Area Network (řadičová síť)
<i>CoAP</i>	Constrained Application Protocol (omezený aplikační protokol)
<i>CPU</i>	Central Processing Unit (centrální procesorová jednotka)
<i>CRC</i>	Cyclic Redundancy Check (cyklický redundantní součet)
<i>CSS</i>	Chirp Spread Spectrum (chirp rozprostřené spektrum)
<i>DBPSK</i>	Differential Binary Phase-Shift Keying (diferenciální binární klíčování fázovým posuvem)
<i>DPS</i>	Deska Plošných Spojů
<i>DSSS</i>	Direct Sequence Spread Spectrum (přímé sekvenčně rozprostřené spektrum)
<i>DTLS</i>	Datagram Transport Layer Security (zabezpečení datagramů transportní vrstvy)
<i>EEPROM</i>	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (elektricky vymazatelná programovatelná paměť pouze pro čtení)
<i>EPROM</i>	Erasable Programmable Read Only Memory (vymazatelná programovatelná paměť pouze pro čtení)
<i>EROM</i>	Erasable Read Only Memory (vymazatelná paměť pouze pro čtení)
<i>eSIM</i>	embedded Subscriber Identity Module (vestavěný modul identity účastníka)
<i>EUI-64</i>	Extended Unique Identifier-64 (rozšířený jednoznačný identifikátor)
<i>FEC</i>	Forward Error Correction (dopředná korekce chyb)

<i>FHSS</i>	Frequency Hopping Spread Spectrum (frekvenčně skákající rozprostřené spektrum)
<i>FSK</i>	Frequency Shift Keying (klíčování frekvenčním posuvem)
<i>GFSK</i>	Gaussian Frequency Shift Keying (Gaussovo klíčování frekvenčním posuvem)
<i>GPIO</i>	General Purpose Input/Output (univerzální vstup/výstup)
<i>GPS</i>	Global Positioning System (globální polohový systém)
<i>GSM</i>	Global System for Mobile communications (globální systém pro mobilní komunikace)
<i>HTTP</i>	HyperText Transfer Protocol (hypertextový přenosový protokol)
<i>I²C</i>	Inter-Integrated Circuit (I ² C sběrnice)
<i>I²S</i>	Inter-IC Sound (I ² S sběrnice)
<i>IaaS</i>	Infrastructure as a Service (infrastruktura jako služba)
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství)
<i>IETF</i>	Internet Engineering Task Force (pracovní skupina internetového inženýrství)
<i>IoT</i>	Internet of Things (internet věcí)
<i>IP</i>	Internet Protocol (internetový protokol)
<i>IPv6</i>	Internet Protocol version 6 (internetový protokol verze 6)
<i>ISM</i>	Industry, Scientific and Medical band (průmyslové, vědecké a lékařské pásmo)
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace pro standardizaci)
<i>ITU-T</i>	International Telecommunication Union – Telecommunication standardization sector (mezinárodní telekomunikační unie - sektor telekomunikační standardizace)
<i>LCC</i>	Leadless Chip Carrier (bezvývodový nosič čipu)
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display (displej z tekutých krystalů)
<i>LED</i>	Light Emitting diode (světlo emitující dioda)
<i>LGA</i>	Land Grid Array (mřížkové pole plošek)
<i>LIN</i>	Local Interconnect Network (místní propojovací síť)
<i>LLC</i>	Logical Link Control (řízení logického spoje)
<i>LPWAN</i>	Low Power Wide Area Network (nízkoenergetická rozlehlá síť)

<i>LTE</i>	Long Term Evolution (dlouhodobá evoluce)
<i>MAC</i>	Message Authentication Code (ověřovací kód zprávy)
<i>MEMS</i>	Micro Electro-Mechanical Systems (mikro elektromechanické systémy)
<i>MQTT</i>	MQ Telemetry Transport (MQ telemetrická doprava)
<i>MTU</i>	Maximum Transmission Unit (maximální přenosová jednotka)
<i>NAK</i>	Network Authentication Key (síťový ověřovací klíč)
<i>NB-IoT</i>	NarrowBand-Internet of Things (úzkopásmový internet věcí)
<i>NTC</i>	Negative Temperature Coefficient (negativní teplotní koeficient)
<i>OFDMA</i>	Orthogonal Frequency Division Multiple Access (ortogonální frekvenční dělení s vícenásobným přístupem)
<i>OOB</i>	Out Of Band (mimo pásmo)
<i>O-QPSK</i>	Offset Quadrature Phase Shift Keying (ofsetové kvadrurní klíčování fázovým posuvem)
<i>OSI</i>	Open Systems Interconnection (propojení otevřených systémů)
<i>PaaS</i>	Platform as a Service (platforma jako služba)
<i>PTC</i>	Positive Temperature Coefficient (pozitivní teplotní koeficient)
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
<i>QFN</i>	Quad Flat No-lead package (ploché čtvercové bezvývodové pouzdro)
<i>QoS</i>	Quality of Service (kvalita služby)
<i>QPSK</i>	Quadrature Phase Shift Keying (kvadrurní klíčování fázovým posuvem)
<i>QR</i>	Quick Response (rychlá reakce)
<i>RAM</i>	Random Access Memory (volně přístupná paměť)
<i>RF</i>	Radio Frequency (radiofrekvenční)
<i>RFC</i>	Request For Comments (žádost o komentáře)
<i>ROM</i>	Read Only Memory (paměť pouze pro čtení)
<i>SaaS</i>	Software as a Service (software jako služba)
<i>SC-FDMA</i>	Single Carrier-Frequency Division Multiple Access (samostatná nosná-frekvenční dělení s vícenásobným přístupem)
<i>SIM</i>	Subscriber Identity Module (modul identity účastníka)
<i>SiP</i>	System in a Package (systém v jednom pouzdře)
<i>SoC</i>	System on a Chip (systém na jednom čipu)
<i>SOT</i>	Small Outline Transistor (tranzistor malého obrysu)
<i>SPI</i>	Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)

<i>SSL</i>	Secure Sockets Layer (vrstva zabezpečených socketů)
<i>TCP</i>	Transmission Control Protocol (protokol pro řízení přenosu)
<i>TLS</i>	Transport Layer Security (zabezpečení transportní vrstvy)
<i>UDP</i>	User Datagram Protocol (uživatelský datagramový protokol)
<i>UNB</i>	Ultra Narrow Band (ultra úzké pásmo)
<i>UQFN</i>	Ultra thin Quad Flat No-lead package (extrémně tenké ploché čtvercové bezvývodové pouzdro)
<i>USART</i>	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter (univerzální synchronní / asynchronní přijímač a vysílač)
<i>USB</i>	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
<i>UTF-8</i>	Unicode Transformation Format-8 (formát transformace Unicode-8)
<i>VPN</i>	Virtual Private Network (virtuální soukromá síť)
<i>VQFN</i>	Very thin Quad Flat No-lead package (velice tenké ploché čtvercové bezvývodové pouzdro)
<i>WiFi</i>	Wireless Fidelity (bezdrátová věrnost)
<i>WLCSP</i>	Wafer Level Chip Scale Package (pouzdro velikosti čipu na úrovni substrátu)

Seznam obrázků a tabulek

OBR. 1 STRUKTURA IoT SÍTĚ.....	19
OBR. 2 TOPOLOGIE IoT SÍTĚ.....	26
OBR. 3 ISO/OSI MODEL	27
OBR. 4 ARCHITEKTURA SIGFOX SÍTĚ [23].....	29
OBR. 5 ARCHITEKTURA LoRAWAN SÍTĚ [25]	30
OBR. 6 ARCHITEKTURA IQRf SÍTĚ [34]	31
OBR. 7 PROVOZNÍ REŽIMY NB-IoT	34
OBR. 8 6LoWPAN PROTOKOLOVÝ ZÁSOBNÍK	35
OBR. 9 MQTT ARCHITEKTURA.....	38
OBR. 10 STRUKTURA CoAP ZPRÁVY.....	40
OBR. 11 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA QFN-24.....	I
OBR. 12 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA BGA-64	II
OBR. 13 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA QFN-48.....	III
OBR. 14 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA QFN-32.....	IV
OBR. 15 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA SIP-38	V
OBR. 16 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA LGA-64.....	VI
OBR. 17 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA QFN-56.....	VII
OBR. 18 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA LGA-127.....	VIII
OBR. 19 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA S 54 LCC PINY A S 40 LGA PINY	VIII
OBR. 20 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA LGA-96.....	IX
OBR. 21 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA LGA-30.....	X
OBR. 22 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA LGA-32.....	X
OBR. 23 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA LGA-43.....	XI
OBR. 24 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA KON-SIM-02.....	XII
OBR. 25 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA QFN-40.....	XII
OBR. 26 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA QFN-68.....	XIII
OBR. 27 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA BGA-125	XIV
OBR. 28 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA AQFN-73.....	XV
OBR. 29 VÝKRES A ROZMĚRY POUZDRA WLCSP-93	XV
TAB. 1 SHRNUÍ PARAMETRŮ IoT TECHNOLOGIÍ	40

Úvod

Předkládaná bakalářská práce rozdělená na tři hlavní kapitoly je zaměřena na současně dostupné bezdrátové technologie internetu věcí s nízkým odběrem elektrické energie, nižšími přenosovými rychlostmi a dosažitelnou komunikační vzdáleností od několika metrů do desítek kilometrů.

První kapitola uvádí čtenáře do problematiky internetu věcí s uvedením několika konkrétních uplatnění v praxi pro lepší představu využitelnosti. Následně je uvedena struktura sítě internetu věcí a jsou popsány jednotlivé prvky v ní obsažené, tj. senzory, akční členy, brány, mikrokontroléry a cloud. Pro výběr vhodné technologie a komunikačního modulu respektive čipu jsou uvedeny nejdůležitější vlastnosti a kritéria, která bychom měli při výběru vzít v potaz. Použití technologií pro různé účely vyžaduje odlišné topologie sítí, aby byl pokryt požadovaný objekt či oblast, a proto jsou uvedeny nejběžněji používané topologie. Každá technologie definuje několik vrstev s tím, že funkce každé jednotlivé vrstvy je definována v ISO/OSI modelu.

V následující kapitole jsou na základě rešerše uvedeny nejrozšířenější a nejpoužívanější aktuálně dostupné bezdrátové komunikační technologie internetu věcí. Pro každou technologii jsou zmíněny jejich základní vlastnosti a kritéria uvedené v předchozí kapitole.

Poslední kapitola je věnována komunikačním modulům a čipům pro jednotlivé technologie s uvedením jejich základních funkcí.

1 IoT

Internet věcí (anglicky Internet of Things, zkráceně IoT) je technologie skládající se ze zařízení, která ovlivňují své chování a komunikují mezi sebou pomocí komunikačních protokolů (či standardů) obecně používaných anebo speciálně vyvinutých pro IoT aplikace. Tato komunikace je ve většině případů bezdrátová a uplatňuje se v různých odvětvích. Uplatnění najde např. v domácnostech, městech, dopravních prostředcích, zemědělství, zdravotnictví, průmyslu a energetice. Tato zařízení produkují velké množství dat, která je potřeba efektivně využít, a proto jsou odesílána skrze brány (gateway) do cloudu, kde jsou dále zpracovávána a poskytována uživateli. Uživatel tak může dálkově sledovat a ovládat zařízení připojená do této sítě pomocí uživatelských aplikací pro počítač, tablet či mobilní telefon.

1.1 Konkrétní uplatnění IoT

Technologie IoT nachází uplatnění v nepřeberném množství oblastí, jako jsou například níže uvedené konkrétní příklady.

- **Chytré parkování**

Každé město řeší problém s parkováním a volnými parkovacími místy. Tento problém lze vyřešit tzv. chytrým parkováním, kdy je sledováno v reálném čase obsazení parkovacích míst a veřejnost je o stavu informována skrze mobilní aplikaci, internetovou stránku anebo informační tabule umístěné v okolí parkoviště. Informaci o obsazenosti konkrétního parkovacího místa získáváme z magnetických detektorů umístěných pod jednotlivými parkovacími místy. Detektory snímají změny geomagnetického pole, což umožňuje pomocí speciálních algoritmů identifikovat přítomnost respektive nepřítomnost vozidla. Přenos dat od detektorů ke kolektorům může být zajištěn pomocí sítí IQRF, SIGFOX anebo LoRa. Z kolektorů se data odesílají pomocí GSM (Global System for Mobile communications) sítě do cloudu, kde jsou zpracována a vyhodnocena.[2]

- **Kvalita vzduchu**

Kvalita vzduchu v místnosti je důležitá pro soustředění a únavu lidského organismu. Monitorováním kvality vzduchu v místnosti lze docílit toho, abychom včas vyvětrali anebo

se spustila rekuperační jednotka a nebyli tak unavení a nesoustředění. Senzory dlouhodobě sledují koncentraci oxidu uhličitého CO₂, relativní vlhkost a teplotu v místnosti. Naměřená data jsou odesílána do základnových stanic pomocí sítě SigFox, ze kterých jsou dále odesílána do cloudu.[3]

- **Odečet vodoměru**

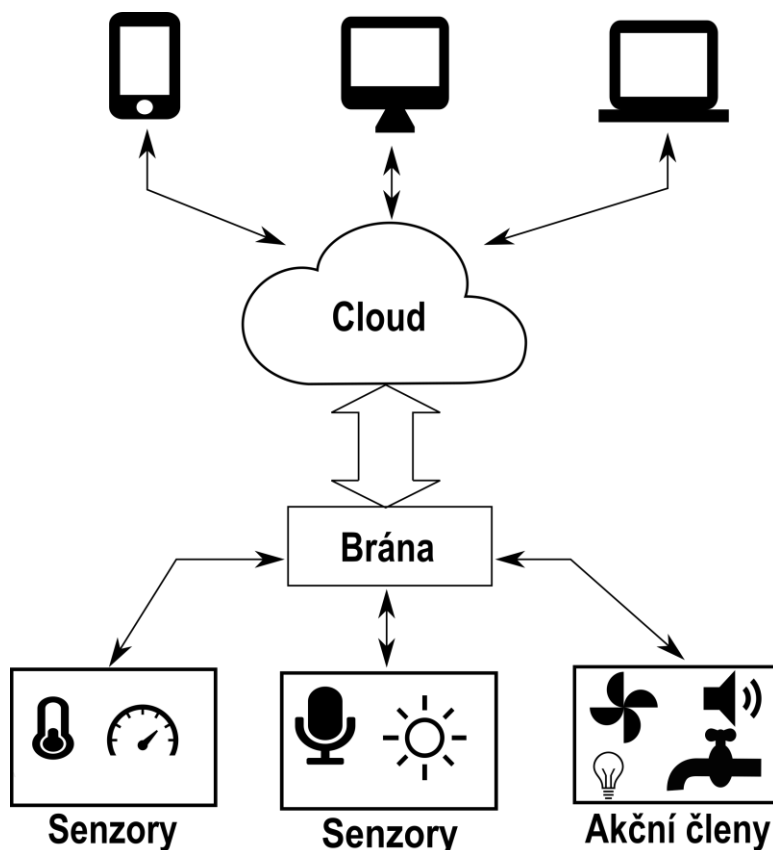
Odečet vodoměru v bytě, domě či průmyslovém objektu je komplikován jednak jeho umístěním, a také přístupem k němu v daném čase. Dálkový odečet vodoměru lze realizovat instalací odečtové hlavy s komunikačním modulem na stávající vodoměr. Odečtová hlava umožňuje odečíst všechny dostupné veličiny a odeslat je pomocí sítě SigFox nebo LoRa do cloudu. Pokud selže odečet dat pomocí IoT sítí, lze je vyčíst skrze mobilní odečtový přijímač pochůzkou či pojezdem v blízkosti vodoměru. Mobilní odečtový přijímač se propojí využitím Bluetooth s telefonní aplikací, v které se zobrazí odečtená data a lze z ní také konfigurovat komunikační modul.[4]

- **Varování před tsunami**

V oblastech, kde je častý vznik vln tsunami je potřeba varovat obyvatele postižených oblastí o blížícím se nebezpečí. V moři anebo oceánu jsou umístěny bóje (základnové stanice), které vysílají do cloudu naměřená data od podvodních senzorů. Senzory snímají teplotu, zrychlení a tlak v pravidelných časových intervalech. Naměřené hodnoty jsou pomocí RF (Radio Frequency) modulu odesílány do základnové stanice. Ze základnové stanice jsou naměřené hodnoty přenášeny prostřednictvím GSM sítě.[5]

1.2 Struktura IoT sítě

Síť IoT se skládá z několika základních prvků (bloků), kterými jsou koncová zařízení (senzory, akční členy, atd.), brány (gateway), které obsahují jednu z klíčových součástí a to mikrokontroléry, dále pak cloud a uživatelské aplikace.



Obr. 1 Struktura IoT sítě

1.2.1 Senzory

Senzor je zařízení snímající danou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu, kterou následně převádí na dále přenositelnou a zpracovatelnou veličinu. Snímané veličiny ovlivňují jeho elektrické vlastnosti nebo chování. Nejčastěji se převádí na elektrické veličiny (napětí nebo proud), méně často na optické. Poskytují informaci o stavu technologického procesu, stroje nebo prostředí, díky čemuž je lze řídit, regulovat, sledovat a zabezpečit požadovanou činnost. Obvykle se skládá ze snímacího, napájecího a komunikačního modulu. Ideálně by neměl vůbec ovlivňovat měřenou veličinu, což lze v některých případech zajistit miniaturizací senzorů vyráběných technologií MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems).

Pasivní senzor mění působením neelektrických veličin své parametry (indukčnost, kapacitu, odpor, vodivost) a pro vyhodnocení změn je potřeba zdroj elektrické energie. Změna parametrů je převedena na analogový signál (napětí nebo proud), u kterého se měří jeho amplituda, fáze, frekvence, atd. Například zapojením NTC (Negative Temperature Coefficient) nebo PTC (Positive Temperature Coefficient) termistoru do můstku je při určité hodnotě odporu můstek vyvážen a diagonálou neteče žádný elektrický proud, ale při změně odporu termistoru vlivem teploty začne proud protékat. Každá amplituda (záporná či kladná) protékajícího proudu je tedy úměrná určité teplotě.

Aktivní senzor se působením snímané veličiny chová jako zdroj elektrické energie. Jejich princip je založen na fyzikálních jevech, kterými jsou např. termoelektrický, fotoelektrický, piezoelektrický, elektrochemický, atd.

Dostupné senzory: polohy, pohybu, posunu, rychlosti, zrychlení (akcelerometry), gyroskop, vibrací, mechanického napětí (tenzometry), síly, hmotnosti, momentu síly (u rotačního pohybu kroutícího momentu), tlaku, hustoty a viskozity kapalin, průtoku kapalin, vlhkosti, hladiny, tepla, teploty, plynů a ionizujícího záření, elektrického proudu, napětí, výkonu, náboje, intenzity elektrického a magnetického pole, intenzity hluku, osvětlení, tepelného záření a mnoho dalších.

1.2.2 Akční členy

Plní opačnou funkci než senzor, tzn. elektrická nebo optická veličina je přeměněna na veličinu, která ovlivňuje okolní prostředí. Na základě dat ze senzorů, která jsou zpracována a vyhodnocena, podnětu od uživatele či předem naplánovaných úkonů, jsou řízeny akční členy. Provedení může být samostatné nebo kombinované, kdy je součástí i senzor, např. LED žárovka s PIR senzorem. Lze je rozdělit do dvou skupin, a to na pohony a regulační členy. Pohony dělíme podle energie, která koná práci na:

- elektrické (motory, servomotory)
- pneumatické (písty, pneumotory)
- hydraulické (písty, hydromotory)
- mechanické (šnekový, hřebenový převod)

Dále podle pohybu výstupní části pohonu na:

- posuvné (píst),
- rotační (motor),

- kyvné (kulisový mechanismus)

Regulační členy slouží k regulaci toku hmoty, plynu nebo energie (kapaliny, plyny, sypké materiály, elektrický proud, magnetický tok, atd.). Patří mezi ně ventily, kohouty, klapky, šoupátka. Příkladem akčních členů mohou být různé motory, servomotory, topení, chlazení, zdroj světla, stykače, stmívače, atd.

1.2.3 Brána

Vzhledem k tomu, že jedním z nejdůležitějších parametrů senzorů a obecně koncových zařízení je jejich nízký odběr elektrické energie, nemohou pracovat s energeticky náročnými protokoly, jako jsou např. WiFi (Wireless Fidelity) nebo Ethernet. Dalším důvodem použití brány (gateway, základnové stanice) je různorodost komunikačních protokolů senzorů a akčních členů. Brána tedy umožňuje komunikaci senzorů a akčních členů s cloudem, přičemž tato zařízení pracují v různých sítích s odlišnými protokoly (např. WiFi, Ethernet, Bluetooth, Zigbee, Sigfox, LoRa), které jsou odlišně energeticky náročné. Může také shromažďovat, předběžně zpracovávat a analyzovat data ze senzorů, akčních členů a dalších zařízení, která jsou k ní připojena. To je výhodné, pokud máme připojené velké množství senzorů a akčních členů generující velké množství dat, protože nedochází k přetěžování přenosového kanálu mezi cloudem a bránou a není potřeba tak vysoká kapacita kanálu. Všechna data nejsou potřebná anebo mohou být v bráně dočasně uložena a zpracována později. Další funkce je zabezpečení a šifrování komunikace, aktualizace firmwaru připojených zařízení a jejich konfigurace. Její provedení může být v podobě základnových stanic nebo interiérových bran. Základnové stanice jsou obvykle umístěny na vysílačích mobilních operátorů či výškových budovách, a pokrývají tak okolní oblast do vzdálenosti několika kilometrů. V tomto provedení jsou především určeny pro technologie, které mohou spolehlivě komunikovat na vzdálenost několika kilometrů. Výhodou jsou nulové pořizovací náklady zařízení, platí se pouze poskytovateli za využití jeho služby. Interiérové brány jsou především určeny pro technologie, které mohou spolehlivě komunikovat na pár desítek či stovek metrů anebo pro případ, že nechceme platit poplatky poskytovateli služeb jako je tomu u základnových stanic.

1.2.4 Mikrokontroléry

Díky miniaturizaci, nízkým pořizovacím nákladům a nízké spotřebě elektrické energie jsou mikrokontroléry základem všech IoT zařízení, které jsou jejich mozkem a řídí veškerou jejich činnost. Miniaturizují, zlevňují a zjednodušují výsledné elektronické zapojení na DPS, a proto není potřeba použít několika integrovaných obvodů a spoustu diskrétních součástek. Má sice složitější vnitřní elektronické zapojení na čipu, ale díky masové výrobě se pořizovací náklady stále snižují. Mikrokontrolér obvykle obsahuje na jednom čipu procesor, paměti a periferní obvody. Konkrétněji sestává z jednoho nebo více procesorových jader, operační paměti pro čtení a zápis dočasných dat (obvykle typu RAM), programové paměti (dříve typu ROM a EPROM, dnes EEPROM a FLASH), vstupně-výstupních pinů softwarově nastavitelných pro získávání dat ze snímačů anebo pro vysílání dat k akčním členům (GPIO), analogově-digitálního a digitálně-analogového převodníku, hodinového generátoru (krystal, RC obvod), časovače (např. watchdog), čítače, řadiče, PWM generátoru, portů pro sériovou a paralelní komunikaci (USART, SPI, I²C, USB, atd.) a další obvody podle požadavků pro konkrétní aplikaci.

