UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Představení principů a využití senzorových sítí v průmyslu

Jan Brett

Bakalářská práce

2014

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: **2013/2014**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jan Brett**
Osobní číslo:	**I11318**
Studijní program:	**B2646 Informační technologie**
Studijní obor:	**Řízení procesů**
Název tématu:	**Představení principů a využití senzorových sítí v průmyslu**
Zadávající katedra:	**Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je představit principy a možnosti využití senzorových sítí v průmyslu. Autor představí základní principy senzorových sítí a jejich rozdělení, možnosti realizace a logickou a fyzickou topologii. Autor rozebere využívané protokoly, jejich specifika a využití v porovnání se síťovými protokoly počítačových sítí architektury TCP/IP. Autor navrhne modelové využití senzorové sítě ve vhodném modelu průmyslového podniku a provede jeho simulaci ve vhodném nástroji.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

MAHGOUB, Imad. Sensor network protocols. 1. vyd. New York: CRC, 2006, 110 s. ISBN 08-493-7036-1.
FALUDI, Robert. Building wireless sensor networks. 1st ed. Beijing: O'Reilly, 2010, xviii, 300 s. ISBN 978-0-596-80773-3. Kniha
FALUDI, Robert. Sensor networks with ieee 802.15.4 systems. 1st ed. S.l.: Springer-Verlag Berlin An, 2010, xviii, 300 s. ISBN 978-364-2267-680.
GUNGOR, V. Industrial wireless sensor networks: applications, protocols, and standards. 1st ed. S.l.: Springer-Verlag Berlin An, 2010, xxxii, 374 pages. ISBN 9781466500518.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Josef Horálek**
Katedra softwarových technologií

Datum zadání bakalářské práce: **12. prosince 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. května 2014**

L.S.

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2014

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 09. 05. 2014

Jan Brett

Rád bych poděkoval doktoru Josefu Horálkovi za jeho velmi velkou pomoc při zpracování této práce a profesionální rady. Dále bych chtěl poděkovat všem učitelům, kteří mne učili za vynikající odvedenou práci a vstřícnost. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

V Pardubicích dne 09. 05. 2014

Jan Brett

ANOTACE

Práce pojednává o vlastnostech a využití nízko-výkonových přenosových technologií. V práci jsou rozebrány základní komunikační protokoly a jejich implementace. Dále se práce zabývá návrhem senzorové sítě s porovnáním parametrů spolehlivosti přenosu.

KLÍČOVÁ SLOVA

ZigBee, IEEE 802.15.4, bezdrátové sítě, nízko-výkonové sítě, wirelessHART.

TITLE

Presentation of the principles and applications of sensor networks in the industry

ANNOTATION

The work deals with the properties and use of low-power transmission technologies. The work analyzed the basic communication protocols and their implementations. Furthermore, the work deals with the design of sensor networks by comparing the parameters of transmission reliability.

KEYWORDS

ZigBee, IEEE 802.15.4, Wireless Network, low-power networks, WirelessHART.

Obsah

Seznam zkratek **9**

Seznam obrázků **10**

Seznam tabulek **11**

Úvod **12**

1 Vlastnosti bezdrátových senzorových sítí **13**

1.1 Co to vlastně senzorová síť je? 13

1.2 Operační prostor bezdrátových sítí 13

1.3 Struktura bezdrátové senzorové sítě 14

1.4 Topologie bezdrátových senzorových sítí 15

1.5 Aplikace bezdrátových senzorových sítí 16

2 Protokoly TCP/IP v počítačových sítích **17**

2.1 Porovnání vrstev TCP/IP a ISO/OSI 17

2.2 Wi-Fi 18

2.2.1 Architektura 19

2.2.2 Komunikační model 19

3 Rozdělení bezdrátových senzorových sítí **20**

3.1 Úvod 20

3.2 Norma IEEE 802.15.4 20

3.2.1 Verze 21

3.2.2 Fyzická vrstva 21

3.2.3 Linková vrstva 21

3.3 ZigBee 22

3.3.1 Architektura ZigBee 22

3.3.2 Komunikační model 23

3.4 WirelessHART 23

3.4.1 Architektura WirelessHART 24

3.4.2 Komunikační model 25
3.5 ISA 100.11a 26
3.5.1 Architektura 26
3.5.2 Komunikační model 27
3.6 Protokol WIA-PA 28
3.6.1 Architektura WIA-PA 28
3.6.2 Komunikační model 29
4 Porovnání parametrů 31
4.1 ISA 100.11a, WirelessHART, WIA-PA 31
5 Praktická část realizace senzorové sítě 32
5.1 Simulace zpoždění 32
5.1.1 Výsledky simulace 33
5.2 Simulace chybovosti přenosu 35
5.2.1 Výsledky simulace chybovosti přenosu 35
Závěr 38
Literatura 39

Seznam zkratek

ADSL	asymmetric digital subscriber line
AP	access point
CSMA-CA	carrier sense multiple access with collision avoidance
DSSS	direct-sequence spread spectrum
FFD	full function device
FTP	file transfer protocol
HTTP	hypertext transfer protocol
IP	internet protocol
MIMO	multiple-input and multiple-output
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing
QoS	quality of services
QPSK	quadrature phase shift keying
RFD	reduced function device
TCP	transmission control protocol
UDP	user datagram protocol
Wi-Fi	wireless fidelity
WLAN	wireless local area network
WMAN	wireless metropolitan area network
WPAN	wireless personal area network
WWAN	wireless wide area network
WSN	wireless sensor network

Seznam obrázků

Obr. 1 – Rozdělení sítí podle rozsahu, překresleno z (Klues, 2006) 13
Obr. 2 – Rozdělení sítí podle energetické náročnosti, překresleno (Klues, 2006) 14
Obr. 3 – Struktura senzorového uzlu, překresleno (Bárta, 2010) 14
Obr. 4 – Síťová topologie, hvězda, strom a mesh.....15
Obr. 5 – Možné aplikace senzorových sítí.....16
Obr. 6 – Příklad předávání rámců a paketů mezi jednotlivými stanicemi, překresleno (Peterka, 2007a) 18
Obr. 7 – Časová osa komunikačních standardů používaných v technologii WSN, překresleno (Podhorský, 2012).....20
Obr. 8 – Referenční model ZigBee, překresleno (Koton, 2006).....22
Obr. 9 – Porovnání komunikačního drátového modelu HART a bezdrátového WirelessHART (Hynčica a Pavlata, 2011a) 24
Obr. 10 – Příklad topologie s využitím protokolu WirelessHART (Hart, 2012).....24
Obr. 11 – Komunikace přístupové metody WirelessHART ke sdílenému médiu (Hynčica a Pavlata, 2011a).....25
Obr. 12 – Příkladová ukázka topologie ISA100.11a překresleno (Hynčica a Pavlata, 2011b) 26
Obr. 13 – Příklad přeskakování kanálů u normy ISA 1000.11a, a) rychlé přeskakování, b) pomalé, c) kombinace obojího (Hynčica a Pavlata, 2011b).....27
Obr. 14 – Příklad topologie WIA-PA, překresleno (Hynčica a Pavlata, 2011b).....29
Obr. 15 – Struktura super-rámce (Hynčica a Pavlata, 2011b) 29
Obr. 16 – Komunikační modely IEEE 802.15.4, ISA 100.11a, WirelessHART a WIA-PA (Hynčica a Pavlata, 2011c) 31
Obr. 17 – Příklad topologie.....32
Obr. 18 – Zpoždění v síti s rozdílnou rozlehlostí 34
Obr. 19 – Zpoždění v síti s rozdílnou topologií.....35
Obr. 20 – Zahozené pakety při sestavování sítě 36
Obr. 21 – Zahozené pakety se sestavováním sítě 37

Seznam tabulek

Tab. 1 – Představa vrstev TCP/IP a ISO/OSI 17
Tab. 2 – Přehled standardů IEEE 802.11 19
Tab. 3 – Specifika frekvenčních pásem pro normu IEEE 802.15.4-2006 (Hynčica a Pavlata, 2011a).....21
Tab. 4 – Naměřené hodnoty simulací 33
Tab. 5 – Data pro simulaci sítě v 10. minutě 36
Tab. 6 – Data pro simulaci rozdílných konfigurací 37

Úvod

Senzorové sítě jsou v dnešní době velmi rozšířené. Téměř každé nové zařízení je opatřeno bezdrátovou technologií určenou pro přenos dat. Zařízení mají své požadavky a z tohoto důvodu byly vyvinuty přenosové standardy pro komunikaci mezi jednotlivými zařízeními. Mezi tyto standardy patří například ZigBee, WirelessHART a ISA 100.11a.

Cílem této práce bylo prostudovat tyto standardy a popsat jejich specifika a porovnat je se síťovými protokoly počítačových sítí. Jedná se o relativně nové standardy, které nekonkurují stávajícím technologiím, jako jsou Wi-Fi či Bluetooth, ale snaží se vyplnit mezeru na trhu. Všechny tyto technologie jsou speciálně navržené pro provoz zařízení s krátkým dosahem v rámci sítí PAN. Jejich hlavním požadavkem je dlouhodobá bateriová životnost a zároveň nízké provozní náklady. Typickým zařízením vhodným pro integraci do těchto sítí mohou být senzory pohybu, seismická měřící čidla či teplotní čidla.

Text práce je rozdělen do několika kapitol. První kapitola se zabývá obecným popisem senzorových sítí, rozdělením dle topologie a možnou aplikací senzorových sítí v běžném životě či průmyslu.

Druhá kapitola se zabývá popisem technologií společných s počítačovými sítěmi se základem na stavovém sedmivrstvém modelu ISO/OSI. Je zde popsána i komunikační technologie Wi-Fi, která spadá pod více energeticky náročné komunikační prostředky oproti dále popsaným protokolům, které jsou postavené na nízko-výkonovém standardu IEEE 802.15.4.

Třetí popisuje vybrané komunikační protokoly pro senzorové sítě s důrazem na jejich fyzickou a logickou topologii. Také popisuje standard IEEE 802.15.4, který je základem těchto protokolů.

Čtvrtá kapitola popisuje parametry a rozdíly mezi vybranými protokoly a porovnání mezi ostatními konkurenčními technologiemi.

Pátá kapitola se zabývá návrhem a simulací senzorové sítě ZigBee v programu OPNET Modeler a následným porovnáním výsledků z jednotlivých měření. V poslední části jsou rozebrány možné způsoby řešení problematiky zpoždění a chybovosti senzorových sítí.

V závěru práce budou celkově zhodnoceny získané poznatky.

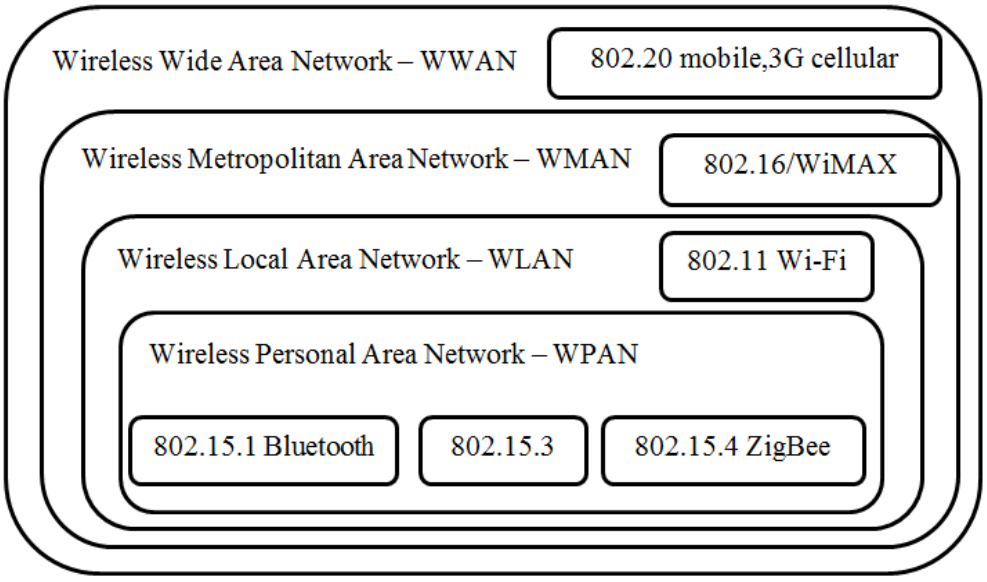
1 Vlastnosti bezdrátových senzorových sítí