1.2.5 Cloud

Cloud může sloužit jak k ukládání, zpracování a analýze přijatých dat od senzorů a akčních členů, která jsou od nich přenesena prostřednictvím brány a příslušných protokolů, tak i zároveň k jejich řízení, konfiguraci a spouštění. Výhodou je, že zařízení, ze kterého se připojujeme na cloud, nemusí být tak výkonné, jako kdybychom spouštěli daný program přímo na něm. Plně postačuje výkon pro spuštění a provoz internetového prohlížeče či programu pro přístup ke cloudu. Připojení ke cloudu je možné prakticky odkudkoliv a kdykoliv na světě, kde je k dispozici internetové připojení. Z ekonomického hlediska je to mnohem úspornější řešení, než kdybychom zakoupili hardware a platili licence pro dané programy a provozovali tak své vlastní datové úložiště. Zde platíme pouze za to, kdy a jak jsme službu skutečně využívali, což v případě vlastního datového úložiště a programů není možné a musíme platit za spotřebu elektrické energie a programové licence i v době, kdy je nevyužíváme. Ač se může na první pohled zdát, že bezpečnost je nižší, než pokud bychom provozovali vlastní řešení, není tomu tak, protože provozovatel cloudu má obvykle více finančních prostředků a specialistů pro řešení této problematiky, než firma či soukromá osoba. Nevýhodou může být závislost na internetovém připojení a poskytovateli

cloudových služeb, který určuje, jaký software a hardware a které jejich verze jsou k dispozici.

Existují různé podoby cloudových služeb. Těmi základními jsou IaaS (Infrastructure as a Service), PaaS (Platform as a Service) a SaaS (Software as a Service).

- **IaaS:** Poskytuje zpracování, ukládání, síť, hardware a další výpočetní zdroje, kam je možné zavést a provozovat jakýkoliv software, který může zahrnovat operační systémy a aplikace. Nelze spravovat ani ovládat základní infrastrukturu cloudu, ale lze mít kontrolu nad operačními systémy, ukládáním, zavedenými aplikacemi a také omezeně nad vybranými síťovými prvky (např. hostitelské firewally). Příklady IaaS jsou: Microsoft Azure, Amazon WS, Oracle Cloud Infrastructure atd.
- **PaaS:** Poskytuje zavedení aplikací na cloud vytvořených nebo získaných uživatelem, které jsou vytvořeny pomocí programovacích jazyků, knihoven, služeb a nástrojů podporovaných poskytovatelem. Nelze spravovat ani ovládat základní infrastrukturu cloudu, včetně sítě, serverů, operačních systémů nebo úložišť, ale lze kontrolovat zavedené aplikace, případně nastavení hostujícího prostředí aplikací. Příklady PaaS jsou: Oracle Cloud Platform, Google App Engine atd.
- **SaaS:** Poskytuje uživateli použití aplikací poskytovatele provozovaných v cloudu. Aplikace jsou přístupné z různých zařízení prostřednictvím internetového prohlížeče nebo programu. Nelze spravovat ani kontrolovat infrastrukturu cloudu, včetně sítě, serverů, operačních systémů, úložišť nebo schopností aplikací. Výjimečně je možné omezeně měnit nastavení aplikací, které je specifické pro daného uživatele. Příklady SaaS jsou: Google Apps, Oracle SaaS atd.

1.3 Vlastnosti a kritéria

Pro komunikační moduly je nejdůležitějším kritériem odběr elektrické energie. Je snaha o dosažení co nejnižšího odběru, ať už z důvodu nemožnosti připojení stálého zdroje elektrické energie anebo umístění daného komunikačního modulu (např. pod povrchem parkovacího místa či jinak těžko přístupném místě) tam, kde nelze často měnit nebo dobíjet (např. pomocí solárních panelů) napájecí akumulátory. Nejnižšího odběru lze docílit správným výběrem komunikačního protokolu, protože každý je odlišně energeticky náročný, vzhledem k přenášeným objemům dat a vzdálenosti, po které je komunikace provozována. Dále záleží na pracovním režimu mikrokontroléru a tedy i celého

komunikačního modulu, protože v každém režimu se jeho odběr elektrické energie liší. U většiny dnes dostupných mikrokontrolérů je na výběr z více režimů spánku. V těchto režimech je přesně definována doba probuzení a také, které periferie jsou aktivovány či deaktivovány. Vyšší taktovací frekvence jádra mikrokontroléru také zvyšuje odběr elektrické energie. U komunikačních modulů postačuje nižší taktovací frekvence vzhledem k vykonávaným operacím, kdežto u bran vykonávajících ve srovnání s komunikačními moduly mnohem více operací, je potřeba vyšší taktovací frekvence. Vysílací výkon a citlivost přijímače, a tedy i četnost odesílání a přijímání informací, hraje také důležitou roli ve spotřebě. Vysílací výkon je při výběru také důležitý parametr, protože díky němu dosahujeme požadovaných komunikačních vzdáleností. Citlivost přijímače udává, jaký nejnižší výkon signálu lze přijímačem bezztrátově rozpoznat a zpracovat, což také souvisí s dosažitelnou komunikační vzdáleností. Důležité je také vybavení komunikačního modulu, tzn. konektivita (SPI, I²C, USART, USB, atd.) pro další periferie, A/D a D/A převodníky, časovače a čítače, komparátory atd.

Při výběru komunikačního protokolu, respektive technologie, se zaměřujeme na následující parametry. Vzdálenost, po které chceme komunikaci provozovat. V jakém prostředí bude komunikace probíhat, např. v zástavbě, ve volném prostředí, uvnitř budov či v průmyslových halách. S tím souvisí podporované topologie zapojení zařízení v síti. Kolik dat potřebujeme síť přenášet, jakou přenosovou rychlostí, a jak často za den má komunikace probíhat. Jestli je nutná schopnost obousměrné komunikace anebo postačuje pouze jednosměrná komunikace, zpravidla od koncových zařízení k bráně. Jestli komunikace probíhá v licencovaném (GSM, LTE) či bezlicenčním (ISM pásmo: 868 MHz; 2,4 GHz a 5 GHz) frekvenčním pásmu. Jaké zabezpečení poskytuje anebo jestli je možnost implementovat vlastní řešení zabezpečení. Jestli může být koncové zařízení pro úspěšnou komunikaci pohyblivé či statické. Odolnost vůči rušení od okolních radiofrekvenčních zařízení, což souvisí s použitou modulací.

1.4 Topologie IoT sítí

Topologie popisuje uspořádání jednotlivých zařízení připojených do sítě. Její podoba může být reprezentována jak logicky, tak fyzicky. Fyzická topologie popisuje skutečné umístění daných zařízení v síti, jejich vzájemné propojení, druh a uspořádání propojovacího média. Logická topologie určuje, jak jsou data sítí přenášena a kudy se

přenášejí mezi jednotlivými zařízeními, bez ohledu na jejich fyzické propojení. Nemusí tedy nutně znamenat, že logická topologie přesně odpovídá té fyzické (např. síť má fyzickou topologii mesh, ale díky logické topologii může pracovat jako hvězda). V IoT sítích je používáno více topologií, a to z důvodu jejich výhod, ale i nevýhod pro dané uplatnění. Nejběžnější z nich je mesh a její různé podoby, strom či hvězda.

1.4.1 Hvězda

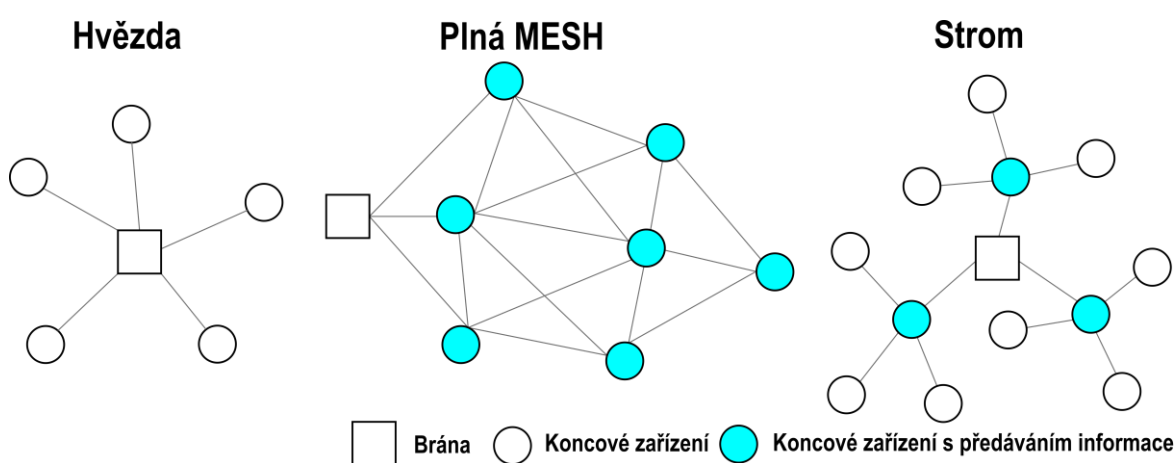
Tato topologie je jednou z nejpoužívanějších v IoT. Každé koncové zařízení je připojeno k bráně, skrz kterou se přenáší všechna data do cloudu nebo mezi jednotlivými koncovými zařízeními. V této topologii lze obecně dosáhnout vyšších přenosových rychlostí, než u mesh topologie, protože zpráva se přenáší přímo, nikoliv přes několik dalších koncových zařízení. Pokud jednotlivá koncová zařízení přestanou fungovat, nezpůsobí to nemožnost či omezení komunikace ostatních, jako je tomu u jiných topologií. Jednodušší je zde i identifikace a lokalizace vadného koncového zařízení. Nevýhodou může být to, že pokud selže brána, všechna koncová zařízení ztratí připojení a nelze tak komunikovat s okolním světem. To může být částečně vyřešeno připojením koncových zařízení na více bran anebo ukládáním dat do interní paměti, aby nedošlo ke ztrátě potřebných dat.

1.4.2 Mesh

Topologie mesh je méně používaná, protože je náročnější na vybudování, údržbu a přenos dat v ní. Výhodou je její robustnost, vysoká hustota koncových zařízení a možnost přenášet vysoké objemy dat. Vyskytují se zde tři typy zařízení, a to konkrétně brána, koncová zařízení a koncová zařízení s možností opakování, respektive směrování dat. Data se přenáší směrováním, kdy je cesta pevně stanovena, anebo rozesíláním po celé síti. Díky tomuto pak brána přijímá redundantní data, což zvyšuje spolehlivost doručení, ale také nároky na její výkon. Pokud selže jedno koncové zařízení, nutně to neznamená výpadek sousedních zařízení. Komunikace se může přesměrovat jinou cestou, která tak ale bude více vytížená. Nevýhodou je pomalejší přenosová rychlost, která je velice závislá na počtu zařízení skrz, která jsou data přenášena.

1.4.3 Strom

Topologie strom je nejméně používaná a je kombinací hvězdicové a sběrnice topologie. Je to spojení více hvězdicových sítí s jinými hvězdicovými sítěmi. Výhodou je jednoduchá správa této sítě, protože je rozdělena na několik menších podsítí a dobrá škálovatelnost. Pokud selže spojení jednotlivých koncových zařízení se směrovačem v podsíti, nijak to neovlivní chod zbytku celé sítě. Naopak, pokud selže spojení mezi podsítí a hlavní bránou, tak jednotlivé podsítě mezi sebou nemohou komunikovat a může dojít k selhání celé sítě. Využití najde především v rozsáhlých sítích o velkém počtu zařízení (např. propojení několika výrobních hal s vysokým počtem koncových zařízení).



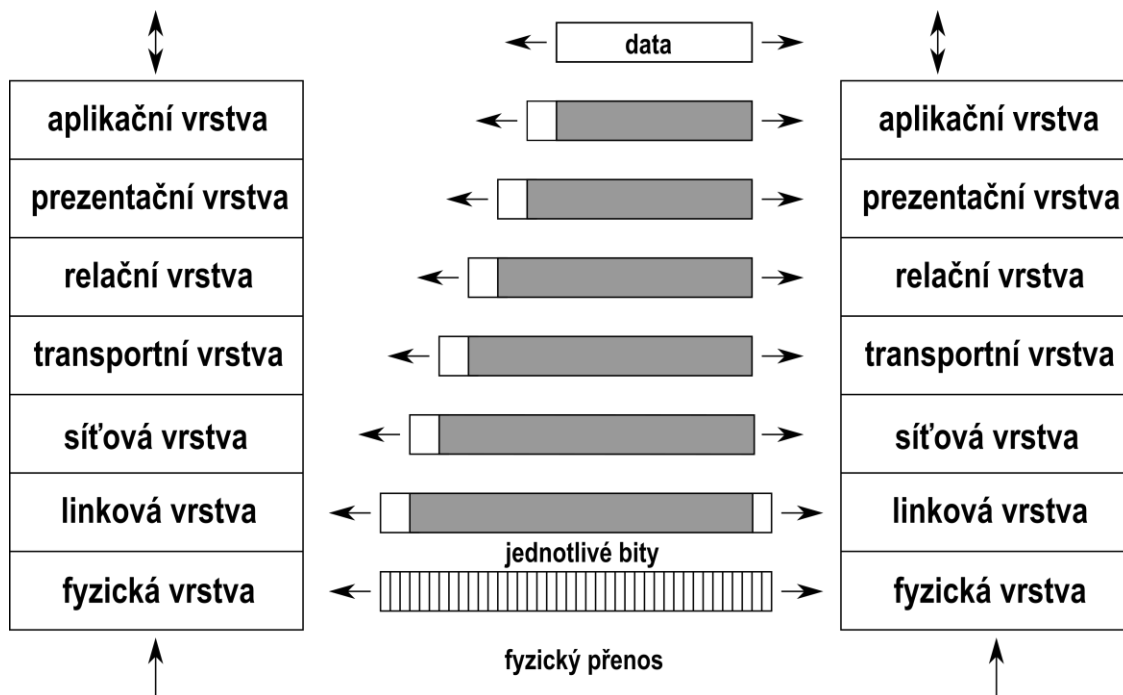
Obr. 2 Topologie IoT sítí

1.5 ISO/OSI model

Referenční model ISO/OSI byl vytvořen organizací ISO z důvodu snahy o standardizaci počítačových sítí zvaných OSI (Open Systems Interconnection). Díky tomuto modelu je možné zařízení používané v jedné síti provozovat bezproblémově i v jiných sítích, což předtím nebylo možné. Bylo definováno 7 vrstev, kde každá z nich zajišťuje přesně vymezené funkce.

- **Fyzická vrstva:** Zajišťuje přenos jednotlivých bitů mezi příjemcem a odesílatelem prostřednictvím fyzické či bezdrátové cesty. Definuje parametry, jako jsou: napěťové úrovně přenášeného signálu, tvar a frekvenci signálu, frekvenční spektrum režim přenosu, typ přenosového média, jaké signály jsou přenášeny, kódování, modulaci, specifikace kabelů a konektorů, sériový či paralelní přenos dat, synchronní či asynchronní přenos dat, přenos v základním či přeloženém pásmu, atd.

- **Linková vrstva:** Uspořádává data do datových bloků (tzv. rámců) a zajišťuje jejich bezchybný přenos a to pouze mezi sousedícími zařízeními s přímým spojením. K datům z vyšší vrstvy přidává fyzickou adresu odesílatele a příjemce, značky oddělující rámce a CRC kód. Rozpoznává a opravuje chyby přenášených dat, určuje metodu přístupu k přenosovému médiu (deterministické nebo stochastické), řídí tok dat. Může mít další dvě podvrstvy, MAC a LLC.
- **Síťová vrstva:** Zajišťuje přenos dat mezi nesousedícími zařízeními bez přímého spojení. Provádí směrování a adresování paketů, a proto musí znát skutečnou topologii sítě.
- **Transportní vrstva:** Díky linkové vrstvě se transportní vrstvě jeví, že všechna zařízení spolu mají přímé spojení. Zajišťuje rozdělení dat do paketů, a po příjmu zase jejich správné seřazení.
- **Relační vrstva:** Zajišťuje navazování, udržování, ukončování a řízení průběhu relací. Při přerušení spojení zařídí jeho obnovení a synchronizaci.
- **Prezentační vrstva:** Zajišťuje šifrování dat pro přenos, jejich kompresi, kódování či konverzi do určitého formátu.
- **Aplikační vrstva:** Poskytuje aplikacím přístup do prostředí sítě a funguje tedy jako jakási brána mezi zařízeními, které si chtějí mezi sebou vyměňovat data.



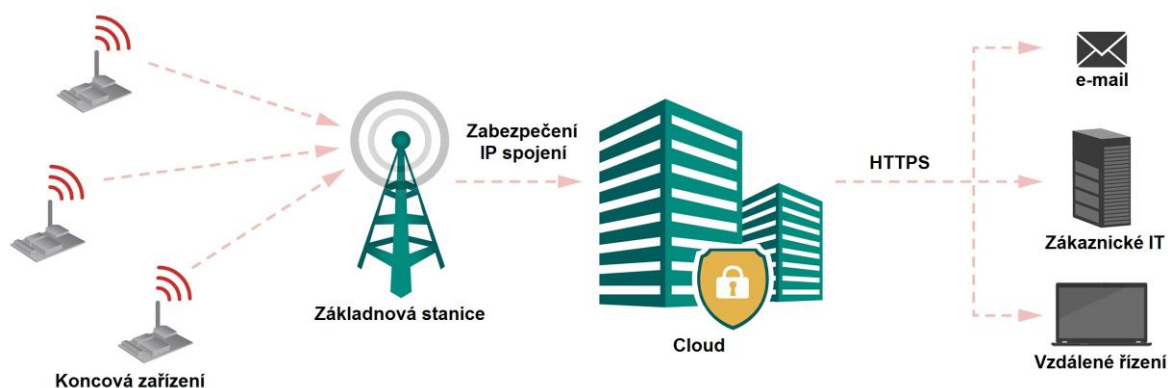
Obr. 3 ISO/OSI model

2 Komunikační protokoly a technologie

2.1 SigFox

Sigfox je LPWAN (Low Power Wide Area Network) síť, která využívá ultra úzkopásmový (UNB – Ultra Narrow Band) kanál pro obousměrnou komunikaci. Tato síť má nízkou spotřebu elektrické energie a velký dosah (až 50 km), což je ale vykoupeno malým objemem přenášených dat. Celoplošně je síť základnových stanic vybudována ve Francii, Španělsku, Velké Británii, Německu, České Republice, Slovensku a další evropské i mimo evropské státy jsou postupně pokrývány. Pro přenos je využíváno 868 MHz ISM (Industry, Scientific and Medical) frekvenční pásmo pro Evropu a 915 MHz pásmo pro USA, kde Sigfox využívá šířku frekvenčního pásma 192 kHz a jednotlivá zpráva zabírá šířku 100 Hz. Přenosová rychlost uplink zprávy je v Evropě 100 bit/s a v USA 600 bit/s s velikostí užitečných dat maximálně 12 bajtů. Každý uplink je vyslán třikrát v různých sobě jdoucích časových intervalech a na různých frekvencích a jejich počet je omezen na 140 za den. Uplink zpráva je modulována digitální modulací DBPSK (Differential Binary Phase-Shift Keying), která není energeticky náročná, má malé nároky na šířku frekvenčního pásma a je odolná vůči rušení. Pro downlink zprávu je přenosová rychlost pro Evropu i USA 600 bit/s a velikost užitečných dat je maximálně 8 bajtů. Downlink zpráva může být vyslána v daném časovém intervalu po přijetí uplink zprávy a jejich počet je omezen na maximálně 4 za den. Pro modulaci downlink zprávy je použita digitální modulace GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Sigfox využívá hvězdicové topologie sítě. Pracuje na fyzické, síťové, MAC (Message Authentication Code) a aplikační vrstvě, kde první dvě vrstvy slouží k výběru frekvence, úrovně vysílacího výkonu, modulace, vložení a vyjmutí preamble zajišťující příjem a vysílání zpráv. Vrstva MAC slouží k ověření odesílatele zprávy a kontrole integrity zprávy a vrstva aplikační vkládá užitečná data tzv. payload. Toto definuje komunikaci mezi koncovými zařízeními a základnovými stanicemi. Ze základnové stanice do Sigfox cloudu probíhá komunikace v síti VPN (Virtual Private Network) prostřednictvím veřejného internetu. Sigfox cloud analyzuje, zpracovává a ukládá zprávy a výsledky poskytuje zákaznickým systémům. Zabezpečení payload části šifrováním uplinku či downlinku není poskytováno automaticky. Pokud chceme šifrování od Sigfoxu, je poskytováno blokové šifrování AES-128 (Advanced Encryption Standard-128) v režimu CTR (CounTeR=čítač), kde číslo 128 znamená velikost šifrovacího klíče v bitech. Pro šifrování se používá šifrovací klíč Ke odvozený

z unikátního NAK (Network Authentication Key) klíče pro každé koncové zařízení, který je mu přidělen při výrobě. Při využití této možnosti zákazník souhlasí s tím, že Sigfox data uvidí po dešifrování. Pokud chceme mít data pouze pro sebe, musíme implementovat vlastní šifrovací mechanismus, a data tak budou pro Sigfox “neviditelná”.

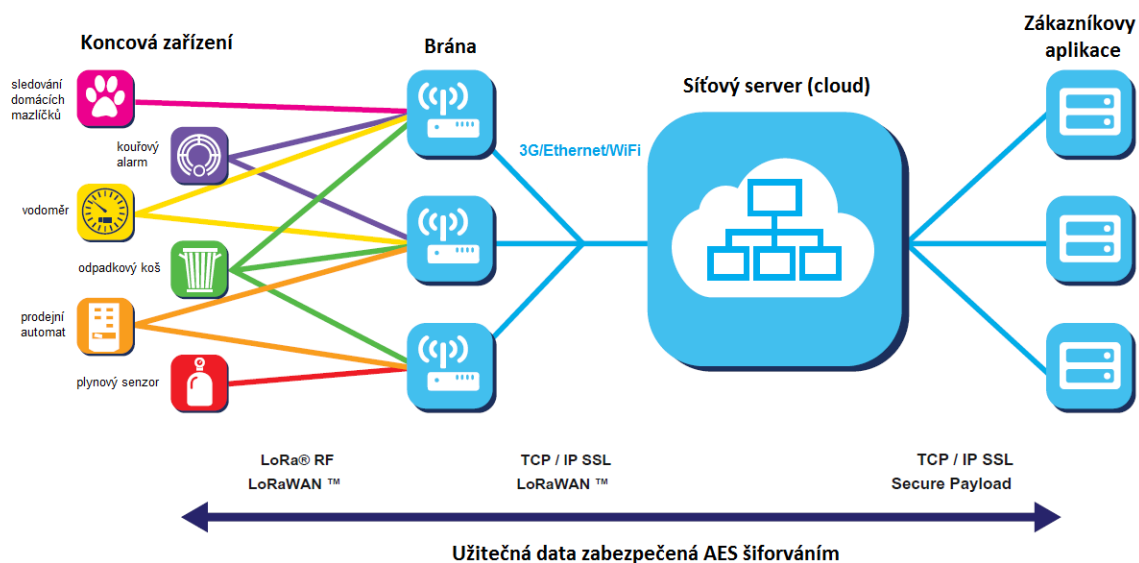


Obr. 4 Architektura Sigfox sítě [23]

2.2 LoRa a LoRaWAN

LoRa respektive LoRaWAN je LPWAN IoT síť s podporou obousměrné komunikace. Pokrytí základnovými stanicemi je v České republice dostupné na většině území. LoRa definuje fyzickou vrstvu, respektive bezdrátovou modulaci, pro vytvoření spojení na dlouhé vzdálenosti (jednotky km). Za příznivých klimatických podmínek lze dosáhnout spojení i na desítky kilometrů. Používá se CSS (Chirp Spread Spectrum) modulace, což je modulace s rozprostřeným spektrem, která je velice odolná vůči rušení a Dopplerovu jevu. Díky tomu může být koncové zařízení pohyblivé, aniž by byla ovlivněna úspěšnost přenosu uplinku či downlinku. Pro přenos je využíváno ISM frekvenční pásmo, které je v Evropě 868 MHz a USA 915 MHz. V tomto frekvenčním pásmu LoRa využívá 10 kanálů, kde v osmi z nich je přenosová rychlost v rozmezí 250 bit/s až 5,5 kbit/s, v jednom speciálním je 11 kbit/s, a v posledním samostatném FSK (Frequency Shift Keying) kanálu je 50 kbit/s. Přenosová rychlost je volena na základě velikosti užitečných dat (payload), vzdálenosti mezi koncovým zařízením a bránou, faktoru šíření a dalších parametrech. Pro uplink je v Evropě využita šířka frekvenčního pásma 125 nebo 250 kHz a pro downlink 125 kHz. V USA je šířka frekvenčního pásma pro uplink 125 nebo 500 kHz a pro downlink 500 kHz. Velikost užitečných dat se pohybuje v rozmezí 51 a 222 bajtů. Počet vyslaných zpráv za den je závislý na velikosti zprávy a přenosové rychlosti tj. i době potřebné k přenosu této zprávy. V Evropě je stanoven celkový vysílací čas jednoho zařízení na 1% z celého dne.

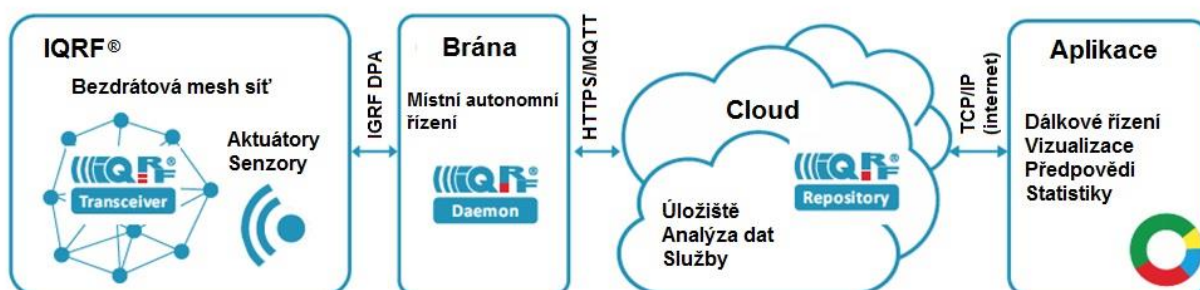
LoRaWAN definuje MAC vrstvu protokolu, do které jsou vkládány užitečná data z aplikační vrstvy a architekturu této sítě. Topologie sítě je hvězda z důvodu úspory elektrické energie. Koncová zařízení jsou spojena s více branami, nikoliv pouze s jednou. Každá, bránou přijatá zpráva, je přenesena do cloudu, kde se odfiltrují redundantní zprávy, zkontroluje jejich integrita, atd. Brána je schopna přijímat současně zprávy na stejném kanále, ale s různými přenosovými rychlostmi anebo na různých kanálech, což zvyšuje kapacitu této sítě. Rozlišují se zde tři třídy koncových zařízení, třída A, B a C, které se liší spotřebou elektrické energie a možnostmi, kdy lze přenášet downlink zprávy. Třídou A musí podporovat všechna koncová zařízení, ostatní třídy jsou volitelné dle požadavků konkrétního použití. Každé koncové zařízení má unikátní 128 bitový klíč AppKey a globálně jedinečný EUI-64 (Extended Unique Identifier-64) identifikátor. Na základě Appkey a EUI-64 jsou vytvořeny další dva klíče AppSKey a NwkSKey. AppSKey slouží pro AES-CTR šifrování a dešifrování užitečných dat mezi koncovým zařízením a zákaznickovou aplikací. NwkSKey slouží k ověření odesílatele a kontrole integrity zprávy mezi koncovým zařízením a cloudem. Zabezpečení komunikace mezi cloudem a zákaznickovou aplikací je pomocí VPN.



Obr. 5 Architektura LoRaWAN sítě [25]

2.3 IQRF

IQRF je další LPWAN síť vyvinutá společností MICRORISC, která pochází z České Republiky a využívá pro komunikaci proprietární protokol IQMESH. Topologie této sítě je mesh, což je obecně náročnější na spotřebu elektrické energie, ale IQRF toto eliminuje díky protokolu IGMESH. V této topologii je velice nepravděpodobné, že by došlo k nedoručení zprávy, protože každý uzel (koncové zařízení) odesílá zprávu všem jemu dostupným, a tímto způsobem se zpráva přenáší až ke koordinátorovi, respektive bráně. Dostupné jsou dva komunikační režimy, kde v prvním je vyslaná zpráva přístupná všem uzlům v dosahu, a v druhém koordinátor spravuje až 239 uzlů a zprávy jsou přístupné pouze konkrétním uzlům. Pro přenos zprávy mezi uzly je použita buď modulace ASK (Amplitude Shift Keying), FSK nebo GFSK v závislosti na použitém komunikačním modulu. Pro komunikaci je v Evropě použito 868 MHz ISM frekvenční pásmo, v kterém IQRF využívá 62 kanálů o šířce 100 kHz. V USA využívá 915 MHz ISM pásmo se 189 kanály. Velikost užitečných dat je maximálně 64 bajtů. Přenosová rychlost může být až 20 kbit/s, ale je velice závislá na počtu uzlů a době, než je zpráva uzlem přeposlána dalšímu uzlu. Vzdálenost pro spolehlivou komunikaci může být mezi dvěma uzly maximálně v řádech stovek metrů (cca 500 m). V případě úplné mesh sítě je celkový počet uzlů 240, kde jeden uzel plní funkci koordinátora. Zbýlých 239 uzlů může plnit funkci tzv. sub koordinátora, ke kterému může být připojeno dalších 239 uzlů, ale to není výhodné z důvodu snížení přenosové rychlosti, složitosti a údržby. Připojením více uzlů do sítě lze tedy navýšit komunikační vzdálenost až na zhruba 10 km. Bezpečnost komunikace je zajištěna AES-128 šifrováním. Tato technologie najde využití především v průmyslových halách, budovách, parkovištích a městech pro jejich řízení, sledování a automatizaci.



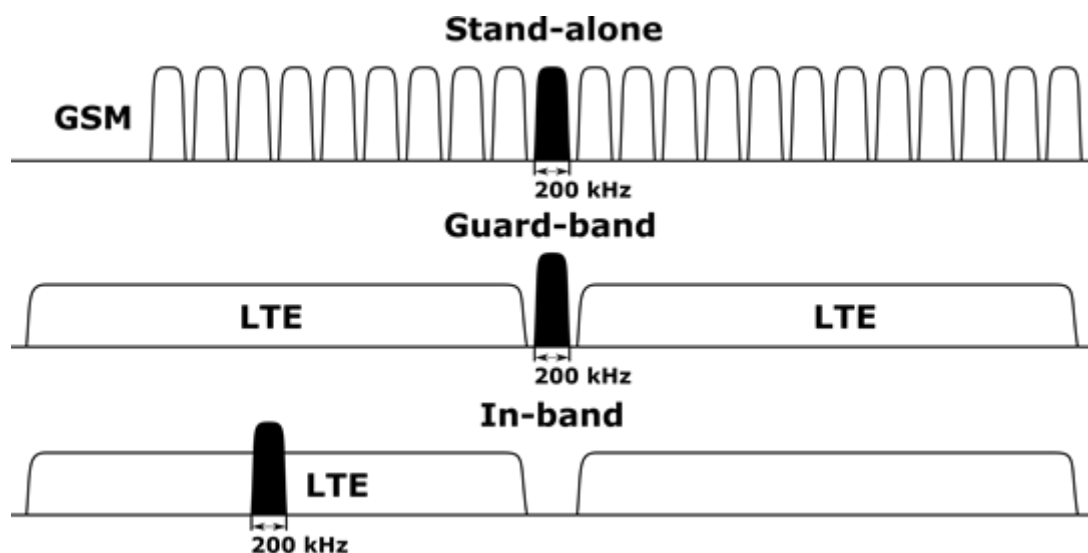
Obr. 6 Architektura IQRF sítě [28]

2.4 Z-Wave

Z-Wave je proprietární IoT technologie s minimální spotřebou elektrické energie a podporou obousměrné komunikace. Je založena na standardu ITU-T G.9959 [30], ve kterém je definována fyzická a linková vrstva, a Z-Wave definuje transportní, síťovou a aplikační vrstvu. Pro komunikaci používá 868 MHz ISM frekvenční pásmo v Evropě a 915 MHz ISM pásmo v USA s 3 kanály o šířce 300 kHz nebo 400 kHz v závislosti na přenosové rychlosti. Přenosová rychlost může být 9,6 kbit/s, 40 kbit/s a 100 kbit/s v závislosti na okolním prostředí. Pro přenosové rychlosti 9,6 kbit/s a 40 kbit/s je použita FSK modulace a pro přenosovou rychlost 100 kbit/s modulace GFSK. Velikost užitečných dat ve zprávě je maximálně 64 bajtů. Topologie této sítě je mesh, což je vhodné pro pokrytí budov či průmyslových hal. Vzdálenost mezi dvěma zařízeními, která spolu chtějí komunikovat, je v prostředí bez překážek až 100 m, uvnitř budov do 30 m, ale doporučená vzdálenost pro nejvyšší spolehlivost komunikace je 10 m. Rozlišují se zde dva typy zařízení kontrolér (controller) a podřízený (slave). Kontrolér zná celou topologii sítě a může tak komunikovat s kterýmkoliv zařízením. Podřízený může posílat zprávy pouze zařízením, které si je vyžádalo, ale druhý typ směrovací podřízený (routing slave) může krom tohoto posílat požadavky o poslání zprávy předem daným zařízením, ke kterým zná cestu. Každé zařízení má definovaná dvě identifikační čísla, HomeID o velikosti 32 bitů a NodeID o velikost 8 bitů. U kontroléru je HomeID pevně stanoveno z výroby, kdežto podřízeným je HomeID přidělováno až po připojení ke konkrétnímu kontroléru a je tak v rámci jedné sítě shodné. Každému podřízenému je kontrolérem přiřazené NodeID, které je v rámci jedné sítě jedinečné. Zpráva může být k příjemci přeposílána maximálně 4 zařízeními z důvodu zpoždění a stability celé sítě. Maximální počet zařízení v jedné síti je 232. Jsou zde 3 třídy zabezpečení, které jsou šifrovány pomocí AES-128, kde nejbezpečnější je "S2 Access Control", "S2 Authenticated" a "S2 Unauthenticated". Pro přidání zařízení do sítě je nutné zadat jeho DSK (Device Specific Key) naskenováním QR (Quick Response) kódu anebo opsáním. Tato technologie je především určena pro domácí automatizaci, kde prostřednictvím aplikace v telefonu, tabletu či počítači, lze ovládat a sledovat připojená zařízení.

2.5 NB-IoT

NB-IoT (NarrowBand-Internet of Things) je úzkopásmová LPWAN síť definovaná společností 3GPP v Release 13 [34], která pracuje v sítích mobilních operátorů a podporuje obousměrnou komunikaci. Pracuje v licencovaných frekvenčních pásmech, které jsou v Evropě 1800 MHz s 2 kanály o šířce 75 MHz, 900 MHz s 2 kanály o šířce 35 MHz a 800 MHz s 2 kanály o šířce 30 MHz. V daném frekvenčním pásmu se používá jeden kanál pouze pro uplink a druhý pro downlink. Pro uplink i downlink je v daném kanále zabraná šířka frekvenčního pásma 200 kHz. Maximální velikost užitečných dat je 1600 bajtů a počet přijatých a vyslaných zpráv za den je neomezený. Uplink používá modulační schéma SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) s modulací subnosných BPSK (Binary Phase Shift Keying) nebo QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying). Pro downlink je využita modulační metoda OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) s modulací subnosných QPSK. Přenosová rychlost je pro downlink 250 kbit/s a pro uplink 20 kbit/s nebo 250 kbit/s. Jsou definovány 3 různé provozní režimy (viz Obr. 7), "In-band", "Guard-band" a "Stand-alone". První režim tj. in-band pracuje v části frekvenčního pásma LTE (Long Term Evolution) kanálu, kde zabírá šířku 200 kHz, z toho je 10 kHz ochranný interval z každé strany. Režim guard-band pracuje v nevyužitém ochranném frekvenčním pásmu mezi jednotlivými LTE kanály. Stand-alone režim pracuje v části frekvenčního pásma GSM, kde zabírá šířku 200 kHz, což je šířka jednoho GSM kanálu. Maximální počet připojených zařízení na jednu základnovou stanici je 52547. Autentizace zařízení je pomocí běžné karty SIM (Subscriber Identity Module), jak ji známe z mobilních telefonů nebo karty eSIM (embedded Subscriber Identity Module), která je pevně zabudována v zařízení. Zabezpečení komunikace je zajištěno pomocí symetrických a asymetrických klíčů generovaných pomocí SIM karty. Vzdálenost koncového zařízení od základnové stanice pro spolehlivou komunikaci je v řádech několika kilometrů v závislosti na překážkách. Výhodou je přítomnost signálu i v těžko dostupných místech (např. uvnitř budov, podzemí, pod vodou, atd.). Je možné, aby bylo koncové zařízení pohyblivé, ale pouze v rámci oblasti, kterou pokrývá základnová stanice, ke které je zařízení připojeno. Pokrytí je v České Republice od operátora Vodafone po celém území, od ostatních jen v největších městech a jejich okolí. Dále je různými operátory celoplošně pokryta signálem většina států Evropy a celá severní Amerika.



Obr. 7 Provozní režimy NB-IoT

2.6 6LoWPAN

6LoWPAN je protokol adaptační vrstvy vyvinutý společností IETF specifikovaný dokumentem RFC 4944 [37]. Adaptační vrstva leží mezi MAC a síťovou vrstvou. Definuje, jak je protokol IPv6 (Internet Protocol version 6) přenášen pomocí LPWAN sítě, konkrétně IEEE 802.15.4 [38]. Klasický IPv6 protokol má 40 bajtové záhlaví a UDP (User Datagram Protocol) protokol 8 bajtové, které obsahuje mnoho nadbytečných informací, a proto nejsou v této podobě vhodné pro použití v IoT. Je tedy nutné obě záhlaví zmenšit, což je možné, protože v IPv6 i UDP záhlaví jsou často některé části stejné. Dále jsou odstraněny informace, které lze odvodit z jiných vrstev. V případě IPv6 záhlaví jsou 3 možnosti zmenšení, na 20 bajtů v případě komunikace se zařízením mimo síť bez znalosti jeho předpony, na 12 bajtů pokud je zřízení mimo síť, ale známe jeho předponu, anebo na 2 bajty pokud je komunikace v rámci sítě. U UDP záhlaví se velikost sníží na 4 bajty. Díky tomuto snížení velikosti záhlaví se může zvýšit maximální velikost užitečných dat z původních 53 bajtů až na 108 bajtů. V IPv6 protokolu je maximální velikost datagramu (Maximum Transmission Unit - MTU) 1280 bajtů, což je příliš velké pro přenesení pomocí IEEE 802.15.4, protože zde je maximální velikost datagramu 127 bajtů. Z tohoto důvodu je nutné datagramy fragmentovat na několik jednotlivých datagramů. V každém jednotlivém datagramu jsou v záhlaví informace o délce původních nefragmentovaných užitečných dat, pozici daného fragmentu v původních užitečných datech a identifikátor fragmentů, z kterých se původní užitečná data skládají. Díky těmto informacím lze jednotlivé datagramy defragmentovat a získat tak původní datagram. Jsou podporovány topologie sítí

hvězda a mesh. Pro mesh topologii sítě je v záhlaví datagramu informace o počtu zařízení, přes která má být přenášen, zdrojová a cílová adresa. Jsou definovány dva způsoby směrování, “mesh-under“ a “mesh-over“. U mesh-under se využívá pro směrování MAC adres linkové vrstvy. Jednotlivé fragmenty původního datagramu jsou poslány všem okolním zařízením, která je přeposílají okolním zařízením, až dokud nejsou v cílovém zařízení. Sestavení jednotlivých fragmentů do původního datagramu probíhá až v cílovém zařízení po přijetí všech fragmentů. Pokud chybí více fragmentů, je provedeno znovuzaslání ze zdrojového zařízení do cílového. U mesh-over se využívá pro směrování IP (Internet Protocol) adres síťové vrstvy. Jednotlivé fragmenty původního datagramu jsou poslány okolním zařízením na základě směrovací tabulky s tím, že v každém z nich probíhá opětovné sestavení jednotlivých fragmentů do původního datagramu a při vyslání dalšímu zařízením, je opět provedena fragmentace. Každé zařízením má tedy funkci IP směrovače. V případě chybějících fragmentů je provedeno znovuzaslání od okolních zařízením. Výhodou je, že internetové připojení probíhá také pomocí IP protokolů, což značně zjednodušuje práci bráně při překládání z jednoho protokolu do druhého. Brána tak může být postavena z embedded zařízením jehož hardware není tak komplexní a software je také jednodušší.

HTTP	
UDP	ICMP
IPv6	
6LoWPAN adaptační vrstva	
IEEE 802.15.4 MAC vrstva	
IEEE 802.15.4 fyzická vrstva	

Obr. 8 6LoWPAN protokolový zásobník

2.7 Zigbee

Zigbee [40] je LPWAN síť s obousměrnou komunikací, jejímž základem je standard IEEE 802.15.4. Standard IEEE 802.15.4 definuje fyzickou a MAC vrstvu a Zigbee definuje síťovou a aplikační vrstvu. Díky ad-hoc směrování není pro komunikaci nutná přímá viditelnost zařízení. Síť se skládá ze tří základních zařízení, koordinátora, směrovače a koncových zařízení. Zařízení se pak dělí na zařízení s plnou a omezenou funkčností. Zařízení s plnou funkčností může plnit funkci koordinátora, směrovače i koncového zařízení. Naopak zařízení s omezenou funkčností plní pouze funkci koncového zařízení.

Koordinátor ani směrovač nemůže být napájen z baterií, protože musí být stále v pohotovosti. Pro komunikaci používá ISM frekvenční pásma 2,4 GHz s 16 kanály o šířce 2 MHz, v Evropě 868 MHz s 1 kanálem o šířce 600 kHz a v USA 915 MHz s 10 kanály o šířce 600 kHz. V jednotlivých frekvenčních pásmech se přenosové rychlosti liší, v pásmu 2,4 GHz je přenosová rychlost 250 kbit/s, v pásmu 868 MHz činí 20 kbit/s a v pásmu 915 MHz je 40 kbit/s. Ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz jsou data modulována O-QPSK (Offset Quadrature Phase-Shift Keying) modulací, v pásmu 868 MHz a 915 MHz jsou modulována BPSK (Binary Phase-Shift Keying) modulací a pro jejich přenos se používá spektrum DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Velikost užitečných dat je volitelná, ale určitě nepřesáhne 127 bajtů. Díky DSSS jsou přenášená data odolná vůči rušení a je zvýšena spolehlivost přenosu. Komunikační vzdálenost je v otevřeném prostoru bez překážek do 100 m, uvnitř budov tato vzdálenost klesá přibližně na polovinu. Zabezpečení komunikace je zajištěno šifrováním AES-128, kde standard IEEE 802.15.4 definuje šifrovací algoritmus, ale nestanovuje, jakým způsobem mají být klíče potřebné k šifrování spravovány nebo jaké zásady ověřování musí být použity. To definuje Zigbee na síťové a aplikační vrstvě. Tato síť umožňuje použít topologii hvězda, strom i mesh.

2.8 Bluetooth 5 Low Energy

Bluetooth Low Energy, jak už z názvu vyplývá, je verze Bluetooth 5 s nízkým odběrem elektrické energie. Pro komunikaci využívá celosvětové bezlicenční 2,4 GHz ISM frekvenční pásmo s 40 kanály o šířce 2 MHz. Ty jsou rozděleny na 3 advertising (reklamní) kanály a 37 datových kanálů. Přenosová rychlost může být 125 kbit/s, 500 kbit/s, 1 Mbit/s nebo 2 Mbit/s. Pokud nejsou přenášená data kódována, může být přenosová rychlost 1 nebo 2 Mbit/s. V případě FEC (Forward Error Correction) kódování 1 bitu přenášených dat osmi symboly je přenosová rychlost 125 kbit/s, při FEC kódování 1 bitu dvěma symboly 500 kbit/s. FEC kódování umožňuje díky redundanci detekci a opravu omezeného počtu chyb v přijaté zprávě bez nutnosti opětovného zaslání též zprávy. Data jsou modulována modulací GFSK a jsou přenášena spektrem FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum), které zajišťuje odolnost přenášených dat vůči rušení. Vzdálenost pro komunikaci mezi dvěma zařízeními je maximálně 100 m. Závisí na prostředí, kódování či nekódování přenášených dat a přenosové rychlosti. Čím je přenosová rychlost nižší, tím lze dosáhnout delší přenosové vzdálenosti. Podporuje topologie bod-bod, hvězda a mesh. V topologii bod-bod je maximální velikost užitečných dat 251 bajtů, pro topologii hvězda

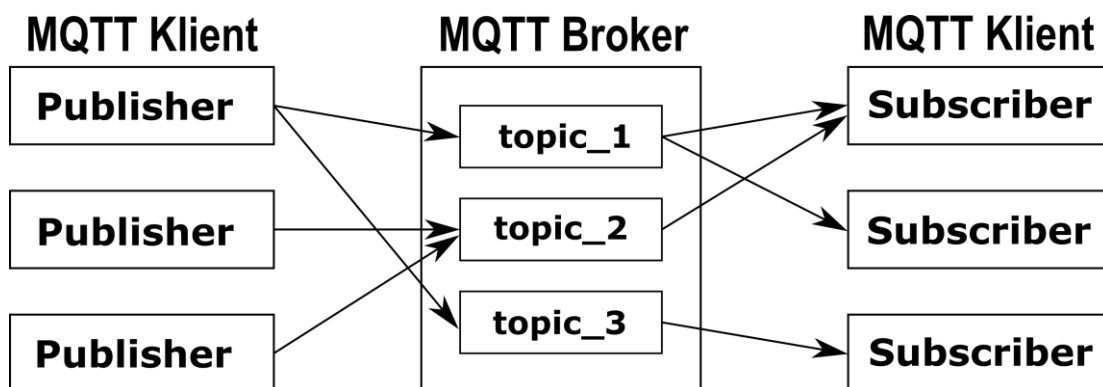
255 bajtů a pro topologii mesh 29 bajtů. Počet zařízení v síti s topologií hvězda je neomezený. V topologii sítě mesh je počet zařízení omezen na 32767 s nejvýše 4096 podsítěmi a přenášená zpráva může být přeposlána nejvýše 127 krát. Zařízení může být součástí více sítí respektive podsítí. Zabezpečení komunikace je zajištěno šifrováním AES-128. Využití najde především v domácí automatizaci, průmyslových halách, zdravotnictví, sportu, atd.

2.9 MQTT

MQTT [46] je jednoduchý a nenáročný protokol aplikační vrstvy založený na TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) protokolovém zásobníku, což jsou v ISO/OSI modelu vrstvy relační, prezentační a aplikační. Jeho přenos na transportní vrstvě probíhá pomocí protokolu TCP. Je založen na komunikaci typu publish/subscribe (publikovat/odebírat) prostřednictvím centrálního bodu tzv. “brokeru“ (zprostředkovatel), ke kterému jsou připojeni klienti (koncová zařízení). Veškerá komunikace tedy probíhá prostřednictvím brokera a klienti tak spolu nikdy přímo nekomunikují. Klient má dvě funkce, “publisher“ (vydavatel) a “subscriber“ (odběratel), zpráv. Zprávy jsou tříděny do tzv. “topics“ (témata), jejichž názvy jsou voleny uživatelem, a vydavatel i odběratel je musí znát. Pokud broker zaznamená nové téma, tak jej uloží a díky nim může přijatou zprávu od vydavatele odeslat příslušným odběratelům. Jednotliví klienti mohou být zároveň přihlášení k odběru více témat a publikovat také ve více tématech. Zpráva je složena z pevně dané hlavičky, volitelné hlavičky a užitečných dat. V pevně dané hlavičce jsou obsaženy informace o typu zprávy, příznaku duplicity zprávy, úrovni kvality služby (QoS - Quality of Service), zda má být přijatá zpráva daného tématu uložena v brokeru pro odeslání nově přihlášeným odběratelům, délce volitelné hlavičky a užitečných dat. Je definováno 14 typů zpráv, kde u některých typů nejsou vůbec přenášena užitečná data, protože tyto zprávy slouží jako potvrzení brokera na požadavky klienta. V jednotlivých typech zpráv se také liší velikost volitelné hlavičky a informace obsažené v ní. Jsou definovány tři úrovně kvality služeb, a to konkrétně QoS 0, QoS 1 a QoS 2. U úrovně QoS 0 není žádná záruka doručení zprávy, protože vydavatel pošle zprávu do brokeru, ten jí přepoše daným odběratelům, kteří nijak nepotvrzují její přijetí či nepřijetí. Úroveň QoS 1 zaručuje doručení zprávy alespoň jednou. Postup je stejný jako u QoS 1, jen vydavatel zprávu uloží a čeká, dokud nepřijde potvrzení o doručení daným odběratelům. Pokud vydavatel obdrží potvrzení o doručení zprávy v daném čase, je zpráva smazána.