1.1 Co to vlastně senzorová síť je?

Bezdrátové senzorové sítě (Wireless Sensor Network – WSM) se skládají ze spousty v prostoru rozmístěných zařízení, které využívají různé senzory pro zjišťování různých fyzikálních veličin z okolí, jakými jsou například teplota, světlo, tlak a pohyb. Těmto základním zařízením se říká senzorové uzly. Hlavním účelem senzorových sítí je monitorování a kontrolování okolí a dávání zpráv o aktuálním dění zpět do řídící jednotky, kde se následně vykoná zpracování určité události. Využití senzorových sítí je spousta, proto se začali dělit na sektory, jako jsou automatizace budov, vojenství, zdravotnictví, průmysl a mnoha dalších. Nejčastěji se se senzory setkáme v běžném životě, ať už jde o senzorovou vodovodní baterii či otevírání vrat. (Bárta, 2010)

1.2 Operační prostor bezdrátových sítí

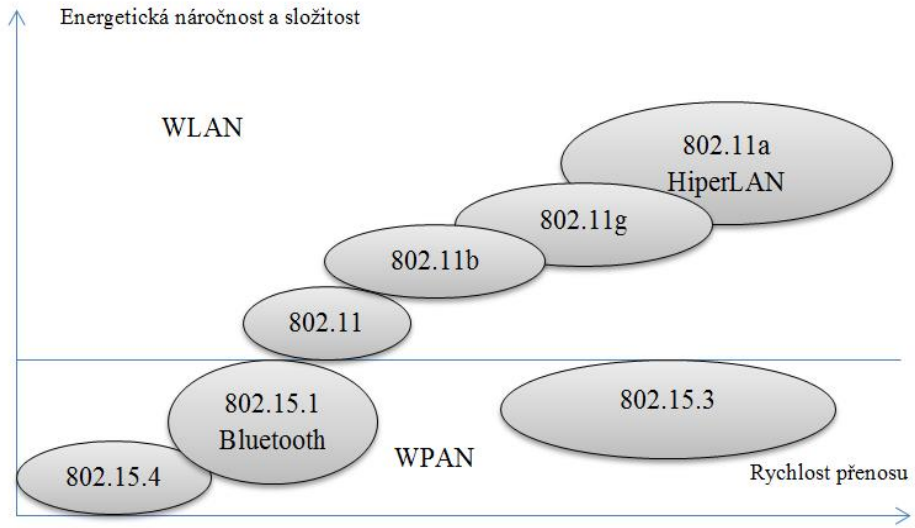
Bezdrátové sítě byly žhavým tématem po mnoho let. Jejich potenciál byl poprvé realizován s nasazením mobilních sítí pro použití s mobilními telefony v 70letech 20. století. Od té doby, se začali objevovat další sítě rozdělené podle jejich určení a rozsahu. Bezdrátové sítě typu WWAN, spolu se zavedením WMAN, WLAN a WPAN. Na obr. 1 je znázorněno několik standardů, které byly vyvinuty pro každý z těchto typů sítí.



Obr. 1 – Rozdělení sítí podle rozsahu, překresleno z (Klues, 2006)

Dále je uvedeno rozdělení správy napájení pro sítě typu WLAN a WPAN. Podmnožiny sítí WPAN založená na standardu IEEE 802.15.4 je známa jako bezdrátové senzorové sítě (WSN). Bezdrátové senzorové sítě jsou speciálně navrženy pro velmi nízké

provozní náklady elektrické energie. Na obr. 2 je zřetelné jak se tyto různé typy sítí liší, pokud jde o datové rychlosti a spotřebu energie.

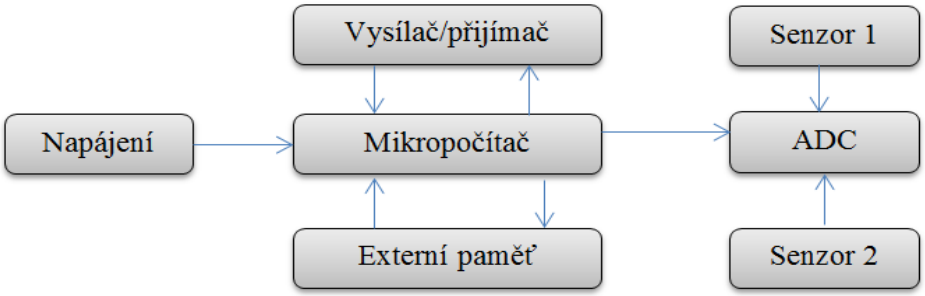


Obr. 2 – Rozdělení sítí podle energetické náročnosti, překresleno (Klues, 2006)

Bezdrátové sítě jsou alternativou drátových sítí. V současnosti jsou rozděleny WPAN sítě do 3 skupin podle spotřeby elektrické energie, přenosové rychlosti a kvality služeb (QoS).

1. WPAN založená na standardu IEEE 802.15.3 se hodí pro multimediální aplikace vyžadující QoS.
2. 802.15.1 / Bluetooth je vhodná jako náhrada drátového spojení pro elektronická zařízení, například mobilní telefony.
3. 802.15.4 pro velmi nízké přenosy s velmi nízkou energetickou náročností, do této skupiny spadají senzorové sítě.