V opačném případě je zpráva vyslána znovu a je tomu tak do doby, dokud není doručení úspěšné. QoS 2 úroveň zaručuje doručení zprávy pouze jednou. Vydavatel pošle zprávu brokeru, ten ji uloží a přepošle daným odběratelům, a v případě úspěšného doručení zprávy je o tom vydavatel informován, v opačném případě se proces opakuje. Po úspěšném doručení odběratelům vydavatel potvrdí brokeru, že může smazat danou zprávu. Broker po smazání vyšle vydavateli potvrzení a ten také zprávu smaže. Zabezpečení komunikace není v MQTT řešeno, ale může být zajištěno pomocí protokolu SSL/TLS (Secure Sockets Layer/ Transport Layer Security).

MQTT-SN [47] je zjednodušená varianta určená pro technologie, které nevyužívají na transportní vrstvě TCP protokol. Optimalizuje velikost názvů témat, které jsou místo řetězců v kódování UTF-8 (Unicode Transformation Format-8) zabírající mnoho dat nahrazeny tzv. “topic ID“ o délce 2 bajty. Topic ID jsou zde předdefinována a jsou známá všem klientům i brokeru a není tedy potřeba jejich registrace. Zprávy, které jsou určeny klientům, kteří jsou momentálně neaktivní (v režimu spánku), jsou ukládány v brokeru a po probuzení jsou klientovi odeslány.



Obr. 9 MQTT architektura

2.10 CoAP

CoAP (Constrained Application Protocol) je protokol aplikační vrstvy definovaný společností IETF v dokumentu RFC 7252 [52], který je speciálně navržený pro IoT. Je velice podobný běžně používanému internetovému protokolu http (HyperText Transfer Protocol). Tento protokol využívá pro přenos na transportní vrstvě protokol UDP. Komunikace je založena na modelu požadavek/odpověď s dvěma typy zařízení, klientem a serverem. Klient odesílá požadavky serveru a ten mu odpovídá odpověďmi na jeho požadavky. Je snaha o co nejnížší velikost jedné zprávy, aby se vešla do části užitečných

dat jednoho UDP datagramu a zamezilo se tak její fragmentaci na více částí na nižších vrstvách. Zpráva je složena z hlavičky o pevné délce 4 bajty, tokenu, nastavení a užitečných dat o volitelné délce. Hlavička obsahuje informace o verzi CoAP, typu zprávy, velikosti tokenu, kódu a ID zprávy. Jsou specifikovány 4 typy zpráv, a to konkrétně “confirmable“ (potvrditelná), “non-confirmable“ (nepotvrditelná), “acknowledgment“ (potvrzení) a “reset“. Potvrditelná zpráva s ID zprávy je vyslána klientem serveru, a ten po přijetí odesílá zprávu o potvrzení přijetí včetně požadovaných dat zpět se shodným ID zprávy. Pokud klient neobdrží v určitém časovém úseku od serveru potvrzovací zprávu včetně dat, odesílá potvrditelnou zprávu opakovaně. V případě, že server nedokáže zpracovat potvrditelnou zprávu, odpoví zprávou reset. Takováto odpověď se nazývá “piggyback“ (přiživit se), a to z toho důvodu, že se data přenáší současně s potvrzovací zprávou. Druhý případ nastává, když klient vyšle potvrditelnou zprávu a server nemůže okamžitě odpovědět, tak odešle potvrzovací zprávu bez dat. Jakmile jsou data k dispozici, je serverem odeslána klientovi potvrditelná zpráva s daty a klient odpovídá potvrzovací zprávou. Tímto způsobem je zaručena spolehlivost doručení od klienta k serveru a opačně. Nepotvrditelná zpráva s ID zprávy je odeslána klientem k serveru, ale není vyžadována potvrzovací zpráva od serveru, což z ní činí zprávu nespolehlivou. Pokud server není schopen zpracovat nepotvrditelnou zprávu, může odpovědět zprávou reset. Druhou možností je, že klient vyšle nepotvrditelnou zprávu a server odpovídá také nepotvrditelnou zprávou, ale ani jeden nemá potvrzení o přijetí. Kód obsahuje informaci o metodě požadavku (GET, POST, PUT, DELETE) a kódu odpovědi. ID zprávy slouží k rozpoznání duplicitní zprávy a k přiřazení zpráv typu potvrzení/reset zprávám typu potvrditelná/nepotvrditelná. Token je vydán klientem a je obsažen v každém požadavku a odpovědi (zprávě), což umožňuje klientovi přirovnat odpověď k danému požadavku. Užitečná data jsou až za 1 bajtem, který obsahuje samé 1 pro rozlišení, kde končí část nastavení a začíná část užitečných dat. Umožňuje vícesměrovou komunikaci vybraným serverům, kde zprávy posílané klientem k serverům musí být nepotvrditelné a nelze je zabezpečit pomocí protokolu DTLS (Datagram Transport Layer Security). CoAP protokol totiž sám o sobě nedefinuje zabezpečení, ale může být zabezpečen pomocí protokolu DTLS. Krom toho je také podporována komunikace pouze mezi jedním klientem a serverem. Jelikož je CoAP protokol velice podobný HTTP protokolu je velice snadný vzájemný překlad mezi oběma protokoly pomocí proxy serveru, což umožňuje snadnou komunikaci s cloudem či jiným zařízením v internetu.

Verze	Typ	Délka tokenu	Kód	ID zprávy
Token				
Nastavení				
0xFF	Užitečná data			

Obr. 10 Struktura CoAP zprávy

2.11 Shrnutí

V tabulce *Tab. 1* níže je pro lepší orientaci mezi jednotlivými protokoly a technologiemi internetu věcí uveden přehled jejich základních parametrů s platností celosvětovou (frekvenční pásmo 2,4 GHz) a na území Evropy (frekvenční pásmo 868 MHz a licencované 800 MHz, 900 MHz a 1800 MHz).

Tab. 1 Shrnutí parametrů IoT technologií

	Frekv. pásmo	Přenosová rychlost	Topologie	Modulace	Zabezpečení	Dosah	Velikost užitečných dat
SigFox	868 MHz	Up 100 b/s Down 600 b/s	hvězda	DBPSK GFSK	AES-128	50 km	12 B
LoRa	868 MHz	250 b/s – 50 kb/s	hvězda	CSS	AES	Jednotky km	51 B – 222 B
IQRF	868 MHz	20 kb/s	mesh	ASK FSK GFSK	AES-128	500 m	64 B
Z-Wave	868 MHz	9,6 kb/s – 100 kb/s	mesh	FSK GFSK	AES-128	100 m	64 B
NB-IoT	800 MHz 900 MHz 1800 MHz	250 kb/s	hvězda	BPSK QPSK	SIM, eSIM	Jednotky km	1600 B
Zigbee	868 MHz 2,4 GHz	20 kb/s – 250 kb/s	hvězda strom mesh	BPSK O-QPSK	AES-128	100 m	127 B
BLE 5	2,4 GHz	125 kb/s – 2 Mb/s	hvězda mesh	GFSK	AES-128	100 m	255 B

3 Komunikační moduly

Komunikační modul obvykle obsahuje komunikační čip zajišťující vlastní bezdrátové spojení s ostatními zařízeními, která spolu chtějí komunikovat. Dále mikrokontrolér a ostatní pasivní či aktivní součástky vyžadované konkrétním zapojením. Provedení může být v podobě desky plošných spojů, kde je zvláště osazen komunikační čip a mikrokontrolér s ostatními pasivními či aktivními součástkami pro požadovanou funkci. Druhou možností provedení může být SiP (System in a Package), kde je komunikační čip, mikrokontrolér a ostatní součástky umístěny v horizontálních či vertikálních vrstvách v jednom pouzdře. Další možností je SoC (System on a Chip), kde je komunikační čip, mikrokontrolér a ostatní součástky umístěny vedle sebe nikoliv ve vrstvách v jednom pouzdře. U následujícího přehledu aktuálně dostupných komunikačních modulů je vždy uveden rozsah frekvencí transceiveru s tím, že následující radiofrekvenční funkce se již vztahují k frekvencím používaným v Evropě anebo celosvětově (2,4 GHz). Některé komunikační moduly a čipy podporují více standardů, a proto jsou funkce takového modulu či čipu uvedeny pouze jednou a u dalších standardů je na tyto funkce pouze odkazováno. U komunikačních modulů a čipů jsou také uvedeny typy pouzder s odkazem na jejich výkres a rozměry, které jsou v přílohách.

3.1 LoRa a LoRaWAN

Pro komunikační technologii LoRa je výhradním výrobcem komunikačních čipů firma Semtech, na kterých jsou založeny všechny dostupné komunikační moduly. Komunikační moduly jsou již osazeny mikrokontrolérem a lze k nim připojit zařízení, která chceme sledovat, kontrolovat, ovládat či řídit.

3.1.1 Semtech

- Semtech SX1261 [56]

Tento komunikační čip sdružuje funkci přijímače i vysílače tzv. transceiver a je základem většiny LoRa komunikačních modulů. Podporuje LoRa modulaci a zároveň různé varianty FSK modulace. Splňuje požadavky pro rádiovou komunikaci v Evropě a jeho frekvenční rozsah je v rozmezí 150 MHz až 960 MHz, což umožňuje komunikaci v ISM pásmech používaných po celém světě. Provedení je v pouzdře QFN-24 (viz *Obr. 11*).

Funkce - frekvence 150 MHz až 960 MHz

- napájecí napětí 1,8 V až 3,7 V
- spotřeba při příjmu 4,6 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 25,5 mA až 60 mA (v závislosti na napájecím napětí)
- spotřeba v režimu spánku 160 nA
- citlivost přijímače až -148 dBm
- maximální vysílací výkon 15 dBm
- link budget¹ až 170 dB
- SPI konektivita

3.1.2 RF Solutions

- GAMMA-868 [57]

Jedná se o komunikační modul s funkcí buď pouze přijímače, vysílače, transceiveru anebo rádiového modemu, jehož základem je komunikační čip SX1272 od firmy Semtech. Obsahuje 8 bitový mikrokontrolér EFM8 od SILICON LABS. Funkce rádiového modemu umožňuje přijatá data přeposílat data jednomu anebo více koncovým zařízením.

Funkce - frekvence 868 MHz

- napájecí napětí 2,4 V až 3,6 V
- spotřeba při příjmu 20 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 150 mA
- spotřeba v režimu spánku 2 μ A
- citlivost přijímače až -137 dBm
- vysílací výkon 20 dBm
- link budget až 157 dB
- 8 vstupů/výstupů

3.1.3 Murata

- Murata CMWX1ZZABZ [58]

Komunikační modul Murata CMWX1ZZABZ je osazen komunikačním čipem SX1276

¹ Součet všech zisků a ztrát mezi vysílačem a přijímačem plus přičtení rezervy s tím, že výkonová úroveň link budget musí být vždy vyšší, než citlivost přijímače, aby byl umožněn bezztrátový příjem signálu.

a 32 bitovým mikrokontrolérem STM32L082 od výrobce STMicroelectronics. Podporuje komunikační technologii LoRa i Sigfox, ale nikoliv současně. Provedení je v pouzdře LGA-57.

Funkce - frekvence 868 MHz a 915 MHz

- napájecí napětí 2,2 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 1,4 μ A
- spotřeba při přijímání 20 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 128 mA
- citlivost přijímače až -135,5 dBm
- vysílací výkon 20 dBm
- link budget až 168 dB
- 18 GPIO
- konektivita SPI, I²C, UART, USB
- paměť FLASH 192 KB, paměť RAM 20 KB
- 12 bitový A/D a D/A převodník, 2 analogové komparátory, čítače a časovače

3.1.4 Microchip

- SAM R34 [59]

Komunikační modul SAM R34 s funkcí transceiveru je proveden formou integrovaného obvodu v pouzdře BGA (Ball Grid Array). Je osazen 32 bitovým mikroprocesorem ARM Cortex -M0+. Jedná se o tzv. SiP (System in Package) systém, což znamená, že na jednom čipu je více integrovaných obvodů, v tomto případě komunikační čip a mikroprocesor. Provedení je v pouzdře BGA-64 (viz *Obr. 12*).

Funkce - frekvence 868 MHz (137 MHz až 1020 MHz)

- napájecí napětí 1,8 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 790 nA
- spotřeba při příjmu 16 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 95 mA
- citlivost přijímače až -136 dBm
- vysílací výkon 20 dBm
- link budget až 168 dB
- 27 GPIO

- konektivita USART, I²C, SPI, LIN, USB
- paměť FLASH 256 KB, paměť RAM 32 KB
- 12 bitový A/D převodník s 8 kanály, 2 analogové komparátory, PWM, čítače a časovače

3.1.5 STMicroelectronics

- P-NUCLEO-LRWAN1 [60]

Jedná se o rozšiřující desku obsahující komunikační čip Semtech SX1272 s funkcí transceiveru, která je připojitelná k vybraným vývojovým deskám STM32 NUCLEO pomocí SPI rozhraní. Nejběžněji je dodávána s STM32 NUCLEO-L073RZ, kde je připojena na rozšiřující konektor Arduino a ostatní nevyužité piny lze použít pro připojení senzorů, akčních členů, atd.

Funkce - frekvence 868 MHz (860 MHz až 1020 MHz)

- napájecí napětí 1,65 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 200 nA
- spotřeba při příjmu 10 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 125 mA
- citlivost přijímače -137 dBm
- vysílací výkon 20dBm
- link budget až 157 dB
- 51 GPIO
- konektivita SPI, USART, I²C, USB
- paměť FLASH 192 KB, paměť RAM 20 KB
- 12 bitový A/D převodník s 16 kanály a 1 kanálový D/A převodník, 2 komparátory

3.2 Sigfox

3.2.1 NXP Semiconductors

- NXP Semiconductors OL2385 [61]

Komunikační modul NXP Semiconductors je integrován v pouzdře QFN-48 (viz *Obr. 13*) a obsahuje transceiver s 16 bitovým procesorovým jádrem MRK IIIe.

Funkce - frekvence 868 MHz (160 MHz až 960 MHz)

- napájecí napětí 1,9 V až 5,5 V
- spotřeba v režimu spánku 1,5 μ A
- spotřeba při příjmu 11 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 29 mA
- citlivost přijímače -124 dBm
- vysílací výkon 14 dBm
- 12 GPIO
- konektivita USART, SPI, LIN
- paměť EROM 32 kB, paměť RAM 7 kB
- 10 bitový A/D převodník se 4 kanály, čítače a časovače

3.2.2 STMicroelectronics

- S2-LPQTR [62]

S2-LPQTR je komunikační čip s funkcí transceiveru vyráběný STMicroelectronics v pouzdře QFN-24 (viz *Obr. 11*). Pro vývojové účely ve frekvenčním pásmu 868 MHz je dostupný vývojový kit STEVAL-FKI868V1, který obsahuje vývojovou desku NUCLEO-L152RE a rozšiřující desku obsahující komunikační čip S2-LPQTR.

Funkce - frekvence 868 MHz (413 MHz až 479 MHz a 826 MHz až 958 MHz)

- napájecí napětí 1,8 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 700 nA
- spotřeba při příjmu 7,2 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 29 mA
- citlivost přijímače -130 dBm
- vysílací výkon 16 dBm
- link budget 145 dB
- 4 GPIO
- konektivita SPI

3.2.3 Atmel

- ATA8520 [63]

Komunikační čip ATA8520 má funkci transceiveru s vestavěným 8 bitovým mikrokontrolérovým jádrem AVR od výrobce Atmel a je dodáván v pouzdře QFN-32 (viz

Obr. 14).

Funkce - frekvence 868 MHz (868 MHz až 868,6 MHz)

- napájecí napětí 1,9 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 50 μ A
- spotřeba při příjmu 15 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 32,7 mA
- citlivost přijímače -127 dBm
- vysílací výkon 14,5 dBm
- 7 GPIO
- konektivita SPI

3.2.4 ON Semiconductor

- AX-SIP-SFEU [64]

Komunikační modul AX-SIP-SFEU je tzv. SiP systém na jednom čipu s funkcí transceiveru vyráběný v pouzdře SIP-38 (viz Obr. 15). Pro jeho funkci není tedy potřeba žádných dalších elektronických součástek.

Funkce - frekvence 868 MHz

- napájecí napětí 2,1 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 180 nA
- spotřeba při příjmu 14 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 45 mA
- citlivost přijímače -125 dBm
- vysílací výkon 13 dBm
- 15 GPIO
- konektivita UART, SPI
- 10 bitový A/D převodník s 6 kanály, D/A převodník s 2 kanály

3.2.5 WiSOL

- WiSOL WSSF10R1AT [65]

Funkce - frekvence 868 MHz

- napájecí napětí 1,8 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 2 μ A

- spotřeba při příjmu 15 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 65 mA
- citlivost přijímače -127 dBm
- vysílací výkon 13,5 dBm
- 10 GPIO
- konektivita USART, SPI
- paměť EROM 32 KB, paměť RAM 7 KB
- A/D převodník se 4 kanály a D/A převodník s 2 kanály

3.2.6 Murata

- Murata CMWX1ZZABZ

Tento komunikační modul podporuje technologii LoRa a Sigfox. Jeho funkce jsou uvedeny v kapitole 3.1.3.

3.3 IQRF

3.3.1 MICRORISC

Komunikační moduly proprietární technologie IQRF vyráběné a vyvíjené firmou MICRORISC pocházející z České Republiky, jsou osazovány komunikačními moduly a mikrokontroléry od firmy Microchip, se kterou spolupracuje a zastupuje ji v České, Slovenské a Polské republice. Všechny moduly lze zasunout do konektoru KON-SIM-02 (viz *Obr. 24*) pro SIM karty.

- TR-72D [66]

Komunikační modul TR-72D s funkcí transceiveru je osazen komunikačním čipem SPIRIT1 od STMicroelectronics, 8 bitovým mikrokontrolérem PIC16LF1938-I/MV od Microchip, teplotním senzorem a také 2 LED diodami.

Funkce - frekvence 868 MHz a 915 MHz

- napájecí napětí 3,1 V až 5,3 V
- spotřeba v režimu spánku 1,7 μ A
- spotřeba při příjmu 12,1 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 21,5 mA
- citlivost přijímače -101 dBm
- vysílací výkon 10 dBm

- 6 GPIO
- konektivita UART, SPI, I²C
- paměť EEPROM 32 KB
- 10 bitový A/D převodník s 2 kanály, analogový komparátor, PWM, časovače

- TR-75D [67]

Komunikační modul TR-75D je osazen stejným komunikačním čipem i mikrokontrolérem jako TR-72D s absencí teplotního senzoru, čímž je ušetřeno několik GPIO pinů.

Funkce - frekvence 868 MHz a 915 MHz

- napájecí napětí 3 V až 3,4 V
- spotřeba v režimu spánku 56 nA
- spotřeba při příjmu 11,8 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 21,5 mA
- citlivost přijímače -101 dBm
- vysílací výkon 11 dBm
- 9 GPIO a 1 pin pouze jako vstup
- konektivita UART, SPI, I²C
- paměť EEPROM 32 KB
- 10 bitový A/D převodník s 3 kanály, analogový komparátor, PWM, časovače

- TR-76D [68]

Komunikační modul TR-76D je osazen stejným komunikačním čipem i mikrokontrolérem jako TR-72D s absencí teplotního senzoru a dvou indikačních LED diod, čímž jsou ušetřeny GPIO piny.

Funkce - frekvence 868 MHz

- napájecí napětí 3 V až 3,4 V
- spotřeba v režimu spánku 56 nA
- spotřeba při příjmu 11,8 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 21,5 mA
- citlivost přijímače -101 dBm
- vysílací výkon 10 dBm

- 11 GPIO a 1 pin pouze jako vstup
 - konektivita UART, SPI, I²C
 - paměť EEPROM 32 KB
 - 10 bitový A/D převodník se 4 kanály, D/A převodník, analogový komparátor, PWM, časovače
- TR-77D [69]

Komunikační modul TR-77D je také osazen stejnými komponenty jako TR-72D, ale s tím rozdílem, že není omezen počet dostupných GPIO kvůli teplotnímu senzoru a dvěma LED diodám jako je tomu u TR-75D a TR-76D.

Funkce - frekvence 868 MHz

- napájecí napětí 3 V až 3,4 V
- spotřeba v režimu spánku 56 nA
- spotřeba při příjmu 11,8 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 21,5 mA
- citlivost přijímače -101 dBm
- vysílací výkon 10 dBm
- 11 GPIO a 1 pin pouze jako vstup
- konektivita UART, SPI, I²C
- paměť EEPROM 32 KB
- 10 bitový A/D převodník se 4 kanály, D/A převodník, analogový komparátor, PWM, časovače

3.4 Z-Wave

3.4.1 Silicon Laboratories

- ZGM130S [70]

Komunikační modul ZGM130S s funkcí transceiveru je tzv. SiP systém osazený komunikačním čipem a 32 bitovým procesorovým jádrem ARM Cortex-M4. Provedení je v pouzdře LGA-64 (viz *Obr. 16*).

Funkce - frekvence 868 MHz a 915 MHz (779 MHz až 956 MHz)

- napájecí napětí 1,8 V až 3,8 V
- spotřeba v režimu spánku 0,8 μ A
- spotřeba při příjmu 9,8 mA

- spotřeba pro vysílání maximální výkonem 40,7 mA
- citlivost přijímače -97,9 dBm
- vysílací výkon 13 dBm
- 32 GPIO
- konektivita USART, SPI, I²C
- paměť FLASH 512 kB, paměť RAM 64 kB
- 12 bitový A/D převodník, 12 bitový napěťový D/A převodník se 2 kanály, 4 bitový proudový D/A převodník, 2 analogové komparátory, PWM, časovače a čítače

- ZM5101 [71]

Komunikační modul ZM5101 s funkcí transceiveru je tzv. SiP systém osazený komunikačním čipem a 8 bitovým procesorovým jádrem 8051. Provedení je v pouzdře QFN-56 (viz *Obr. 17*).

Funkce – frekvence 868 MHz a 915 MHz (865,2 MHz až 926,3 MHz)

- napájecí napětí 2,3 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 1 μ A
- spotřeb při příjmu 32,4 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 45,4 mA
- citlivost přijímače -105 dBm
- vysílací výkon 6 dBm
- 30 GPIO
- konektivita UART, SPI, USB
- paměť FLASH 128 kB, paměť RAM 16 kB
- 12 bitový A/D převodník se 4 kanály, PWM, časovače a čítače

- ZM5304 [72]

ZM5304 je komunikační čip s funkcí transceiveru vyráběný v pouzdře QFN-32 (viz *Obr. 14*) osazený 8 bitovým procesorovým jádrem 8051. I přestože je osazeno procesorové jádro, je potřeba připojení k externímu mikrokontroléru, který s komunikačním čipem komunikuje pomocí SPI či USB rozhraní.