1.3 Struktura bezdrátové senzorové sítě



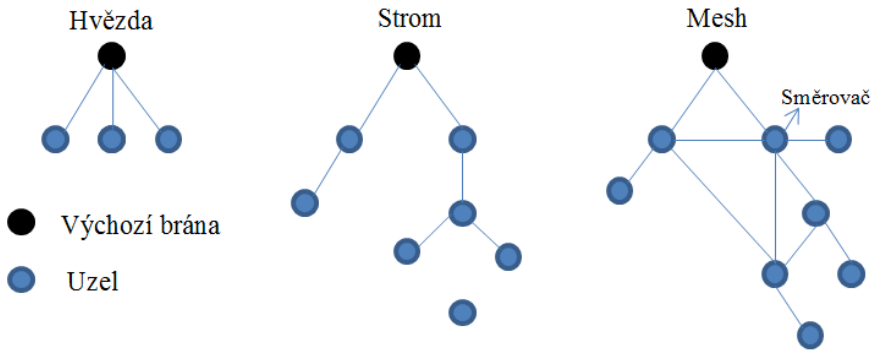
Obr. 3 – Struktura senzorového uzlu, překresleno (Bárta, 2010)

Základní jednotkou, ze které se skládá senzorová síť, je senzorový uzel. Uzel je schopen zpracovávat a shromažďovat smysluplné informace, které následně může přeposlat k dalším připojeným zařízením na zpracování.
Skládá se z následujících jednotek:

1. Mikropočítač – je řídící jednotka pro funkcionalitu a kontrolu ostatních částí senzorové uzlu.
2. Vysílač/přijímač – zajišťuje komunikaci s ostatními prvky sítě.
3. Externí paměť – pro uložení dat.
4. ADC – převod analogového signálu ze senzorů do digitálního pro zpracování řídící jednotkou.
5. Napájení – slouží k napájení jednotlivých zařízení.

Bezdrátová síť se skládá z částí, kterými jsou uzly, výchozí brány, směrovače a software. Prostorově distribuované měřící uzly s čidly pro sledování aktiv v jejich okolí. Získaná data se bezdrátově přenáší do výchozí brány, která může pracovat samostatně nebo být připojena k systému hostitele, kde se mohou shromažďovat, zpracovávat, analyzovat a prezentovat data naměřená pomocí specifického softwaru. Směrovače jsou speciální typ měřícího uzlu, který můžeme použít k rozšíření vzdálenosti a spolehlivosti WSN. Směrovače v síti nejsou povinné, protože jednotlivé uzly spolu komunikují a posílají svoje naměřená data směrem k výchozí bráně, nicméně použitím směrovačů se urychlí přenos a již zmíněná spolehlivost. (Bárta, 2010)

1.4 Topologie bezdrátových senzorových sítí



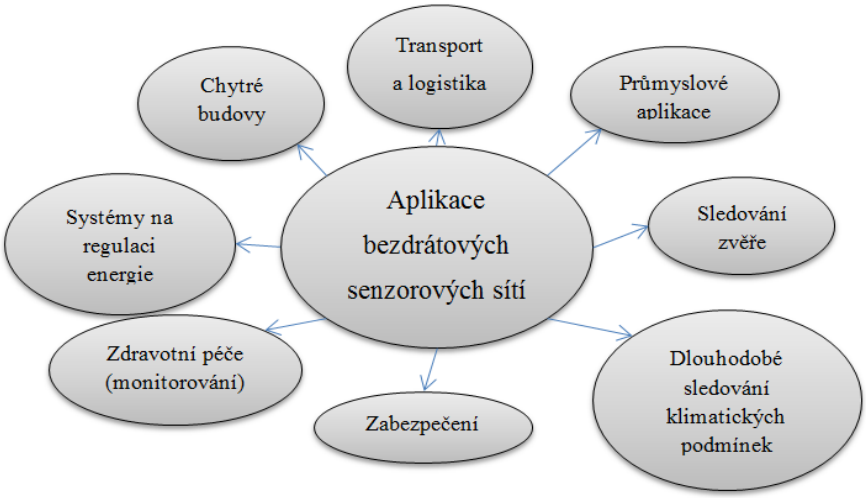
Obr. 4 – Síťová topologie, hvězda, strom a mesh

Uzly WSN jsou obvykle uspořádány v jedné ze tří typů síťových topologií. Ve hvězdicové topologii se každý uzel připojuje přímo k bráně. V síťovém stromu neboli

clusteru, se každý uzel připojí ke svému vyššímu uzlu ve stromu a tak dále až do výchozí brány. Data jsou směrována od nejnižšího uzlu ve stromu do výchozí brány. Největší spolehlivost nabízí síť mesh, síť může mít propojené uzly s několika dalšími, tím vznikají redundantní cesty, a proto se data přenášejí skrz síť prostřednictvím nejspolehlivější a nejvýhodnější cesty. (Koton aj., 2006)

1.5 Aplikace bezdrátových senzorových sítí

Existuje mnoho oblastí použití senzorových sítí. Senzorové sítě mohou být použity k detekci lesních požárů, pro sledování strukturální integrity mostů nebo lidských fyziologických dat. Obr. 5 zobrazuje nejdůležitější oblasti použití. Následující části popisují různé aplikace bezdrátových senzorových sítí. (Klues, 2006)



Obr. 5 – Možné aplikace senzorových sítí

Při výběru senzorové sítě záleží na podmínkách, kde chceme danou síť provozovat. Je nutné zvážit určité vlastnosti, zda nepoužít spíše drátovou (spolehlivější oproti rušení) infrastrukturu, ale mnohdy nejde z určitých důvodů použít. Důvodů může být více, nemožnost zavedení kabeláže nebo náročnost na implementaci či finance.

Konkrétním příkladem použití WSM jsou aplikace na dlouhodobé sledování životního prostředí, kde se klade důraz na nízkou energetickou náročnost a dlouhodobé měření, jako je například seizmická aktivita či klimatické změny. (Klues, 2006)

2 Protokoly TCP/IP v počítačových sítích

V této kapitole si rozebereme referenční vrstvy síťové architektury TCP/IP v porovnání s vrstvami ISO/OSI. Rozebereme i protokol Wi-Fi.