Funkce - frekvence 868 MHz a 915 MHz (865,2 MHz až 926,3 MHz)

- napájecí napětí 2,3 V až 3,6 V

- spotřeba v režimu spánku 1,7 μ A
- spotřeb při příjmu 32,7 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 42,7 mA
- citlivost přijímače -103 dBm
- vysílací výkon 4 dBm
- konektivita UART, USB

3.5 Nb-IoT

3.5.1 Nordic Semiconductor

- nRF9160 [73]

Komunikační modul nRF9160 s funkcí transceiveru je tzv. SiP systém se zabudovaným komunikačním čipem, procesorovým jádrem ARM Cortex-M33 a GPS přijímačem. Podporuje připojení externí SIM karty, ale integruje i eSIM kartu. Provedení je v pouzdře LGA-127 (viz *Obr. 18*).

Funkce - frekvence 700 MHz až 2200 MHz

- napájecí napětí 3 V až 5,5 V
- spotřeba v režimu spánku 4 μ A
- spotřeba při příjmu 45 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 255 mA až 365 mA (v závislosti na frekvenci)
- citlivost přijímače -114 dBm
- vysílací výkon 23 dBm
- 32 GPIO
- konektivita UART, SPI, I²C, I²S
- paměť FLASH 1 MB, paměť RAM 256 kB
- 12 bitový A/D převodník s 8 kanály, PWM, časovače a čítače

3.5.2 Quectel

- BC95-G [74]

Komunikační čip s funkcí transceiveru je dodáván v pouzdře s 54 LCC piny a s 40 LGA piny (*Obr. 19*). Podporuje připojení pouze externí SIM karty.

Funkce - frekvence 700 MHz až 2100 MHz

- napájecí napětí 3,1 V až 4,2 V
- spotřeba v režimu spánku 3 μ A
- spotřeba při příjmu 60 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 220 mA až 280 mA (v závislosti na frekvenci)
- citlivost přijímače -130 dBm
- vysílací výkon 23 dBm
- konektivita UART

3.5.3 u-blox

- SARA-R410M-02B [75]

Komunikační čip SARA-R410M-02B s funkcí transceiveru a podporou celosvětově používaných frekvencí je vyráběn v pouzdře LGA-96 (*Obr. 20*). Podporuje připojení pouze externí SIM karty.

Funkce - frekvence 700 MHz až 1900 MHz

- napájecí napětí 3 V až 4,3 V
- spotřeba v režimu spánku 8 μ A
- spotřeba při příjmu 60 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 140 mA
- citlivost přijímače -114 dBm
- vysílací výkon 23 dBm
- 6 GPIO
- konektivita UART, USB, I²C

3.6 6LoWPAN

3.6.1 Integrated Device Technology

- ZWIR4512 [76]

Komunikační modul ZWIR4512 s funkcí transceiveru je osazen komunikačním čipem ZWIR4502 a 32 bitovým mikrokontrolérem STM32F103RC s procesorovým jádrem ARM Cortex-M3. Je vyráběn ve dvou verzích, první verze ZWIR4512AC1 je v pouzdře LGA-30 (viz *Obr. 21*) a druhá verze ZWIR4512AC2 v pouzdře LGA-32 (viz *Obr. 22*).

Funkce - frekvence 868 MHz a 915 MHz (865 MHz až 928 MHz)

- napájecí napětí 2 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 3,5 μ A
- spotřeba při příjmu 10,5 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 24 mA
- citlivost přijímače -110 dBm
- vysílací výkon 10 dBm
- 19/21 GPIO (ZWIR4512AC1/ ZWIR4512AC2)
- konektivita UART, SPI, I²C, USB, CAN
- paměť FLASH 192 kB, paměť RAM 32 kB
- 12 bitový A/D převodník s 16 kanály, 12 bitový D/A převodník s 2 kanály, PWM, časovače

- ZWIR4532 [77]

Komunikační modul je osazen komunikačním čipem a 32 bitovým mikrokontrolérem STM32L071xZ s procesorovým jádrem ARM Cortex-M0+. Provedení je v pouzdře LGA-43 (viz *Obr. 23*).

Funkce - frekvence 868 MHz a 915 MHz (865 MHz až 928 MHz)

- napájecí napětí 1,8 V až 3,3 V
- spotřeba v režimu spánku 1 μ A
- spotřeba při příjmu 10 mA
- spotřeba 16 mA (při vysílání výkonem 0 dBm)
- citlivost přijímače -110 dBm
- vysílací výkon 10 dBm
- 31 GPIO
- konektivita UART, SPI, I²C
- paměť FLASH 192 kB, paměť RAM 20 kB
- 12 bitový A/D převodník s 10 kanály, 2 analogové komparátory, PWM, časovače a čítače

3.6.2 Atmel

- AT86RF233

Komunikační čip AT86RF233 podporuje více standardů, konkrétně 6LoWPAN, ZigBee a 802.15.4. Jeho funkce jsou uvedeny v kapitole 3.7.1.

3.7 Zigbee

3.7.1 Atmel

- AT86RF233 [78]

Komunikační čip AT86RF233 s funkcí transceiveru pracuje ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz a podporuje standardy IEEE 802.15.4, ZigBee a 6LoWPAN. Provedení je v pouzdře QFN-32 (viz *Obr. 14*).

Funkce - frekvence 2,4 GHz

- napájecí napětí 1,8 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 20 nA
- spotřeba při příjmu 11,8 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 13,8 mA
- citlivost přijímače -101 dBm
- vysílací výkon 4 dBm
- konektivita SPI

3.7.2 Silicon Laboratories

- EFR32MG12 [79]

Komunikační modul EFR32MG12 je tzv. SoC systém s funkcí transceiveru osazený komunikačním čipem, který podporuje široké spektrum celosvětově používaných ISM frekvenčních pásem a také frekvenční pásmo 2,4 GHz. Je osazen 32 bitovým procesorovým jádrem ARM Cortex-M4 a vyráběný v pouzdrech QFN-48 (viz *Obr. 13*), QFN-68 (viz *Obr. 26*) a BGA-125 (viz *Obr. 27*). V jednotlivých pouzdrech se liší výbava počtem GPIO a velikostí paměti FLASH a RAM. Podporuje standardy ZigBee, Bluetooth 5 Low Energy, Thread, atd.

Funkce - frekvence 169 MHz až 2,4 GHz

- napájecí napětí 1,8 V až 3,8 V
- spotřeba v režimu spánku 1,5 μ A
- spotřeba při příjmu 13 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 79,7 mA až 131 (v závislosti na frekvenci)
- citlivost přijímače až -126,2 dBm
- vysílací výkon 19 dBm (2,4 GHz), 20 dBm (169 MHz až 915 MHz)
- 28 až 65 GPIO
- konektivita USART, SPI, I²C
- paměť FLASH 512/1024 kB, paměť RAM 64/128/256 kB
- 12 bitový A/D převodník, 2 analogové komparátory, 2 napěťové 12 bitové D/A převodníky, proudový D/A převodník, PWM, časovače a čítače

3.7.3 STMicroelectronics

- STM32WB55 [80]

Komunikační modul STM32WB55 je osazen komunikačním čipem s funkcí transceiveru ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz a 32 bitovým procesorovým jádrem ARM Cortex-M0+. Provedení je v pouzdrech UQFN-48 (viz *Obr. 13*) a VQFN-68 (viz *Obr. 26*), kde se liší počtem GPIO a velikost paměti FLASH a RAM. Podporuje standardy ZigBee, Bluetooth 5 Low Energy, Thread, IEEE 802.15.4, atd. Pro vývojové účely je dostupný kit P-NUCLEO-WB55 obsahující Nucleo68, který je osazený komunikačním modulem v pouzdře VQFN-68, a USB klíč osazený komunikačním modulem v pouzdře UQFN-48.

Funkce - frekvence 2,4 GHz

- napájecí napětí 1,71 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 600 nA
- spotřeba při příjmu 7,9 mA (BLE)/9,2 mA (802.15.4)
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 12,7 mA (BLE)/11,7 mA (802.15.4)
- citlivost přijímače -96 dBm (BLE)/-100 dBm (802.15.4)
- vysílací výkon 6 dBm (BLE)/5,7 dBm (802.15.4)
- 30/49 GPIO
- konektivita USART, SPI, I²C, USB
- paměť FLASH 256/512 KB nebo 1 MB, paměť RAM 128/256 KB

- 16 bitový A/D převodník s 13/19 kanály, 2 analogové komparátory, LCD řadič, PWM, čítače a časovače

3.7.4 Nordic Semiconductor

- nRF52840

Komunikační modul nRF52840 podporuje standardy ZigBee, Bluetooth 5 Low Energy, Thread, 802.15.4 a další. Jeho funkce jsou uvedeny v kapitole 3.8.2.

3.8 Bluetooth 5 Low Energy

3.8.1 Toshiba

- TC35680FSG-002 [81]

Komunikační modul TC35680FSG-002 s funkcí transceiveru je osazen komunikačním čipem a 32 bitovým procesorovým jádrem ARM Cortex-M0. Provedení je v pouzdře QFN-40 (viz *Obr. 25*).

Funkce - frekvence 2,4 GHz

- napájecí napětí 1,9 V až 3,6 V
- spotřeba v režimu spánku 50 nA
- spotřeba při příjmu 5,6 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 11 mA
- citlivost přijímače -105 dBm
- vysílací výkon 8 dBm
- konektivita UART, SPI, I²C
- 18 GPIO
- paměť FLASH 128 KB, paměť RAM 144 KB
- 10 bitový A/D převodník s 5 kanály, PWM, čítače a časovače

3.8.2 Nordic Semiconductor

- nRF52840 [82]

Komunikační modul nRF52840 s funkcí transceiveru je tzv. SoC systém osazený komunikačním čipem, který podporuje standardy Bluetooth 5 Low Energy, ZigBee, Thread, 802.15.4 a další. Obsahuje 32 bitové procesorové jádro ARM Cortex-M4 a je proveden v pouzdrech aQFN-73 (viz *Obr. 28*) a WLCSP-93 (viz *Obr. 29*).

Funkce - frekvence 2,4 GHz

- napájecí napětí 1,7 V až 5,5 V
- spotřeba v režimu spánku jednotky μA
- spotřeba při příjmu 4,6 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 16,4 mA
- citlivost přijímače -103 dBm
- vysílací výkon 8 dBm
- 48 GPIO
- konektivita UART, SPI, I²C, USB
- paměť FLASH 1 MB, paměť RAM 256 kB
- 12 bitový A/D převodník s 8 kanály, PWM, čítače a časovače, analogový komparátor

3.8.3 Silicon Laboratories

- BGM13S [83]

Komunikační modul BGM13S s funkcí transceiveru je osazen 32 bitovým procesorovým jádrem ARM Cortex-M4. Provedení je v pouzdře s 52 piny.

Funkce - frekvence 2,4 GHz

- napájecí napětí 1,8 V až 3,8 V
- spotřeba v režimu spánku 1,4 μA
- spotřeba při příjmu 11,5 mA
- spotřeba při vysílání maximálním výkonem 122,7 mA
- citlivost přijímače -102,1 dBm
- vysílací výkon 18 dBm
- 32 GPIO
- konektivita USART, SPI, I²C
- paměť FLASH 512 kB, paměť RAM 64 kB
- 12 bitový A/D převodník, 2 napěťové 12 bitové D/A převodníky, proudový D/A převodník, 2 analogové komparátory, PWM, časovače a čítače

- EFR32MG12

Komunikační modul EFR32MG12 podporuje standardy Bluetooth 5 Low Energy, ZigBee, Thread, atd. Jeho funkce jsou uvedeny v kapitole 3.7.2.

3.8.4 STMicroelectronics

- STM32WB55

Komunikační modul STM32WB55 podporuje standardy Bluetooth 5 Low Energy, ZigBee, Thread, IEEE 802.15.4, atd. Jeho funkce jsou uvedeny v kapitole 3.7.3.

3.9 Porovnání

Výše uvedený seznam komunikačních modulů a čipů je pouze základním přehledem od několika výrobců polovodičových součástek. Výrobců je mnohem více, ale pro nastínění dostupných možností a vzhledem k rozsahu bylo vybráno ke každé technologii nejvýš 5 výrobců. Snahou bylo primárně vybrat moduly a čipy nejnověji uvedené na trh, aktuálně dostupné a vyráběné. Při bližším pohledu na tyto moduly a čipy je patrné, že se i v rámci jedné technologie jejich některé funkce značně liší. Z toho důvodu je nutné předem znát pro jakou aplikaci daný modul či čip vybíráme. Samostatný komunikační čip je více variabilní, co se týče výběru mikrokontroléru a připojených periférií k němu. Výhodou je možnost výběru přesně toho co potřebujeme, ale obecně na úkor větších rozměrů, což v některých případech, kde jsme omezeni prostorem, není žádoucí. Dále je v tomto případě zvýšena spotřeba elektrické energie, což je problém, pokud je zařízení umístěno tam, kde nelze častěji měnit či dobít napájecí baterie. Spolehlivost takového zařízení je také nižší, než integrovaný komunikační modul v jednom pouzdře. Integrované komunikační moduly přináší nižší spotřebu elektrické energie, menší rozměry, což je v případě nemožnosti časté výměny či dobíjení baterie výhodné. Na druhou stranu variabilita periférií, aniž bychom je připojili externě, je značně omezena výrobcem. Pokud bychom je totiž připojili externě, přicházíme o výhody integrovaného modulu. Většina modulů a čipů nabízí širší rozsah frekvencí, na kterých může komunikovat, což je výhodné, pokud je zařízení určeno pro celosvětové použití, kde jsou používané frekvence odlišné. Některé moduly podporují více komunikačních standardů, mezi kterými lze přepínat, což je výhodné pro použití v bráně, ale i v koncových zařízeních. Díky tomu lze k bráně připojit více zařízení používající různé standardy. V koncových zařízeních může počáteční

nastavení vyžadovat vyšší přenosovou rychlost, na což lze využít jiného standardu, než pro následující komunikaci. Konektivita pro připojení periférií nebo naprogramování, je u všech modulů a čipů zajištěna synchronními či asynchronními sériovými rozhraními.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá velice perspektivním tématem, které je v současné době na vzestupu a je velice diskutované. Jejím cílem bylo v úvodní části uvést čtenáře do problematiky internetu věcí a sestavit ucelený přehled aktuálně dostupných a nejpoužívanějších komunikačních technologií napříč ISO/OSI modelem s uvedením jejich základních vlastností a kritérií. Poté pro každou jednotlivou technologii uvést dostupné komunikační moduly a čipy s jejich základními funkcemi.

V první kapitole byl čtenář seznámen s problematikou internetu věcí, konkrétními uplatněními v praxi, prvky této sítě, vlastnostmi a kritérii pro výběr vhodné technologie, topologiemi a ISO/OSI modelem. Následující kapitola uvádí vybrané komunikační technologie s jejich vlastnostmi a kritérii. V poslední kapitole je seznam aktuálně dostupných komunikačních modulů a čipů pro každou z technologií.

Při vypracovávání vyvstal několikrát problém s nedostupností dostatku potřebných informací k určitým komunikačním technologiím. Důvodem je, že některé z těchto technologií jsou proprietární, a tudíž je většina podrobnějších informací veřejně nedostupná nebo jsou dostupné za nemalý poplatek. U komunikačních modulů a čipů byl problém obdobný s tím rozdílem, že informace byly dostupné až po registraci na stránce výrobce či pouze na vyžádání. Tato skutečnost mi přijde z pohledu výrobce kontraproduktivní, protože by mělo být jeho zájmem informace zpřístupnit co nejjednodušším způsobem pro zajištění odbytu jeho výrobků.

Výsledná práce by měla sloužit pro nasměrování případného zájemce o sestavení sítě založené na internetu věcí k výběru vhodné technologie a komunikačního modulu či čipu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČERMÁK, Petr a KRAMNÝ, Tomáš, 2018. *Technologie IoT* [online]. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc [Cit. 25.2.2019]. Dostupné z: <https://mvso.cz/wp-content/uploads/2018/02/Technologie-IoT-studijn%C3%AD-text.pdf?fbclid=IwAR0SfIpaDAYQrcVX3wre5jm8xbILexLtxrd8dUsol8gAZ75kBPiZtIjdt6k>
- [2] CITIQ, 2017. *Technologie. CITIQ* [online]. CITIQ [Cit. 25. 2. 2019]. Dostupné z: <http://www.citiq.cz/technologie.html>
- [3] PROTRONIX, 2018. *Nezařazené. PROTRONIX* [online]. PROTRONIX [Cit 25. 2. 2019]. Dostupné z: <https://www.careforair.eu/projekt-zdrava-skola/>
- [4] IoT.water, 2019. *Naše řešení. IoT.water* [online]. IoT.water [Cit. 25. 2. 2019]. Dostupné z: <https://www.iot-water.cz/cz/>
- [5] KUMAR, Chanaky a KHARDE, Sagar. D, 2015. Natural Disasters Alert System Using Wireless Sensor Network. *IJEDR* [online]. 2015, 4(5) [Cit. 25. 2. 2019]. ISSN: 2321-9939. Dostupné z: <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1504096.pdf>
- [6] DAŘO, Stanislav a KREIDL, Marcel, 1996. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické. 316 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [7] DESAI, Nisarg, 2016. What is an IoT Gateway and How Do I Keep It Secure?. In: *GlobalSign* [online]. 30. 8. 2016 [Cit 27. 2. 2019]. Dostupné z: <https://www.globalsign.com/en/blog/what-is-an-iot-gateway-device/>
- [8] TREADWAY, John, 2018. Using an IoT gateway to connect the 'things' to the cloud. In: *TechTarget* [online]. 10. 10. 2018. [Cit. 27. 2. 2019]. Dostupné z: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/feature/Using-an-IoT-gateway-to-connect-the-Things-to-the-cloud>
- [9] ROUSE, Margaret, 2017. IoT gateway. In: *Techtarget* [online]. 11. 11. 2017 [Cit. 27. 2. 2019]. Dostupné z: <https://whatis.techtarget.com/definition/IoT-gateway>
- [10] *Microcontroller*, 2019 [online]. Wikipedia. [Cit. 28. 2. 2019]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>
- [11] SOVA MARTINOVSKÝ, Václav, 2017. Cloud Computing: Vývoj a současný stav. *Trendy v podnikání*. Roč. 7, č. 2, s. 10-17. ISSN 1805-06032017.
- [12] *Cloud computing*, 2019 [online]. Wikipedia. [Cit. 28. 2. 2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing
- [13] *Network topology*, 2019 [online]. Wikipedia. [Cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Network_topology
- [14] RAY, Brian, 2019. What Is Mesh Topology? [A Definition]. In: *LinkLabs* [online]. 15. 9. 2019 [Cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-mesh-topology>
- [15] PACELLE, Mark, 2014. 3 topologies driving IoT networking standards. In: *O'Reilly Radar* [online]. 4. 4. 2014 [Cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: <http://radar.oreilly.com/2014/04/3-topologies-driving-iot-networking-standards.html>
- [16] PHATAK, Omkar, 2019. Advantages and Disadvantages of Tree Topology. In: *Techspirited* [online]. [Cit. 3. 3. 2019]. Dostupné z: <https://techspirited.com/tree-topology>
- [17] PETERKA, Jiří, 1992. Referenční model ISO/OSI - sedm vrstev. In: *eArchiv.cz* [online]. 23. 3. 1992 [Cit. 6. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a92/a213c110.php3>
- [18] *Referenční model ISO/OSI*, 2019 [online]. Wikipedia. [Cit. 6. 3. 2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Referen%C4%8Dn%C3%AD_model_ISO/OSI

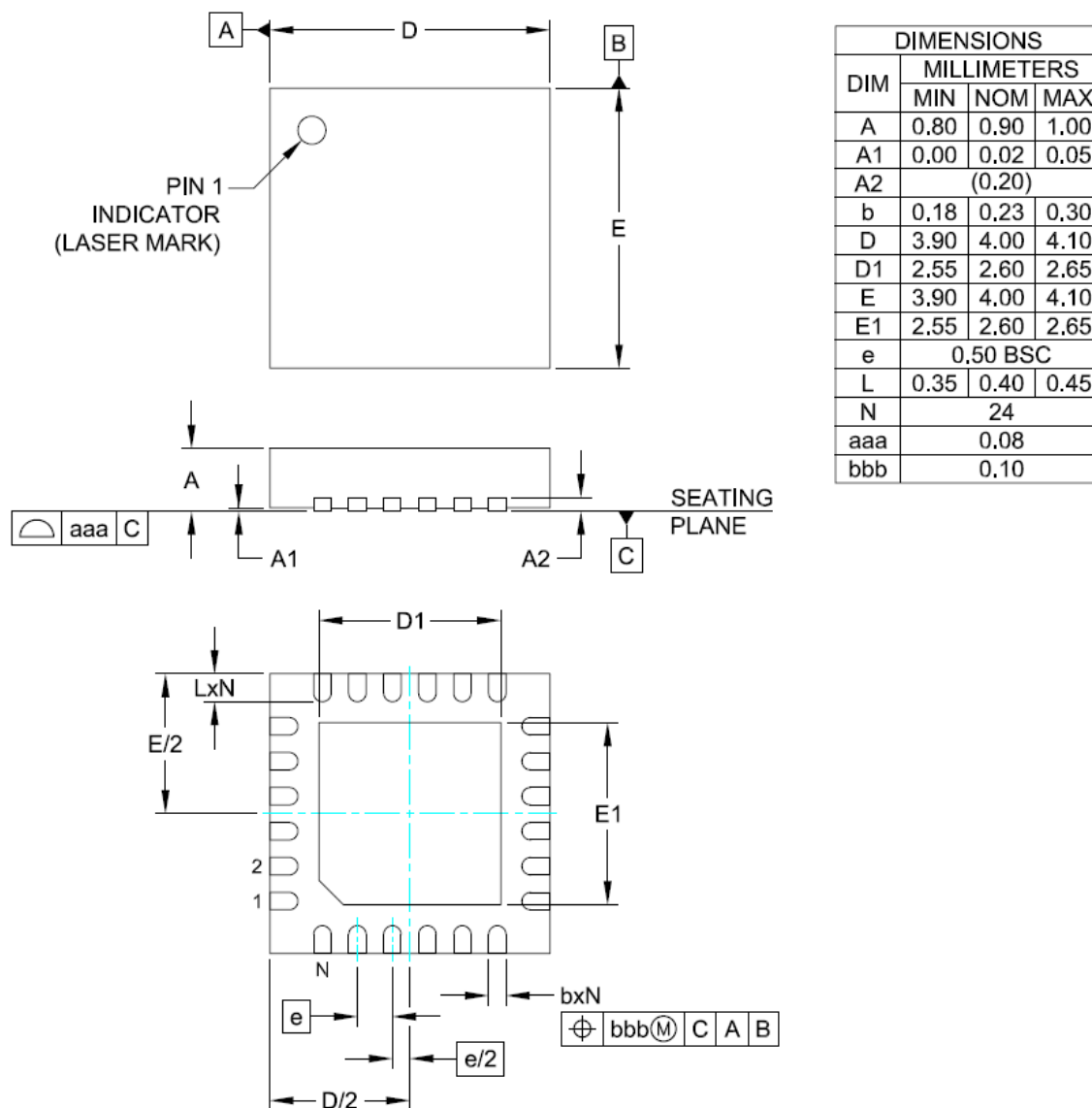
- [19] ETSI Industry Specification Group Low Throughput Networks, 2014 [online]. *Low Throughput Networks (LTN); Protocols and Interfaces*. [Cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/LTN/001_099/003/01.01.01_60/gs_ltn003v010101p.pdf
- [20] VOJÁČEK, Antonín, 2017. SIGFOX - princip, struktura, protokol, použití. In: *Vývoj.hw.cz* [online]. 26. 5. 2017 [Cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/sigfox-princip-struktura-protokol-pouziti.html>
- [21] Sigfox, 2018 [online]. *Secure Sigfox Ready™ devices Recommendation guide*. [Cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: <http://www.aerea.nl/wp-content/uploads/2018/06/Secure-Sigfox-Ready-devices-recommendation-guide-II.pdf>
- [22] Sigfox, 2019 [online]. *Sigfox connected objects: Radio specifications*. [Cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: [https://storage.sbg1.cloud.ovh.net/v1/AUTH_669d7dfced0b44518cb186841d7cbd75/dev_medias/build/4059ak1js1ywxos/Sigfox%20radio%20specifications%20v1.3%20February%202019%20\(public\).pdf](https://storage.sbg1.cloud.ovh.net/v1/AUTH_669d7dfced0b44518cb186841d7cbd75/dev_medias/build/4059ak1js1ywxos/Sigfox%20radio%20specifications%20v1.3%20February%202019%20(public).pdf)
- [23] Libelium, 2015. Wasmote Sigfox Integration. In: *Libelium* [online]. [Cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: http://www.libelium.com/wp-content/uploads/2016/05/diagrama_sigfox_libelium.jpg
- [24] Sigfox, 2017 [online]. *Sigfox Technical Overview*. [Cit. 10. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- [25] LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup, 2015 [online]. *What is LoRaWAN®*. [Cit. 15. 3. 2019]. Dostupné z: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [26] LoRa Alliance, Inc, 2017 [online]. *LoRaWAN™ 1.1 Specification*. [Cit. 15. 3. 2019]. Dostupné z: https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_v1.1.pdf
- [27] LoRa Alliance, Inc, 2017 [online]. *LoRaWAN™ SECURITY*. [Cit. 15. 3. 2019]. Dostupné z: https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/loralliance_security_whitepaper.pdf
- [28] IQRF Alliance, 2019. IQRF Technology. In: *IQRF Alliance* [online]. [Cit. 20. 3. 2019]. Dostupné z: https://www.iqrfalliance.org/img/technology/2-1000x600_technology.jpg
- [29] IQRF Alliance, 2019. About. *IQRF Alliance* [online]. IQRF Alliance [Cit. 20. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/iqrfabout>
- [30] ITU-T, 2015 [online]. *Short range narrow-band digital radiocommunication transceivers – PHY, MAC, SAR and LLC layer specifications*. [Cit. 25. 3. 2019]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9959-201501-I!!PDF-E&type=items
- [31] Sigma Designs, Inc., 2016 [online]. *Introduction to the Z-Wave Security Ecosystem*. [Cit. 25.3.2019]. Dostupné z: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0066/8149/3559/files/z-wave-security-whitepaper.pdf>
- [32] Vesternet, 2012. Pages. *Vesternet* [online]. Vesternet [Cit. 25. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.vesternet.com/pages/understanding-z-wave-networks-nodes-devices>
- [33] Honeywell, 2013 [online]. *Introduction to Z-Wave*. [Cit. 25. 3. 2019]. Dostupné z: <http://library.ademconet.com/MWT/fs2/L5210/Introductory-Guide-to-Z-Wave-Technology.PDF>