Koncepce protokolů TCP/IP vznikla v osmdesátých letech a vychází z americké sítě ARPANET. (Peterka, 2007)

2.1 Porovnání vrstev TCP/IP a ISO/OSI

Čtyřvrstvý model TCP/IP má následující strukturu:

1. aplikační vrstvu;
2. transportní vrstvu;
3. síťovou vrstvu nebo také vrstvu IP;
4. vrstvu síťového rozhraní.

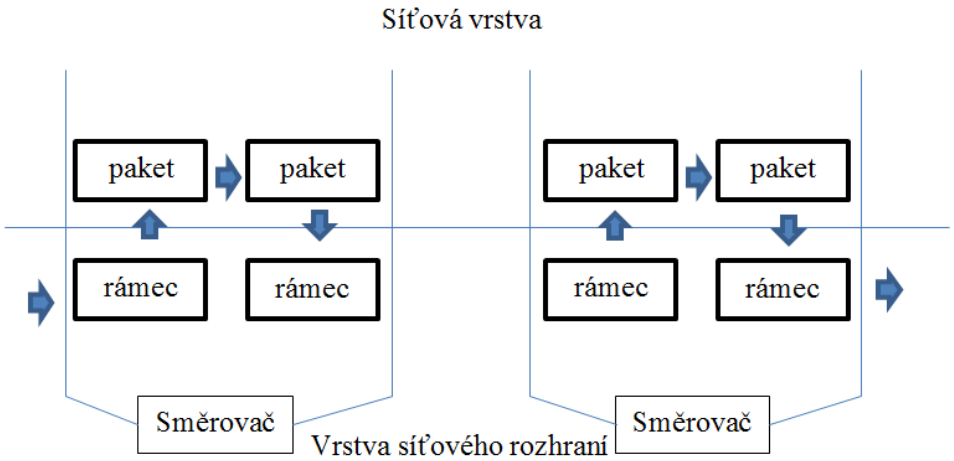
Tab. 1 – Představa vrstev TCP/IP a ISO/OSI

TCP/IP	ISO/OSI
Aplikační	Aplikační
	Prezentační
	Relační
Transportní	Transportní
Síťová (vrstva IP)	Síťová
Vrstva síťového rozhraní	Linková
	Fyzická

Síťový model TCP/IP se skládá z již zmíněných čtyř vrstev. Protokoly, které jsou z tohoto modelu odvozeny, ale obsazují pouze vrchní tři vrstvy. U vrstvy síťového rozhraní se počítá s tím, že se využije různých přenosových mechanismů, které jsou dostupné a nejsou součástí TCP/IP, jedná se například o Ethernet, Wi-Fi či ADSL.

Síťová vrstva staví na vrstvě síťového rozhraní. Zajišťuje přenosové služby pro rámce dat z vrstvy síťového rozhraní. Data jsou přenášena v paketech mezi jednotlivými stanicemi po celé síti. Mezi jednotlivými stanicemi se může nacházet více uzlů, přes které musí paket projít ke svému cíli, proto musí existovat mechanismus, který pošle pakety správným směrem tzv. routing (směrování). Směrování spočívá v tom, že se paket zabalí do rámce a pošle se na vrstvu síťového rozhraní, zde je rámec přeposlán k sousedovi, kde se rozbalí a paket se předá síťové vrstvě, která určí, jestli jsou data obsazená v rámci určená pro tuto stanici nebo pro nějakou jinou. Jestliže jsou data určená pro jinou stanici, znovu se opakuje postup zabalení

paketu do rámce a přeposlání na vrstvu fyzického rozhraní a odtud k dalšímu sousedovi v cestě. V opačném případě je paket předán vyšší vrstvě modelu TCP/IP – transportní. Nejrozšířenější je pro síťovou vrstvu právě protokol IP (Internet Protocol), díky kterému tento model dostal i své jméno.



Obr. 6 – Příklad předávání rámců a paketů mezi jednotlivými stanicemi, překresleno (Peterka, 2007a)

Transportní vrstva navazuje na síťovou. Síťová vrstva je poslední vrstvou od spodu TCP/IP modelu, která je přítomna v každém komunikujícím uzlu i v koncových zařízeních přenosové soustavy. Zbývající dvě vrstvy jsou již přítomny pouze v koncových uzlech. Transportní vrstva zajišťuje vzájemnou komunikaci mezi koncovými body. Zajišťuje např. spolehlivost přenosu, rozhoduje, které běžící aplikaci na vyšší vrstvě data přeposlat, podobně předává data od aplikační vrstvy jednoho počítače a předává je na síťovou vrstvu, kde jsou přeposílána k dalšímu počítači. Hlavní protokoly této vrstvy jsou TCP (Transport Control Protocol) což je spolehlivý transportní protokol bez ztráty dat a UDP (User Datagram Protocol), který slouží jako nepotvrzovací protokol pro přenos dat. TCP se hodí pro přenos pro aplikace typu http nebo přenos dat z FTP serveru, kde je potřeba, aby nedošlo ke ztrátě dat. Naproti tomu UDP se hodí například pro telefonní hovory, kde na výpadku nějakého slova většinou nezáleží.

Aplikační vrstva je nejvyšší vrstva modelu TCP/IP a tvoří rozhraní k uživatelskému programu, mezi typické zástupce patří např. aplikace Telnet, TFP. (Peterka, 2007a)

2.2 Wi-Fi

Technologie Wi-Fi vychází ze standardů IEEE 802.11 popisující bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích. Tato technologie využívá bezlicenční frekvenční pásma

ISM na 2,4 GHz. První specifikace bezdrátového Ethernetu vyšla v roce 1997 a vyšla pod označením IEEE 802.11, od té doby vyšly nové specifikace, které se liší především přenosovou rychlostí a komunikací na fyzické vrstvě.

Tab. 2 – Přehled standardů IEEE 802.11

Standard	Pásmo, GHz	Max. rychlost, Mb · s	Fyzická vrstva	Rok vydání
IEEE 802.11	2,4	2	DSSS	1997
IEEE 802.11a	5	54	OFDM	1999
IEEE 802.11b	2,4	11	DSSS	1999
IEEE 802.11g	2,4	54	OFDM	2003
IEEE 802.11n	2,4 nebo 5	600	OFDM, MIMO	2008
IEEE 802.11ac	2,4 nebo 5	1800	OFDM, MIMO	2014

První specifikace používala techniku přímého rozprostřeného spektra DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). DSSS je metoda nahrazení jednotlivých přenášených bitů početnější sekvencí bitů, tím dochází k redundanci. Signál je rozprostřen do širšího spektra a je méně náchylný vůči vnějšímu rušení. Druhá technika je ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Tato metoda je založena na širokopásmové modulaci s využitím kmitočtového dělení kanálu. MIMO (Multiple-input multiple-output) pro zvýšení datové propustnosti a dosahu při zachování šířky pásma.

2.2.1 Architektura

Může být dvojího druhu:

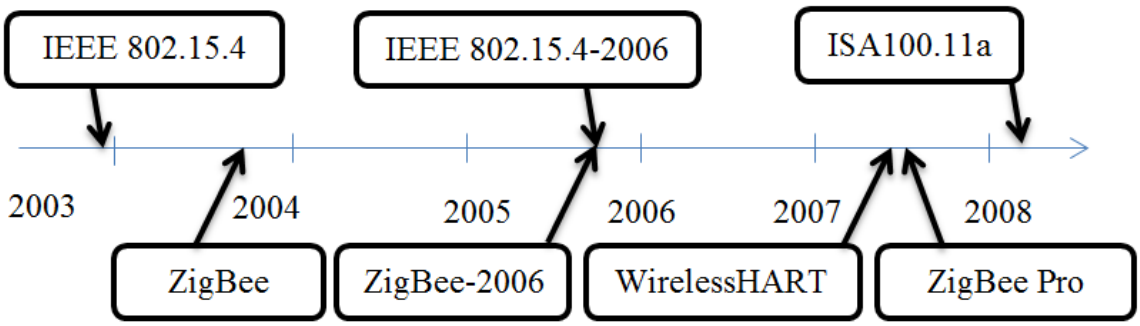
1. Ad-hoc – komunikace probíhá mezi jednotlivými koncovými stanicemi bez využití přístupového bodu (AP – Access Point). Žádné zařízení AP se zde nenachází.
2. Režim infrastruktury – komunikace mezi jednotlivými stanicemi probíhá pouze přes přístupový bod. Stanice komunikuje s AP a ta přeposílá data další stanici.

2.2.2 Komunikační model

Wi-Fi zajišťuje komunikaci na spojové vrstvě, zbylé vrstvy jsou záležitostí vyšších protokolů. K médiu se přistupuje metodou CSMA/CA. (Peterka, 2007b)

3 Rozdělení bezdrátových senzorových sítí

V této kapitole se seznámíme s vybranými standardy pro bezdrátovou průmyslovou komunikaci. Budou uvedeny pouze standardy založené na normě IEEE 802.15.4 tj. pro sítě krátkého dosahu (WPAN). Budou rozebrány základy normy IEEE 802.15.4 a představeny a porovnány standardy WirelessHART, ISA100.11a, WIA-PA a ZigBee.



Obr. 7 – Časová osa komunikačních standardů používaných v technologii WSN, překresleno (Podhorský, 2012)

3.1 Úvod

Pro bezdrátové systémy komunikující na malé vzdálenosti (desítky metrů), které se označují WPAN (Wireless Personal Area Networks) neboli sítě krátkého dosahu. Prvním nejrozšířenějším zástupcem byla síť podle standardu Bluetooth, definovaná normou IEEE 802.15.1, určená pro radiové spojení mezi periferiemi a zároveň jako náhrada kabeláže. Norma IEEE 802.15.4 definující rádiové sítě krátkého dosahu, ale s nízkou energetickou náročností, která vyšla roku 2003. Tato norma určuje pouze první dvě vrstvy ISO/OSI modelu, fyzickou vrstvu a přístup ke komunikačnímu médiu. Přistupuje podobně jako Wi-Fi, ale na rozdíl od Wi-Fi není navržena pro IP protokoly na horních vrstev ISO/OSI modelu. Protokoly pro tyto vrstvy nejsou normou upřesněny a aplikační software se musí postarat o síťovou a transportní část sám nebo se spolehnout na jiné protokoly. (Hynčica a Pavlata, 2011a)

3.2 Norma IEEE 802.15.4

Tato norma definuje rádiovou komunikaci pro sítě krátkého dosahu, přičemž popisuje pouze fyzickou a přístupovou vrstvu komunikačního modelu. Její určení je pro komunikaci malou rychlostí, od desítek po stovky bitů za sekundu. Vyznačuje se i vysokou spolehlivostí přenosu.

3.2.1 Verze

Norma IEEE 802.15.4 se neustále inovuje, původní verze z roku 2003 byla nahrazena verzí IEEE 802.15.4-2006, která přidává další modulace pro vyšší přenosové rychlosti. Novější verze také přináší časové znaménkování rámců, zkrácenou dobu asociace zařízení do sítě, volitelnou metodu bezkolizního přístupu k médiu a možnosti zabezpečení komunikace.