- [34] ETSI, 2017 [online]. *3GPP TS 36.331 version 13.4.0 Release 13*. [Cit. 25. 3. 2019]. Dostupné z: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136331/13.04.00_60/ts_136331v130400p.pdf
- [35] WANG, Y.-P. Eric aj., 2017. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE* [online]. 2017 [Cit. 28. 3. 2019]. Dostupné z: DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM.
- [36] MEKKI, Kais aj., 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express* [online]. France: The Korean Institute of Communications and Information Sciences. 5(1), 1-7 [Cit. 28. 3. 2019]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>
- [37] IETF, 2007 [online]. *Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks*. [Cit. 31. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc4944.txt.pdf>
- [38] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2015. *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks* [online]. New York: IEEE [Cit. 31. 3. 2019]. ISBN: 978-1-5044-0845-5. Dostupné z: DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7460875.
- [39] Texas Instruments, 2014 [online]. *6LoWPAN demystified*. [Cit. 31. 3. 2019]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/swry013/swry013.pdf>
- [40] ZigBee Alliance, Inc., 2012 [online]. *ZIGBEE SPECIFICATION*. [Cit. 3. 4. 2019]. Dostupné z: <http://www.zigbee.org/wp-content/uploads/2014/11/docs-05-3474-20-0csg-zigbee-specification.pdf>
- [41] GASCÓN, David, 2009. Security in 802.15.4 and ZigBee networks. In: *Libelium World* [online]. 28. 4. 2009 [Cit. 3. 4. 2019]. Dostupné z: <http://www.libelium.com/security-802-15-4-zigbee/>
- [42] ZigBee, 2019 [online]. Wikipedia. [Cit. 3. 4. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
- [43] Bluetooth SIG, Inc., 2016 [online]. *Bluetooth Specification Version 5.0 | Volume 0*. [Cit. 6. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.mouser.it/pdfdocs/bluetooth-Core-v50.pdf>
- [44] TOWNSEND, Kevin, CUFÍ, Carles, DAVIDSON, Robert, WANG, Chris, 2014. *Getting Started with Bluetooth Low Energy* [online]. O'Reilly Media, Inc. [Cit. 6. 4. 2019]. ISBN: 9781491949511. Dostupné z: <https://learning.oreilly.com/library/view/getting-started-with/9781491900550/>
- [45] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG., 2016 [online]. *From cable replacement to the IoT Bluetooth 5*. [Cit. 6. 4. 2019]. Dostupné z: https://bluetoothworldevent.com/__media/PDFs/Rohde--26-Schwarz_3e_Bluetooth_WhitePaper.pdf
- [46] OASIS Open, 2015 [online]. *MQTT Version 3.1.1 Plus Errata 01*. [Cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.pdf>
- [47] STANFORD-CLARK, Andy, TRUONG, Hong Linh, 2013. *MQTT For Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification Version 1.2* [online]. 14. 11. 2013 [Cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z: http://mqtt.org/new/wp-content/uploads/2009/06/MQTT-SN_spec_v1.2.pdf
- [48] PENIAK, Peter a FRANEKOVÁ, Mária, 2018. Extended Model of Secure Communication for Embedded Systems with IoT and MQTT. *IEEE* [online]. 22. 10. 2018 [Cit. 10. 4. 2019]. ISSN: 1803-7232. Dostupné z: DOI: 10.23919/AE.2018.8501434
- [49] EGLI, Peter R., 2016 [online]. *AN INTRODUCTION TO MQTT, A PROTOCOL FOR M2M AND IoT APPLICATIONS*. [Cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z:

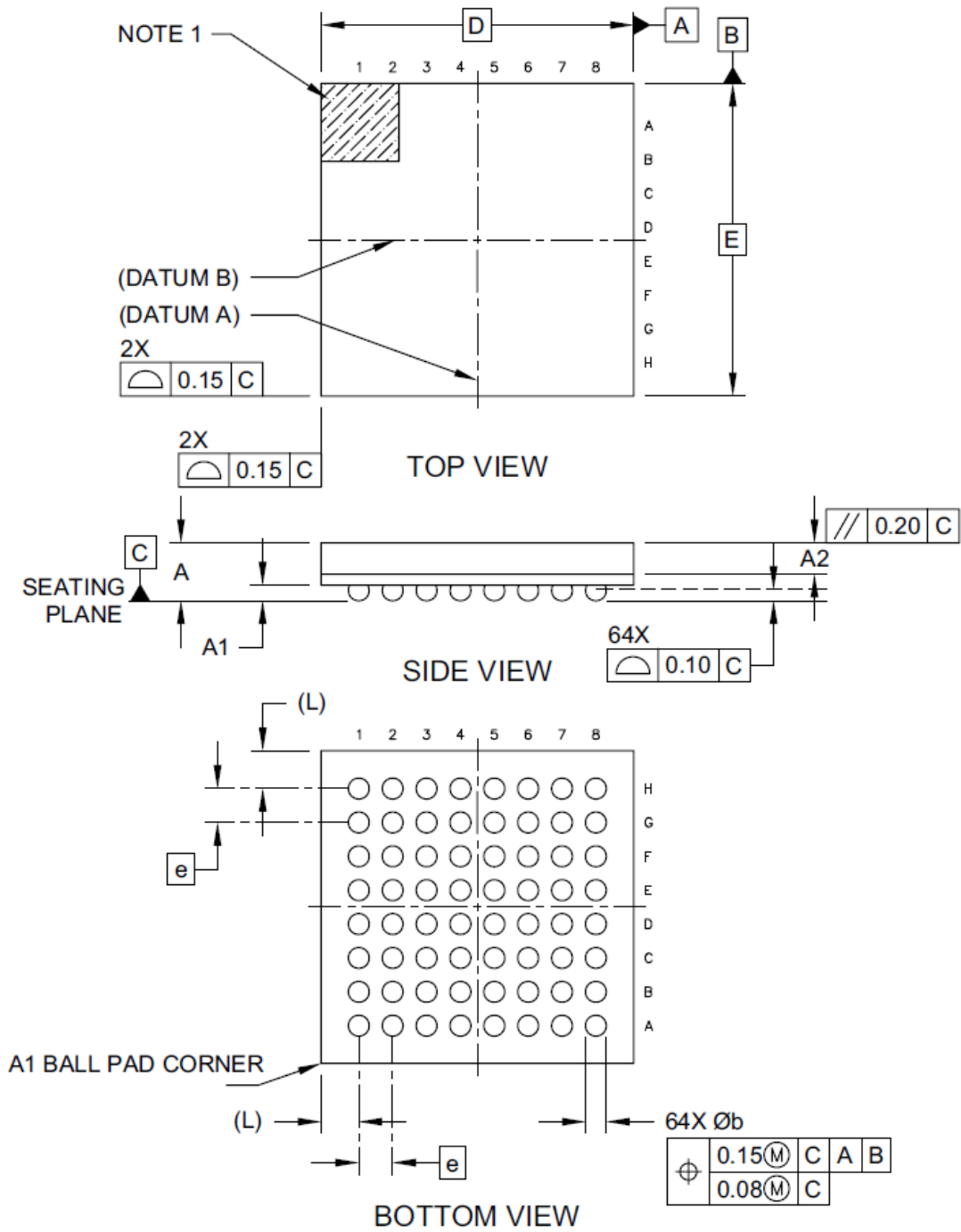
- http://www.indigoo.com/dox/wsmw/1_Middleware/MQTT
- [50] MALÝ, Martin, 2016. Protokol MQTT: komunikační standard pro IoT. In: *Root.cz* [online]. 29. 6. 2016 [Cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/protokol-mqtt-komunikacni-standard-pro-iot/>
- [51] HiveMQ, 2015. MQTT ESSENTIALS. *HiveMQ* [online]. HiveMQ [Cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.hivemq.com/tags/mqtt-essentials/>
- [52] SHELBY, Z., HARTKE, K., BORMANN, C., 2014. RFC 7252 - The Constrained Application Protocol (CoAP). *IETF* [online]. Červen 2014 [Cit. 10. 4. 2019]. ISSN: 2070-1721. Dostupné z: DOI: 10.17487/RFC7252.
- [53] AZZOLA, Francesco, 2018. CoAP Protocol: Step-by-Step Guide. In: *DZone.com* [online]. 8. 11. 2018 [Cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z: <https://dzone.com/articles/coap-protocol-step-by-step-guide>
- [54] SUZUKI, Basuke, 2015. *CoAP Talk* [online]. 29. 1. 2015 [Cit. 10. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/basuke/coap-talkmitiot>
- [55] HANES, David, SALGUEIRO, Gonzalo, GROSSETETE, Patrick, BARTON, Robert, HENRY, Jerome, 2017. *IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things*. 1.vyd. Indianapolis: Cisco Press. 576 s. ISBN-13: 978-1-58714-456-1.
- [56] Semtech, 2017 [online]. *SX1261/2 V1.1*. [Cit. 20. 4. 2019]. Dostupné z: https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1261-2_V1.1.pdf
- [57] RF Solutions Ltd., 2018 [online]. *DS-GAMMA-9*. [Cit. 22. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.rfsolutions.co.uk/downloads/1543336360DS-GAMMA-9.pdf>
- [58] Murata (China) Investment Co., Ltd., 2018 [online]. *Sub-G Module Data Sheet*. [Cit. 23. 4. 2019]. Dostupné z: https://wireless.murata.com/pub/RFM/data/type_abz.pdf
- [59] Microchip Technology Inc., 2019 [online]. *SAM R34/R35 Low Power LoRa® Sub-GHz SiP Datasheet*. [Cit. 25. 4. 2019]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-R34-R35-Low-Power-LoRa-Sub-GHz-SiP-Data-Sheet-DS70005356C.pdf>
- [60] STMicroelectronics, 2016 [online]. *STM32 Nucleo pack for LoRa® technology and high-performance FSK/OOK RF transceiver modem*. [Cit. 27. 4. 2019]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/data_brief/p-nucleo-lrwan1.pdf
- [61] NXP Semiconductors N. V., 2016 [online]. *OL2385 Industrial RF transceiver*. [Cit. 28. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/OL2385.pdf>
- [62] STMicroelectronics, 2018 [online]. *S2-LP Ultra-low power, high performance, sub-1 GHz transceiver*. [Cit. 30. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/s2-lp.pdf>
- [63] Atmel Corporation, 2015 [online]. *ATA8520 Single-Chip SIGFOX RF Transmitter*. [Cit. 2. 5. 2019]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-9372-Smart-RF-ATA8520_Datasheet.pdf
- [64] Semiconductor Components Industries, LLC, 2019 [online]. *AX-SIP-SFEU, AX-SIP-SFEU-API*. [Cit. 4. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AX-SIP-SFEU-D.PDF>
- [65] WISOL, 2017 [online]. *WISOL / WSSFM10R1AT*. [Cit. 6. 5. 2019]. Dostupné z: https://storage.sbg1.cloud.ovh.net/v1/AUTH_669d7dfced0b44518cb186841d7cbd75/prod_medias/j32nyulh_s_ds_wssfm10r1at_rev14_170517.pdf
- [66] IQRF Tech s.r.o., 2018 [online]. *TR-72D RF Transceiver Module Series*. [Cit. 9. 5. 2019]. Dostupné z: <http://iqrf.org/weben/downloads.php?id=337>

- [67] IQRF Tech s.r.o., 2018 [online]. *TR-75D RF Transceiver Module Series*. [Cit. 9. 5. 2019]. Dostupné z: <http://iqr.org/weben/downloads.php?id=529>
- [68] IQRF Tech s.r.o., 2018 [online]. *TR-76D RF Transceiver Module Series*. [Cit. 9. 5. 2019]. Dostupné z: <http://iqr.org/weben/downloads.php?id=441>
- [69] IQRF Tech s.r.o., 2018 [online]. *TR-77D RF Transceiver Module Series*. [Cit. 9. 5. 2019]. Dostupné z: <http://iqr.org/weben/downloads.php?id=536>
- [70] Silicon Laboratories Inc., 2019 [online]. *ZGM130S Z-Wave 700 SiP Module Data Sheet*. [Cit. 13. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/zgm130s-datasheet.pdf>
- [71] Silicon Laboratories Inc., 2018 [online]. *DATASHEET: ZM5101*. [Cit. 13. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/login/data-sheets/DSH12625-9.pdf>
- [72] Silicon Laboratories Inc., 2018 [online]. *DATASHEET: ZM5304*. [Cit. 13. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/login/data-sheets/DSH12461-14.pdf>
- [73] Nordic Semiconductor, 2019 [online]. *nRF9160 Product Specification v1.0*. [Cit. 20. 5. 2019]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF9160_PS_v1.0.pdf
- [74] Quectel Wireless Solutions Co., Ltd., 2019 [online]. *BC95-G Hardware Design*. [Cit. 20. 5. 2019]. Dostupné z: https://www.quectel.com/UploadImage/Downlad/Quectel_BC95-G_Hardware_Design_V1.3.pdf
- [75] u-blox, 2019 [online]. *SARA-R4/N4 series - Data Sheet*. [Cit. 20. 5. 2019]. Dostupné z: https://www.u-blox.com/sites/default/files/SARA-R4-N4_DataSheet_%28UBX-16024152%29.pdf
- [76] Integrated Device Technology, Inc., 2018 [online]. *Secure Low-Power Wireless IPv6 Module ZWIR4512 Datasheet*. [Cit. 25. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.idt.com/document/dst/zwir4512-datasheet>
- [77] Integrated Device Technology, Inc., 2018 [online]. *Low Power 6LoWPAN Communication Module ZWIR4532 Datasheet*. [Cit. 25. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.idt.com/document/dst/zwir4532-datasheet>
- [78] Atmel Corporation, 2014 [online]. *Atmel-8351E-MCU_Wireless AT86RF233_Datasheet_072014*. [Cit. 27. 5. 2019]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8351-MCU_Wireless-AT86RF233_Datasheet.pdf
- [79] Silicon Laboratories Inc., 2018 [online]. *EFR32MG12 Mighty Gecko Multi-Protocol Wireless SoC Family Data Sheet*. [Cit. 29. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/efr32mg12-datasheet.pdf>
- [80] STMicroelectronics, 2019 [online]. *STM32WB55xx*. [Cit. 29. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wb55cg.pdf>
- [81] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2019 [online]. *TC35680FSG-002/TC35681FSG-002 Bluetooth® Low Energy IC Rev 1.1*. [Cit. 31. 5. 2019]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=63562&prodName=TC35680FSG-002>
- [82] Nordic Semiconductor, 2019 [online]. *nRF52840 Product Specification v1.1*. [Cit. 31. 5. 2019]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52840_PS_v1.1.pdf
- [83] Silicon Laboratories Inc., 2018 [online]. *BGM13S Blue Gecko Bluetooth® SiP Module Data Sheet*. [Cit. 31. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/documents/login/data-sheets/bgm13s-datasheet.pdf>

4 Přílohy

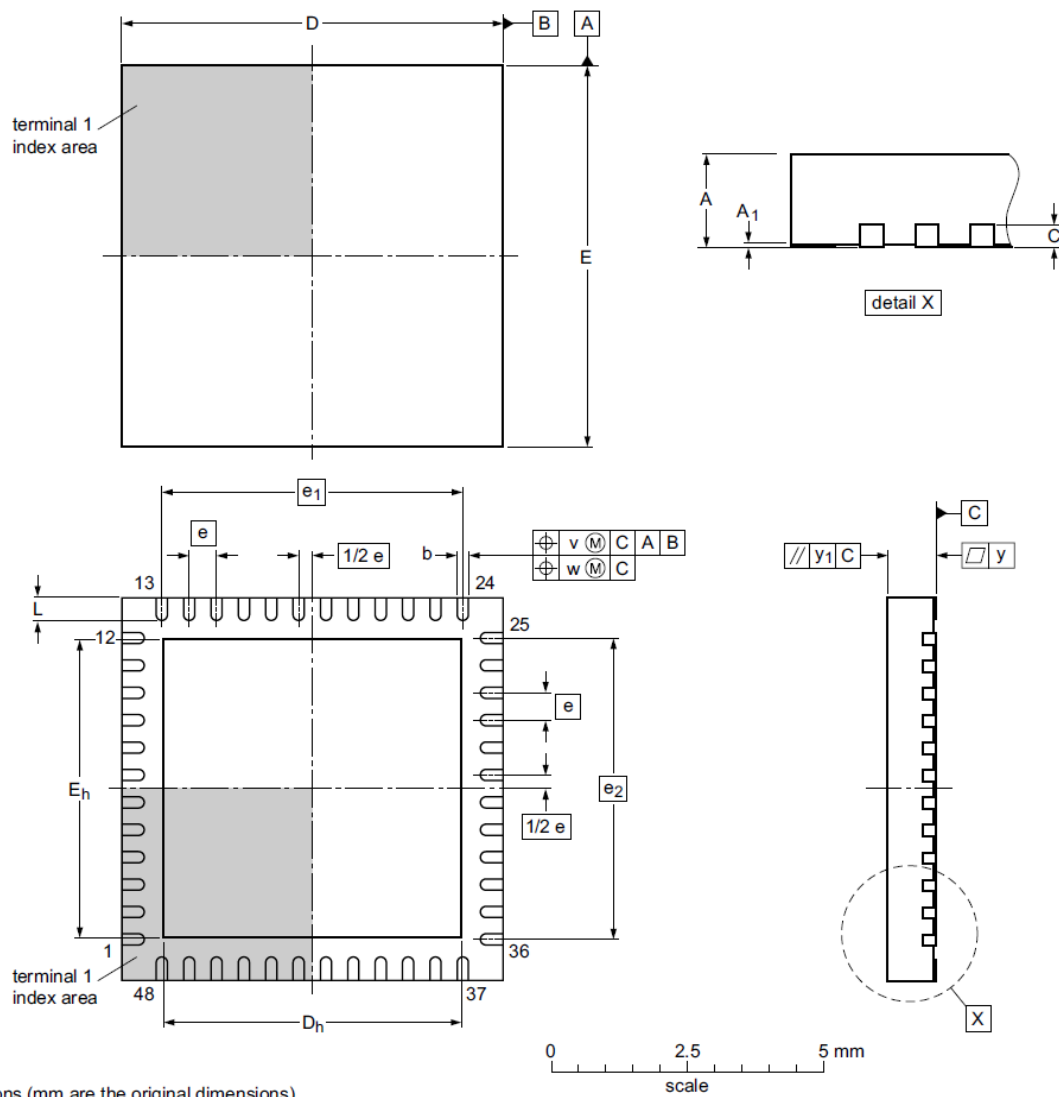


Obr. 11 Výkres a rozměry pouzdra QFN-24



Dimension Limits	Units	MILLIMETERS		
		MIN	NOM	MAX
Number of Terminals	N	64		
Pitch	e	0.65 BSC		
Overall Height	A	-	-	1.20
Ball Height	A1	0.21	0.30	-
Mold Cap Thickness	A2	0.55	0.60	0.65
Overall Length	D	6.00 BSC		
Overall Width	E	6.00 BSC		
Terminal Ball Diameter	b	0.35	0.40	0.45
Edge to Ball Center	(L)	0.725 REF		