Tab. 3 – Specifika frekvenčních pásem pro normu IEEE 802.15.4-2006 (Hynčica a Pavlata, 2011a)

Pásmo, MHz	Přenosová rychlost, kb · s^{-1}	Modulace	Počet kanálů	Verze normy
868	20	DSSS, BPSK	1	2003, 2006
915	40	DSSS, BPSK	10	2003, 2006
868	250	PSSS, ASK	1	2006
915	250	PSSS, ASK	10	2006
868	100	DSSS, O-QPSK	1	2006
915	250	DSSS, O-QPSK	10	2006
2450	250	DSSS, O-QPSK	16	2003, 2006

3.2.2 Fyzická vrstva

Komunikace probíhá v bezlicenčních pásmech pro Evropu 868 MHz, pro Ameriku 915 MHz a globálně 2,4 GHz. Zařízení používají pro příjem a vysílání dat metodu rozprostřeného spektra (DSSS, PSSS) a tři druhy modulace (QPSK, BPSK a ASK). Maximální komunikační rychlost je v pásmu 2,4 GHz a to 250 kb · s^{-1}. Bohužel je toto pásmo využíváno i jinými standardy jako je Wi-Fi a Bluetooth, tudíž dochází k častému vzájemnému rušení mezi těmito standardy. Dále nabízí i více komunikačních kanálů oproti jednomu evropskému bezlicenčnímu pásmu na 868 MHz. (Hynčica a Pavlata, 2011a)

3.2.3 Linková vrstva

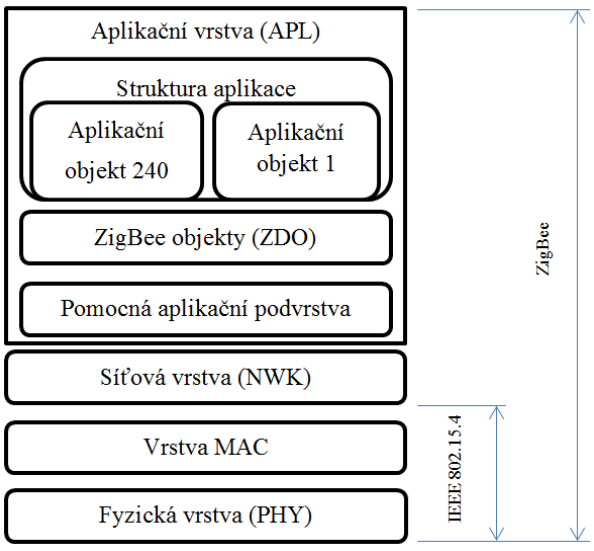
Podle normy IEEE 802.15.4 se provádí přístup ke sdílenému médiu pomocí metody CSMA/AC (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Tato metoda pracuje tak, že zařízení měřením kanálu detekují úrovně energie na kanálu nebo zjišťováním nosné frekvence anebo kombinaci obou možností obsazenost sdíleného média. Zjistí-li zařízení obsazenost média, vygeneruje si náhodný časový interval, po který čeká na uvolnění pásma. Jestliže ani po tomto intervalu není médium prázdné, vygeneruje se dvojnásobný časový interval. Jelikož tato metoda nezaručuje úspěšnost přenosu, je dobré pro zvýšení pravděpodobnosti doručení paketu použít metodu potvrzování (zařízení detekuje prázdné médium, pošle dotaz s žádostí o přístup k médiu na přístupový bod, a když dostane potvrzovací odpověď od přístupového bodu, tak stanice odvysílá svůj rámec).

Nevýhodou této metody je nedeterminismus, kdy přístup jednotlivých zařízení k médiu se může v čase značně lišit. Také klesá účinnost této metody při větším počtu zařízení v síti, čímž klesá propustnost. (Hynčica a Pavlata, 2011a)

3.3 ZigBee

ZigBee je bezdrátová komunikační technologie postavená na standartu IEEE 802.15.4. ZigBee z tohoto standardu vychází a bere si z něho dvě nejnižší vrstvy. Nad těmito vrstvami ZigBee definuje svoje dvě vyšší vrstvy (síťovou a aplikační).

Zigbee bylo uvedeno na trh v roce 2003. Slouží pro komunikaci mezi zařízeními s nízkým výkonem, v malých sítích a na malé vzdálenosti do 70 metrů. (Koton aj., 2006)



Obr. 8 – Referenční model ZigBee, překresleno (Koton, 2006)

3.3.1 Architektura ZigBee

V Architektuře sítí ZigBee se vyskytují tři základní zařízení:

1. Koordinátor sítě – což je centrální řídící prvek sítě. Zajišťuje založení a komunikaci v síti.
2. Směrovač – zajištuje rozšíření sítě o další koncová zařízení a komunikaci s nimi.
3. Koncová zařízení – typicky čidlo či senzor.

Jednotlivá zařízení mohou být poskládána do topologie hvězda, cluster nebo mesh. Koordinátor a směrovač musí být plně funkční zařízení (FFD), protože zajištují komunikaci a veškeré služby v síti. Koncová zařízení (RFD) mají implementovány pouze redukované možnosti z důvodu snížení hardwarové náročnosti a mohou komunikovat pouze s koordinátorem nebo směrovačem.

3.3.2 Komunikační model

Tato technologie využívá pro směrování tzv. ad-hoc, což je dočasné navázání spojení mezi rovnocennými prvky, např. dva telefony spojené pomocí Wi-Fi bez použití přístupového bodu. Tím je docílena komunikace i na větší vzdálenosti bez přímé rádiové viditelnosti komunikujících zařízení. Hlavním cílem určení této technologie je komunikace mezi zařízeními v senzorových sítích. Zigbee komunikuje v bezlicenčních pásmech na frekvenci 868 MHz, 902 – 928 MHz a 2,4 GHz. Přenosová rychlost přenosu dat je přibližně 20, 40, 250 $kb \cdot s^{-1}$.

Vrstva MAC zprostředkovává přístup ke sdílenému radiovému médiu. Ověřuje platnost rámce, potvrzení příjmu, řídí spojení mezi zařízeními a synchronizuje přenos.