Obr. 12 Výkres a rozměry pouzdra BGA-64



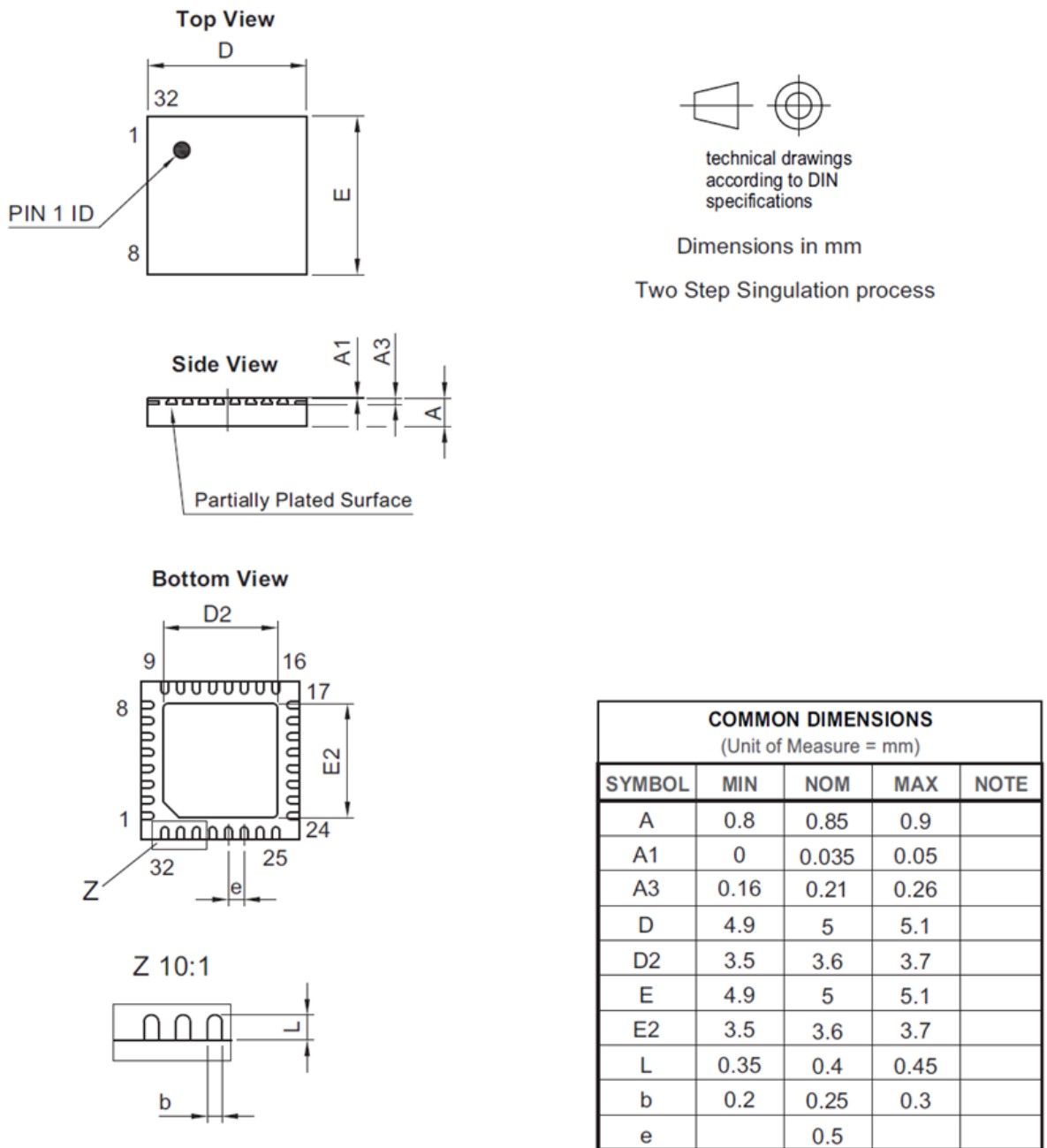
Dimensions (mm are the original dimensions)

Unit ⁽¹⁾	A ⁽¹⁾	A ₁	b	C	D	D _h	E	E _h	e	e ₁	e ₂	L	v	w	y	y ₁
max	1.00	0.05	0.30		7.1	5.65	7.1	5.65				0.5				
mm nom	0.85	0.02	0.21	0.2	7.0	5.50	7.0	5.50	0.5	5.5	5.5	0.4	0.1	0.05	0.05	0.1
min	0.80	0.00	0.18		6.9	5.35	6.9	5.35				0.3				

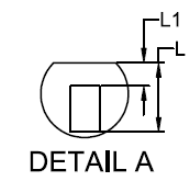
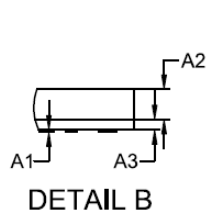
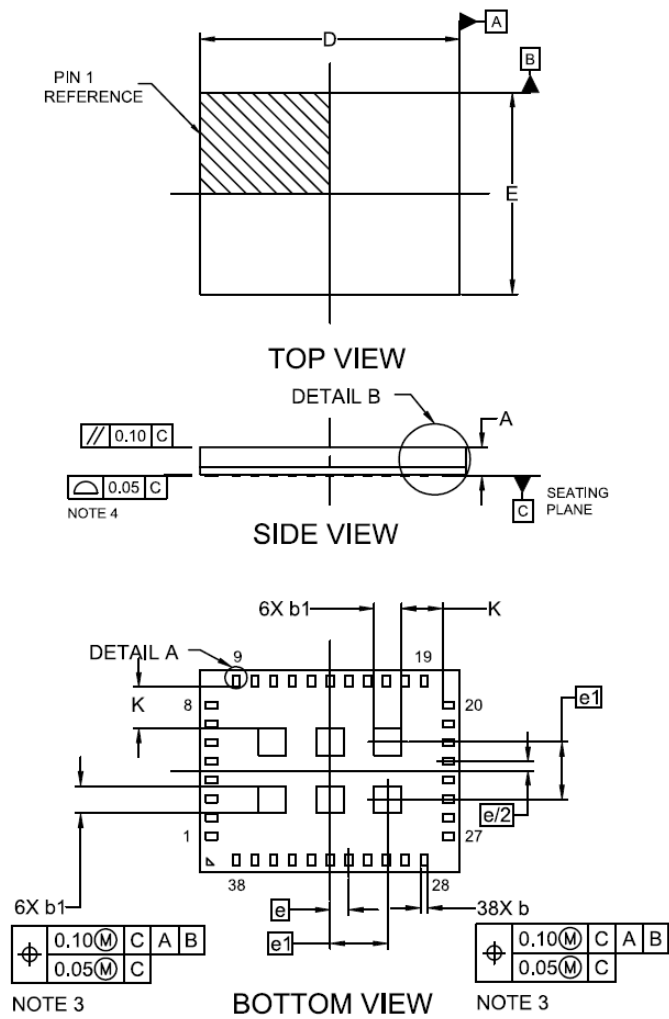
Note

1. Plastic or metal protrusions of 0.075 mm maximum per side are not included

Obr. 13 Výkres a rozměry pouzdra QFN-48



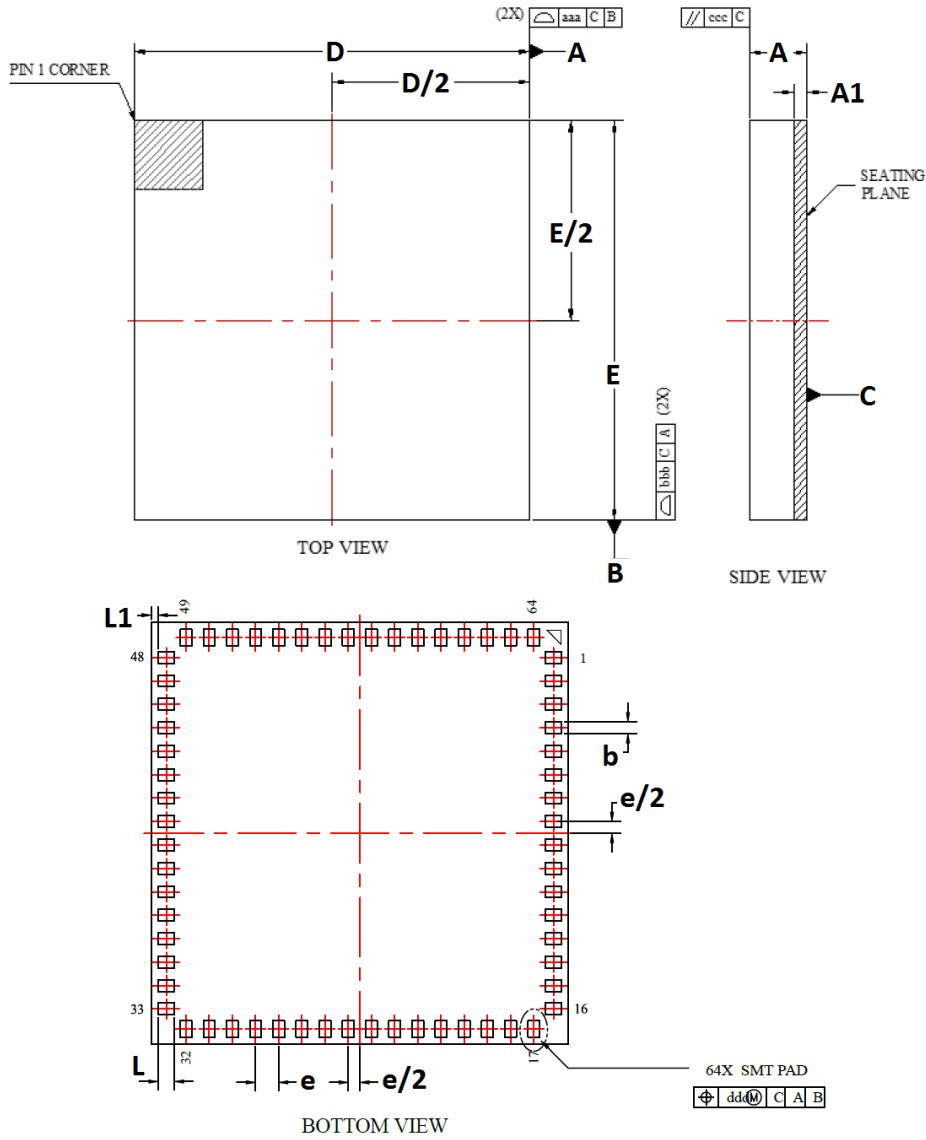
Obr. 14 Výkres a rozměry pouzdra QFN-32



DIM	MILLIMETERS		
	MIN.	NOM.	MAX.
A	—	—	0.996
A1	—	—	0.05
A2	—	0.70	0.73
A3	—	0.24	0.28
b	0.20	0.25	0.30
b1	0.90	0.95	1.00
D	8.90	9.00	9.10
E	6.90	7.00	7.10
e	0.65 BSC		
e1	2.00 BSC		
K	1.42 REF		
L	0.55	0.60	0.65
L1	0.20 REF		

- NOTES:
- DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
 - CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETERS
 - DIMENSION b and b1 APPLIES TO PLATED TERMINAL AND IS MEASURED BETWEEN 0.15 AND 0.30 MM FROM THE TERMINAL TIP.
 - COPLANARITY APPLIES TO THE EXPOSED PADS AS WELL AS THE TERMINALS.

Obr. 15 Výkres a rozměry pouzdra SIP-38

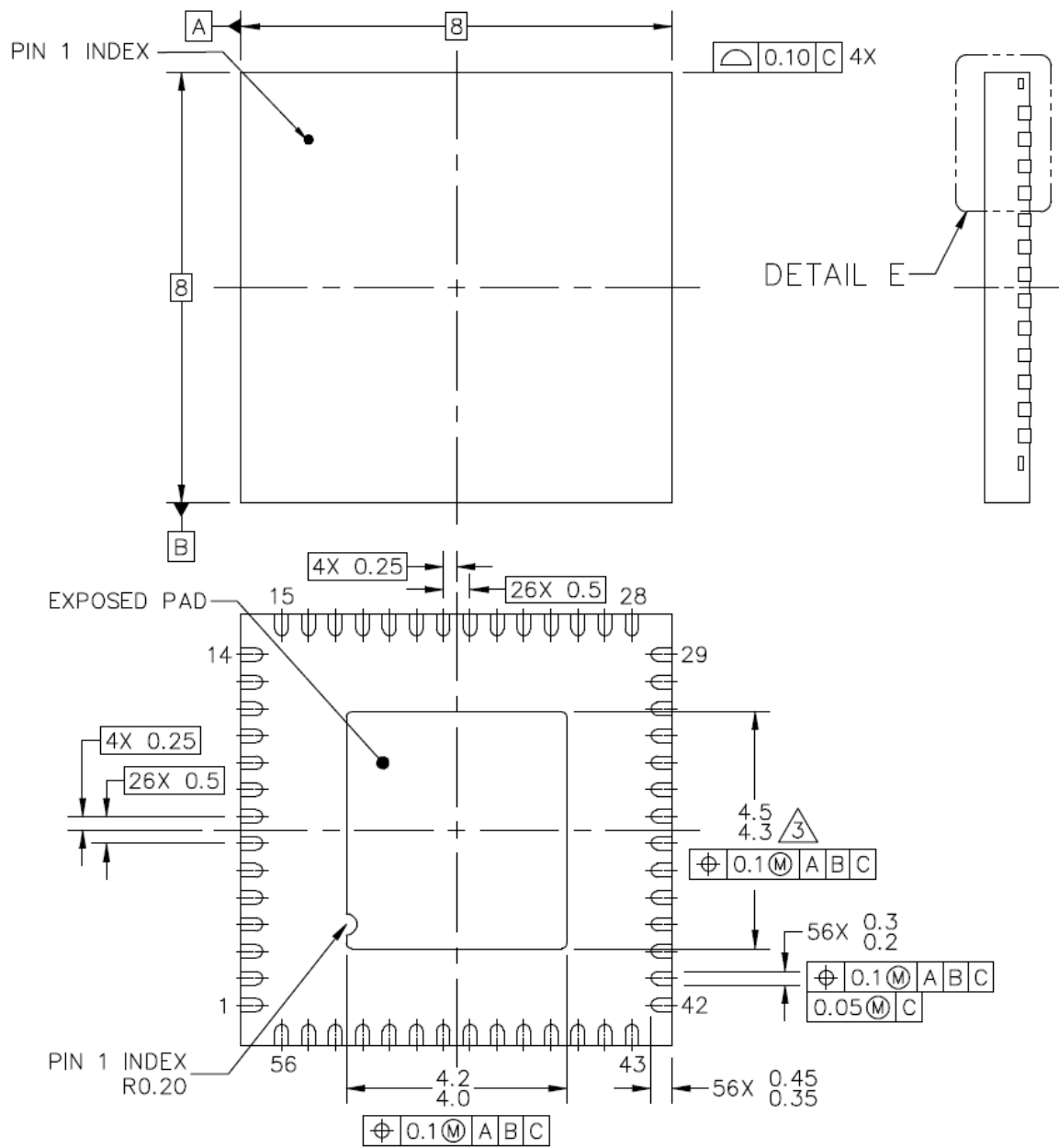


Dimension	Min	Typ	Max
A	1.12	1.21	1.30
A1	0.17	0.21	0.25
b	0.20	0.25	0.30
D	9.00 BSC		
e	0.50 BSC		
E	9.00 BSC		
L	0.30	0.35	0.40
L1	0.10	0.15	0.20
aaa	0.10		
bbb	0.10		
ccc	0.10		
ddd	0.10		

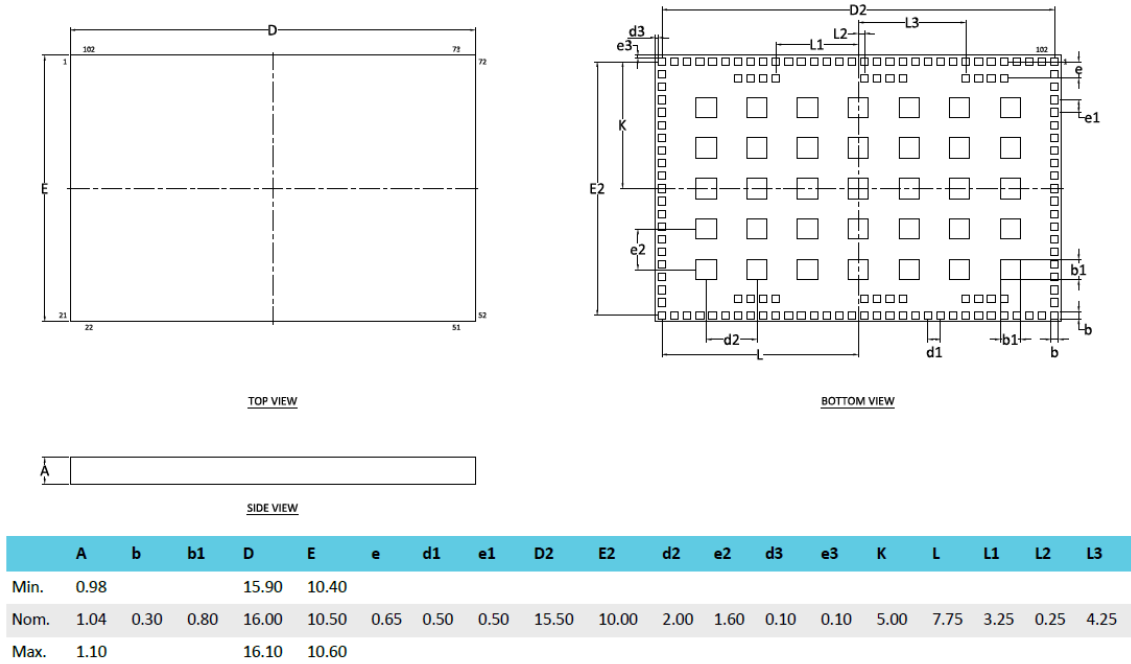
Note:

1. All dimensions shown are in millimeters (mm) unless otherwise noted.
2. Dimensioning and Tolerancing per ANSI Y14.5M-1994.
3. This drawing conforms to the JEDEC Solid State Outline MO-220.
4. Recommended card reflow profile is per the JEDEC/IPC J-STD-020 specification for Small Body Components.

Obr. 16 Výkres a rozměry pouzdra LGA-64



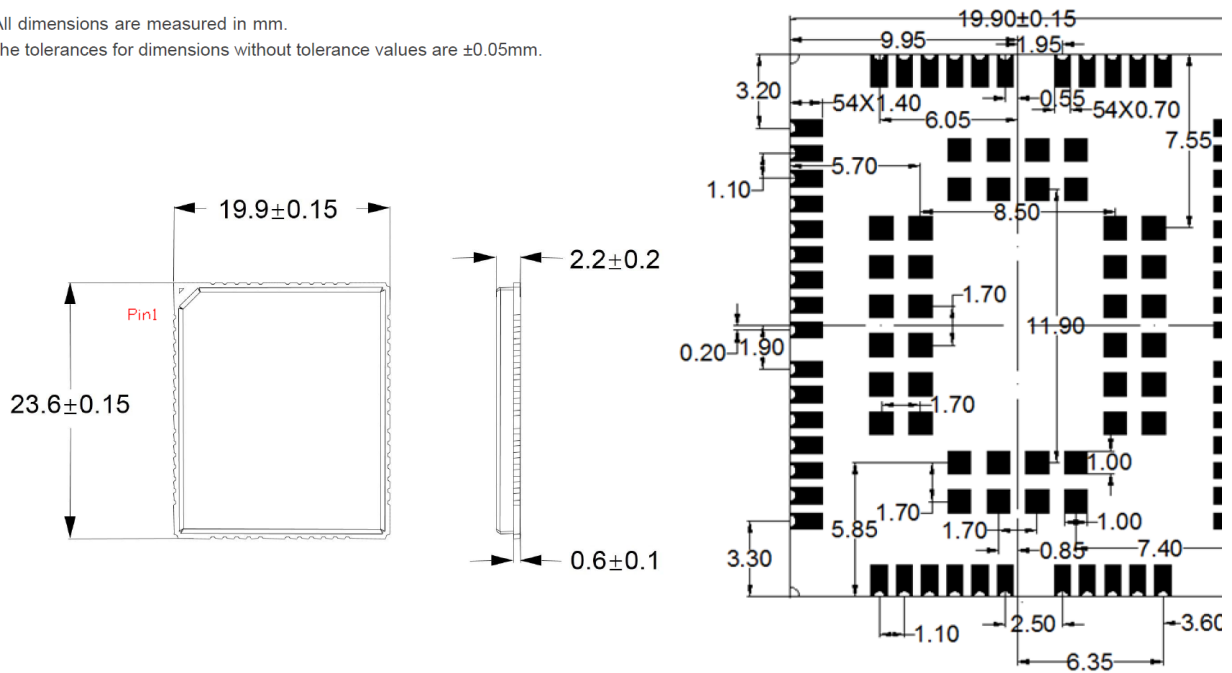
Obr. 17 Výkres a rozměry pouzdra QFN-56



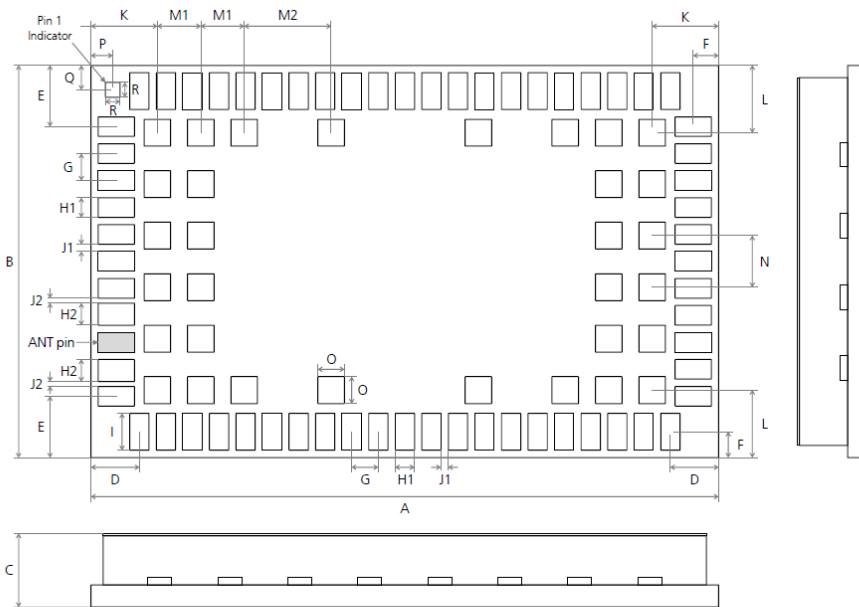
LGA dimensions in millimeters

Obr. 18 Výkres a rozměry pouzdra LGA-127

All dimensions are measured in mm.
The tolerances for dimensions without tolerance values are $\pm 0.05\text{mm}$.

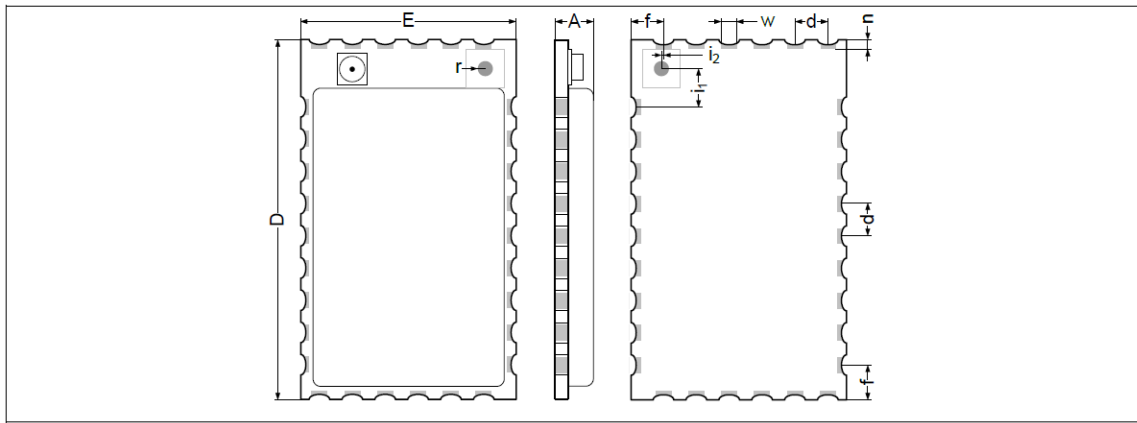


Obr. 19 Výkres a rozměry pouzdra s 54 LCC piny a s 40 LGA piny



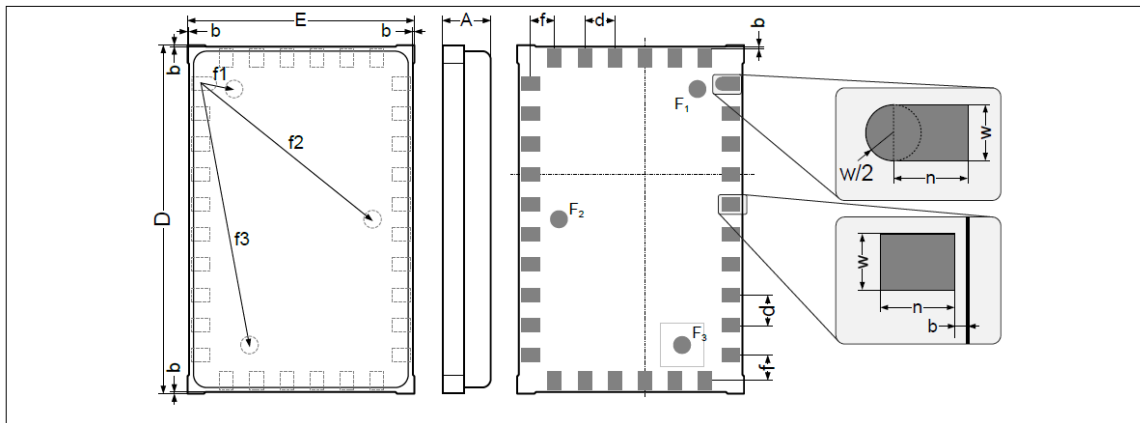
Parameter	Description	Typical	Tolerance
A	Module Height [mm]	26.0 (1023.6 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
B	Module Width [mm]	16.0 (629.9 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
C	Module Thickness [mm]	2.53 (99.5 mil)	+0.25/-0.15 (+9.8/-5.9 mil)
D	Horizontal Edge to Lateral Pin Pitch [mm]	2.0 (78.7 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
E	Vertical Edge to Lateral Pin Pitch [mm]	2.5 (98.4 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
F	Edge to Lateral Pin Pitch [mm]	1.05 (41.3 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
G	Lateral Pin to Pin Pitch [mm]	1.1 (43.3 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
H1	Lateral Pin Height [mm]	0.8 (31.5 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
H2	Lateral Pin close to ANT Height [mm]	0.9 (35.4 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
I	Lateral Pin Width [mm]	1.5 (59.1 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
J1	Lateral Pin to Pin Distance [mm]	0.3 (11.8 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
J2	Lateral Pin to Pin close to ANT Distance [mm]	0.2 (7.9 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
K	Horizontal Edge to Central Pin Pitch [mm]	2.75 (108.3 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
L	Vertical Edge to Central Pin Pitch [mm]	2.75 (108.3 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
M1	Central Pin to Pin Horizontal Pitch [mm]	1.8 (70.9 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
M2	Central Pin to Pin Horizontal Pitch [mm]	3.6 (141.7 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
N	Central Pin to Pin Vertical Pitch [mm]	2.1 (82.7 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
O	Central Pin Height and Width [mm]	1.1 (43.3 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)
P	Horizontal Edge to Pin 1 Indicator Pitch [mm]	0.9 (35.4 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
Q	Vertical Edge to Pin 1 Indicator Pitch [mm]	1.0 (39.4 mil)	+0.20/-0.20 (+7.9/-7.9 mil)
R	Pin 1 Indicator Height and Width [mm]	0.6 (23.6 mil)	+0.02/-0.02 (+0.8/-0.8 mil)

Obr. 20 Výkres a rozměry pouzdra LGA-96



Symbol	Millimeters			Symbol	Millimeters		
	Min	Typ	Max		Min	Typ	Max
A	3.7	3.8	3.9	n		1	
D	27.74	27.94	28.14	w	1.08	1.1	1.12
E	16.31	16.51	16.71	i ₁		2.67	
d		2.54		i ₂		0.27	
f	2.44	2.54	2.64	r		0.5	

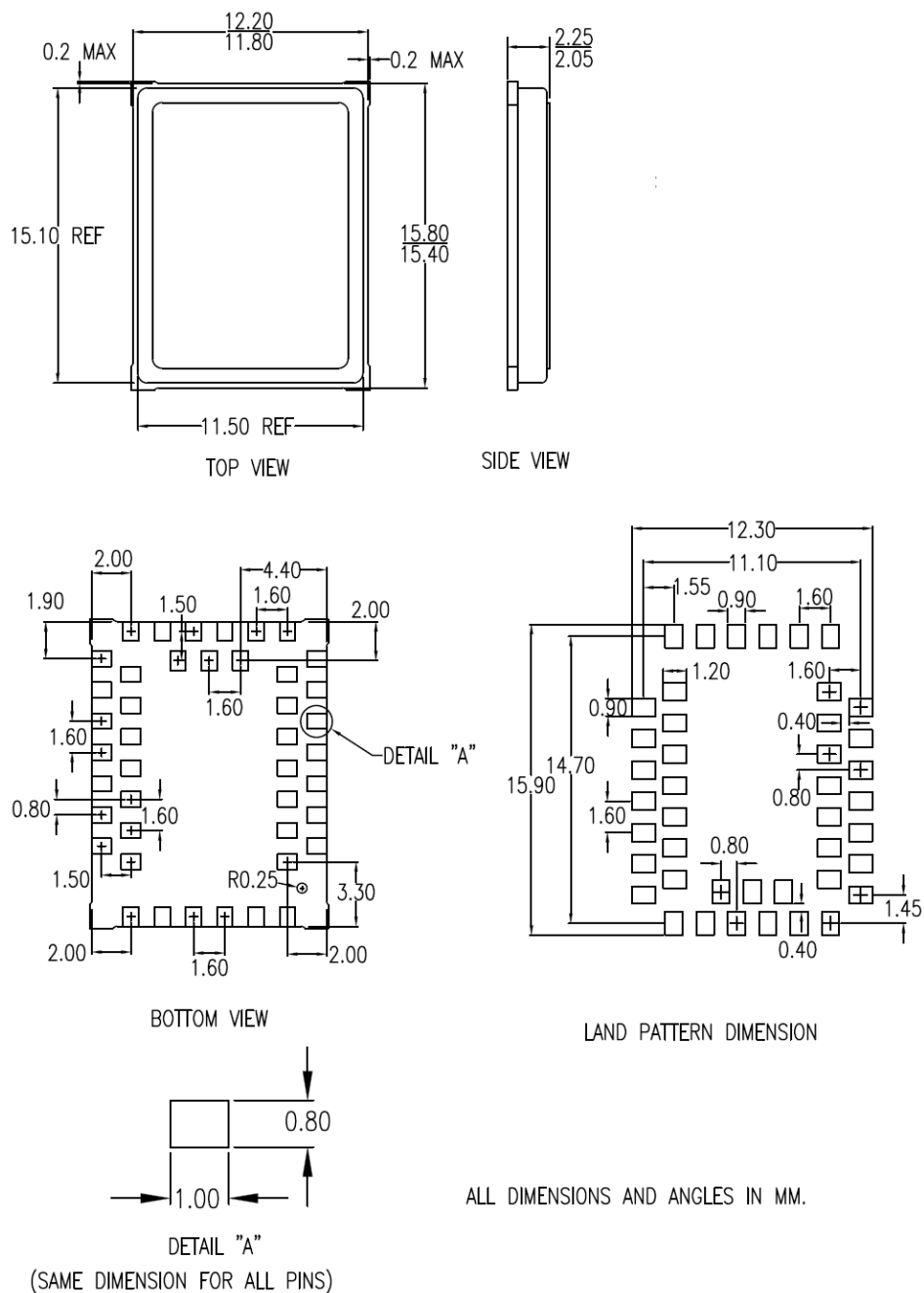
Obr. 21 Výkres a rozměry pouzdra LGA-30



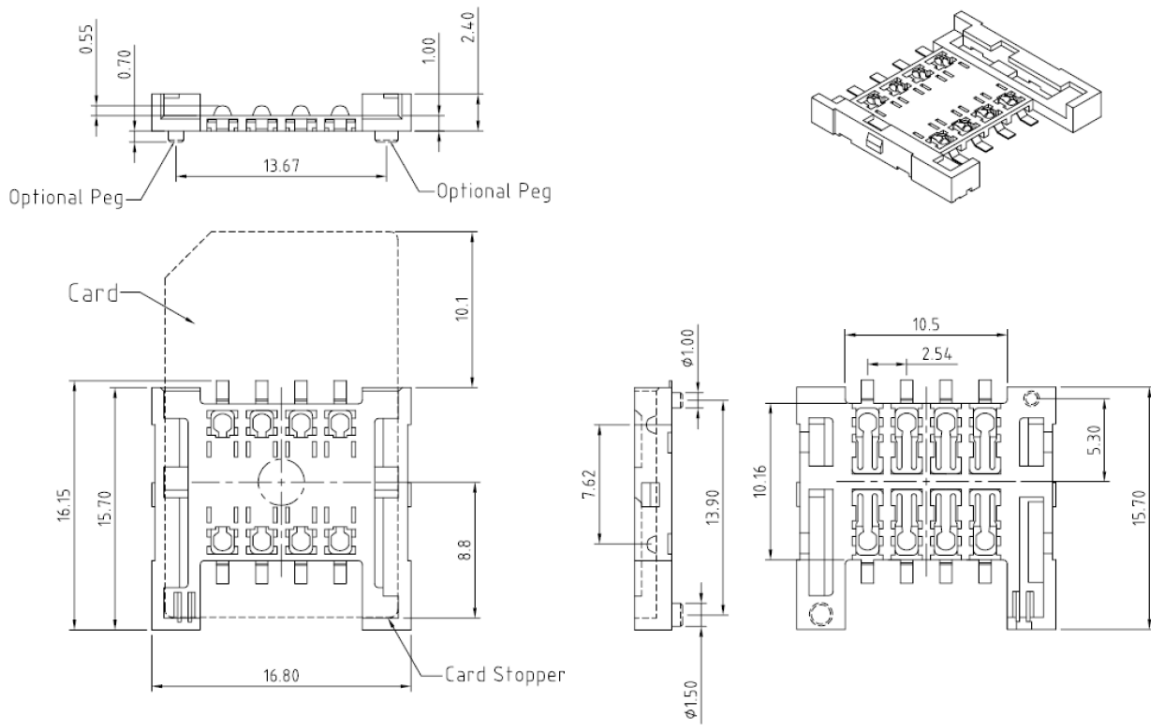
Symbol	Millimeters			Symbol	Millimeters		
	Min	Typ	Max		Min	Typ	Max
A	3.7	3.8	3.9	b	0	0.1	0.2
D	22.9	23.1	23.3	f _{1x} ¹⁾		2.0	
E	14.9	15.1	15.3	f _{1y} ¹⁾		0.5	
d		2		f _{2x} ¹⁾		11.5	
f		1.75		f _{2y} ¹⁾		9.0	
n		1.2		f _{3x} ¹⁾		3.5	
w		0.9		f _{3y} ¹⁾		17.5	

1) Fiducial positions are relative to center point of pad 1 rectangle, top view.

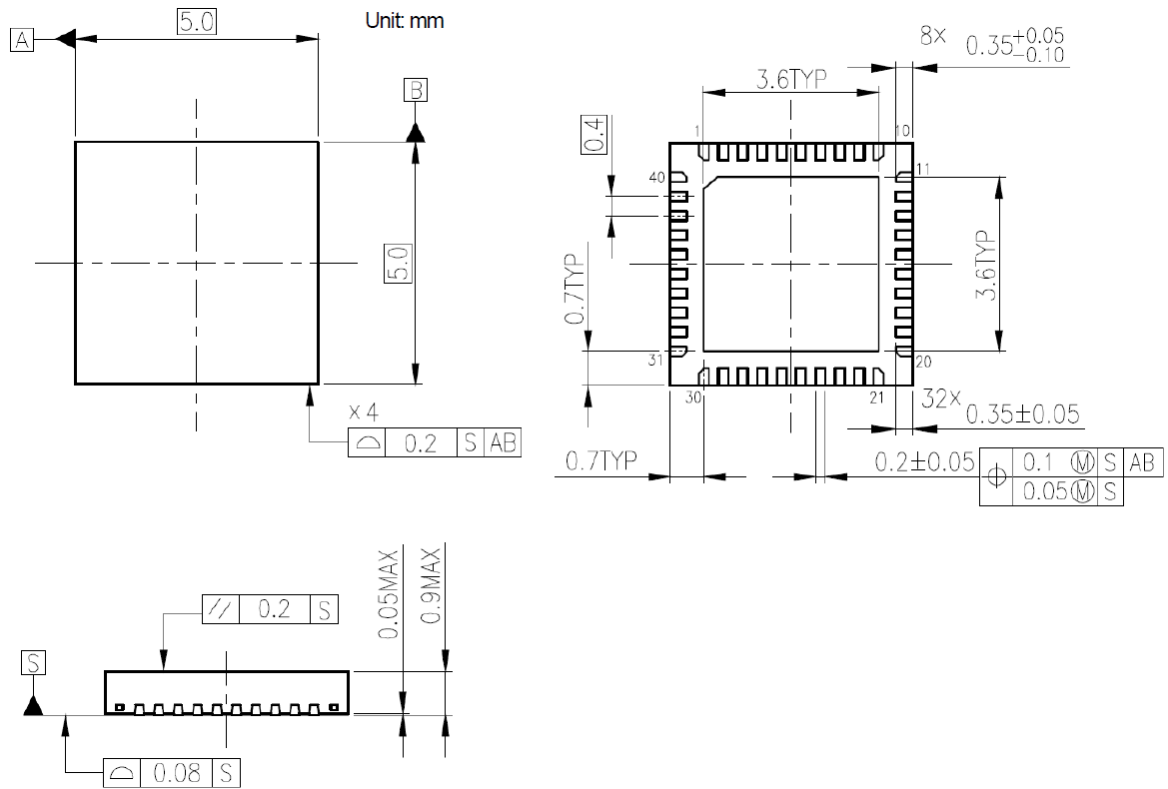
Obr. 22 Výkres a rozměry pouzdra LGA-32



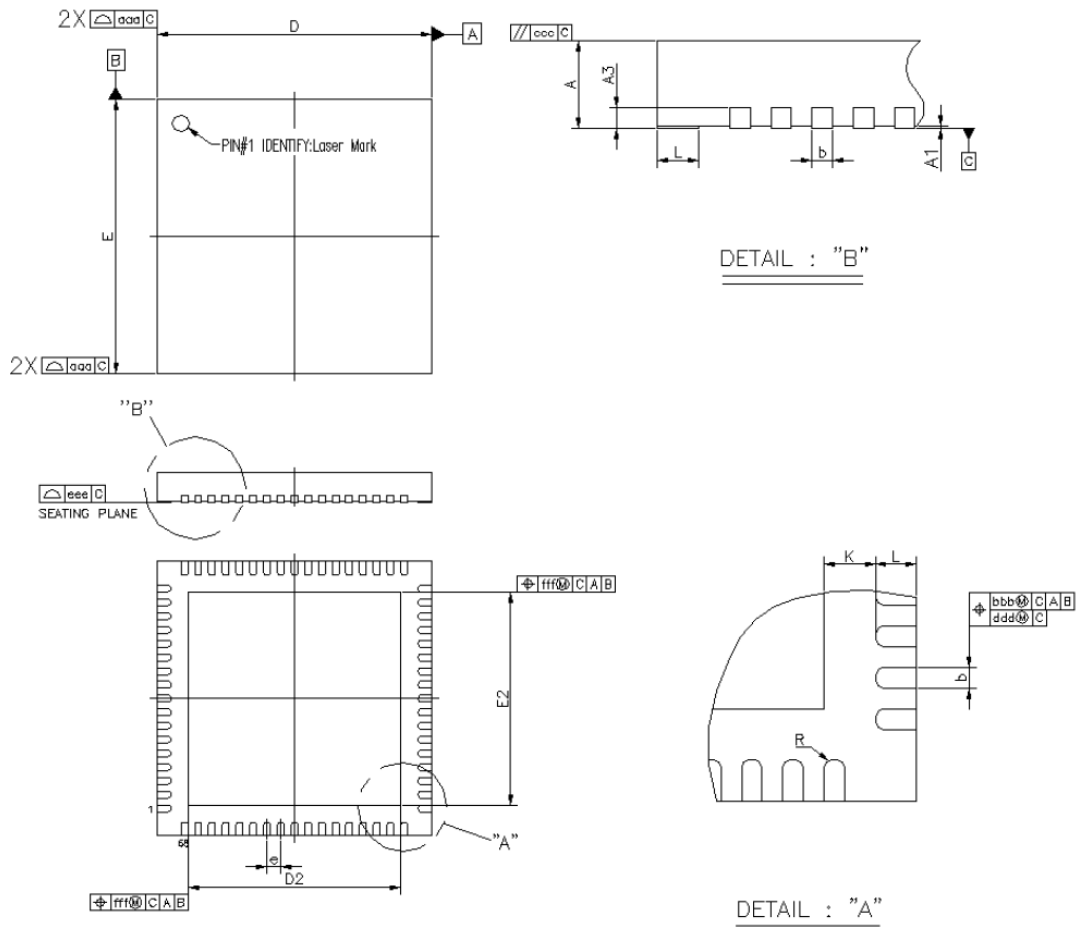
Obr. 23 Výkres a rozměry pouzdra LGA-43



Obr. 24 Výkres a rozměry pouzdra KON-SIM-02



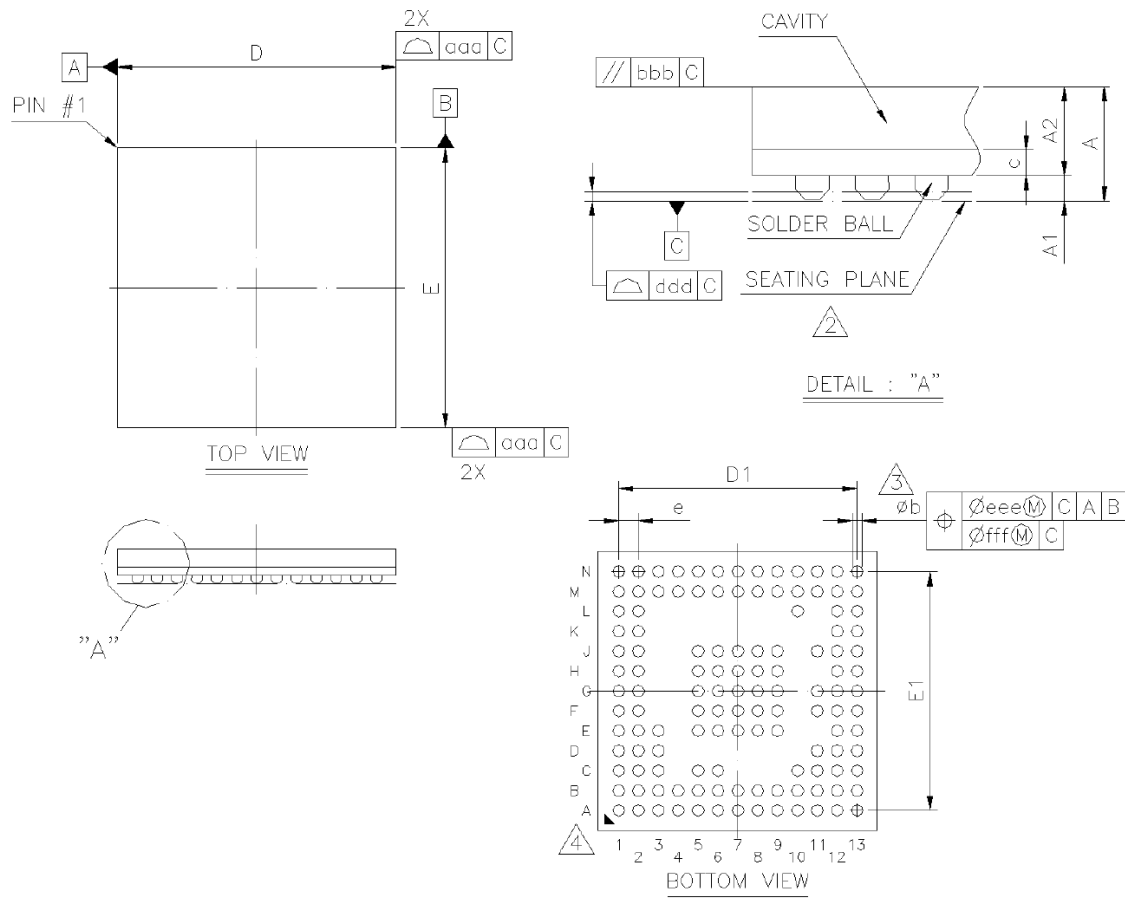
Obr. 25 Výkres a rozměry pouzdra QFN-40



Dimension	Min	Typ	Max
A	0.80	0.85	0.90
A1	0.00	0.02	0.05
A3	0.20 REF		
b	0.15	0.20	0.25
D	7.90	8.00	8.10
E	7.90	8.00	8.10
D2	6.05	6.20	6.35
E2	6.05	6.20	6.35
e	0.40 BSC		
L	0.30	0.40	0.50
K	0.20	—	—
R	0.075	—	—
aaa	0.10		
bbb	0.07		
ccc	0.10		
ddd	0.05		
eee	0.08		
fff	0.10		

Note:
 1. All dimensions shown are in millimeters (mm) unless otherwise noted.

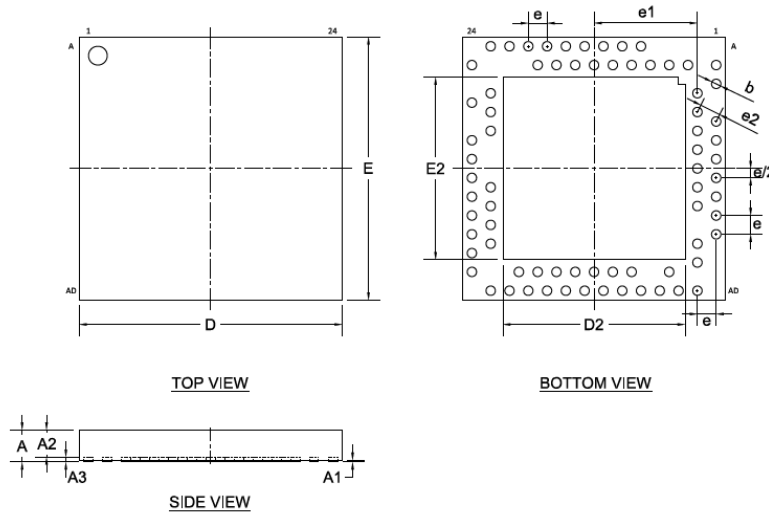
Obr. 26 Výkres a rozměry pouzdra QFN-68



Dimension	Min	Typ	Max
A	0.80	0.87	0.94
A1	0.16	0.21	0.26
A2	0.61	0.66	0.71
c	0.17	0.21	0.25
D	6.90	7.00	7.10
E	6.90	7.00	7.10
D1	—	6.00	—
E1	—	6.00	—
e	—	0.50	—
b	0.25	0.30	0.35
aaa		0.10	
bbb		0.10	
ddd		0.08	
eee		0.15	
fff		0.05	

Note:
1. All dimensions shown are in millimeters (mm) unless otherwise noted.

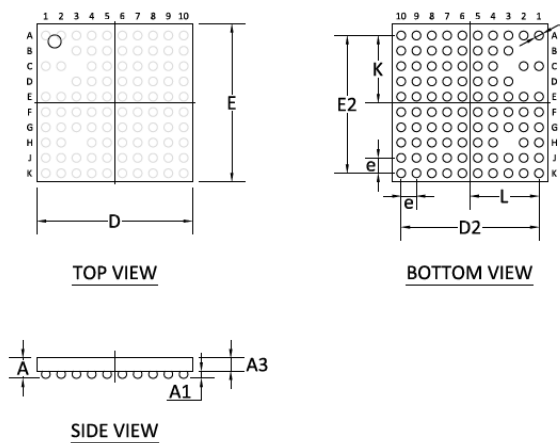
Obr. 27 Výkres a rozměry pouzdra BGA-125



	A	A1	A2	A3	b	D, E	D2, E2	e	e1	e2
Min.		0.02			0.20		4.75			
Nom.		0.05	0.675	0.13	0.25	7.00	4.85	0.5	2.75	0.559
Max.	0.85	0.08			0.30		4.95			

aQFN™ 73 dimensions in millimeters

Obr. 28 Výkres a rozměry pouzdra aQFN-73



	A	A1	A3	b	D	E	D2	E2	e	K	L
Min.	0.464	0.148	0.303	0.184							
Nom.	0.489		0.325		3.544	3.607	3.15	3.15	0.35	1.575	1.575
Max.	0.514	0.18	0.347	0.244							

WLCSP dimensions in millimeters

Obr. 29 Výkres a rozměry pouzdra WLCSP-93