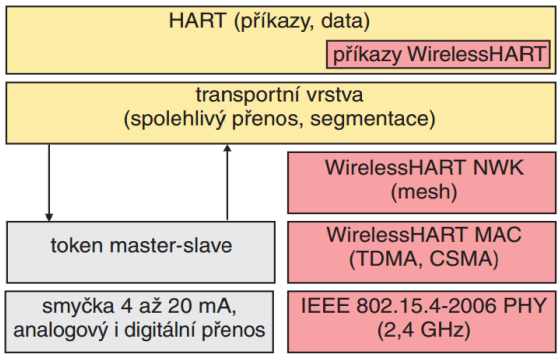
Síťová vrstva je odpovědná za zabezpečení rámců a jejich směrování. Hledá sousední uzly a vede si o nich tabulky. Tato vrstva zajišťuje komunikaci a přiděluje adresy novým zařízením.

Aplikační vrstva se skládá z několika podvrstev. Pomocná aplikační podvrstva se stará o správu a udržování vazebních tabulek mezi jednotlivými zařízeními, na základě jejich služeb a potřeb. Tato podvrstva nadále přeposílá zprávy mezi vzájemně svázanými zařízeními. Objekt ZigBee (ZDO) definuje roli zařízení v sítí (FFD, RFD) a odpovídá na žádosti o spojení mezi zařízeními a poskytuje zabezpečení přenosu. ZDO obsahuje mechanismus na hledání a připojování zařízení do sítě a poskytuje jim služby. (Koton aj., 2006)

3.4 WirelessHART

Protokol WirelessHART je bezdrátovou variantou drátového protokolu HART a ten je určen pro oboustrannou komunikaci mezi měřícími zařízeními a nadřazeným systémem. HART je celosvětově velmi rozšířený protokol, udává se přes 30 milionů zařízení instalovaných na světě. „HART určuje fyzickou vrstvu (superpozice digitálního frekvenčně modulovaného signálu na analogový signál v proudové smyčce 4 až 20 mA), linkovou vrstvu (master-slave token-passing), transportní vrstvu (spolehlivý přenos s automatickou fragmentací) a aplikační vrstvu (formát příkazů a odpovědí a formát datových struktur).“ (Hynčica a Pavlata, 2011a)

V roce 2007 byl protokol HART rozšířen o bezdrátovou verzi WirelessHart a od již zmíněného protokolu HART se liší ve svých spodních vrstvách. Na fyzické a linkové jsou protokoly rozdílné, zbylé vrstvy zůstávají shodné. Na obr. 9 je zobrazen vztah mezi oběma zmíněnými protokoly.

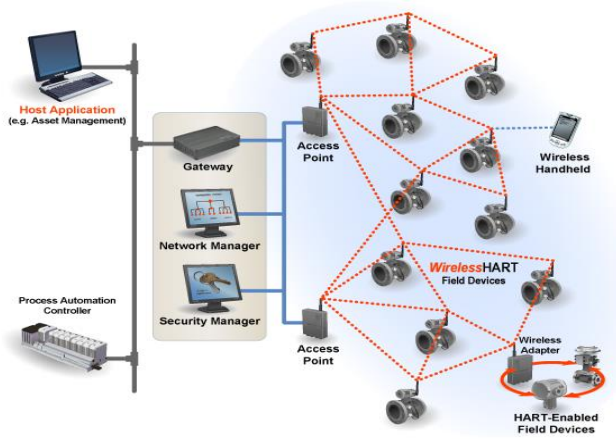


Obr. 9 – Porovnání komunikačního drátového modelu HART a bezdrátového WirelessHART (Hynčica a Pavlata, 2011a)

3.4.1 Architektura WirelessHART

Každá síť WirelessHART se skládá z následujících prvků:

1. Bezdrátové zařízení (wireless field devices) což jsou koncová zařízení.
2. Brána (gateway), která umožňuje komunikaci mezi koncovými zařízeními a hostitelskou aplikací.
3. Správce sítě (network manager) je zodpovědný za konfiguraci sítě, plánování komunikace mezi zařízeními, správu cest a monitoruje stav sítě.



Obr. 10 – Příklad topologie s využitím protokolu WirelessHART (Hart, 2012)

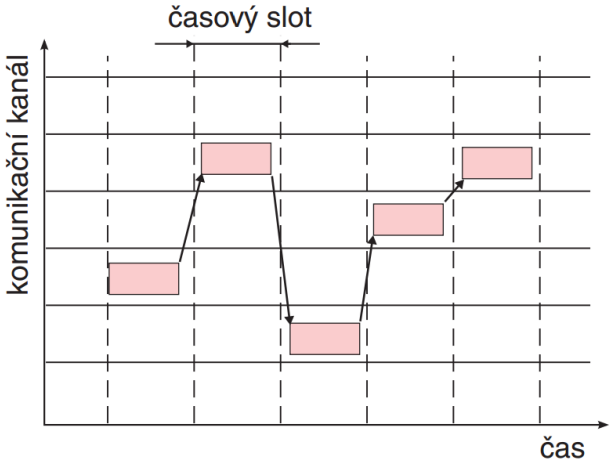
Každé zařízení v topologii WirelessHART je takzvané zařízení s plnou funkčností, schopné směrovat pakety v síti. V protokolu HART probíhá komunikace mezi dvěma koncovými zařízeními po drátovém spoji tím způsobem, že jedno zařízení je master a druhé slave. Pro zachování kompatibility pro drátový HART funguje v bezdrátové verzi protokolu HART správce sítě jako master a provozní přístroje jako slave. „Použitá metoda TDMA

(Time Division Multiple Access) napodobuje protokol token-pasing pro drátový HART.“ (Hynčica a Pavlata, 2011a)

3.4.2 Komunikační model

Protokol WirelessHART je postaven na normě IEEE 802.15.4-2006, ze které využívá pouze fyzickou vrstvu pro radiovou komunikaci v pásmu ISM 2,4 GHz.

Linková vrstva je upravená od IEEE 802.15.4-2006 tím, že je přidána možnost dynamické změny komunikačních kanálů TSCH (Time Synchronized Chanel Hopping) a časovým multiplexem TDMA. Přístup k médiu je rozdělen na časové sloty s pevnou délkou 10 ms. Střídání kanálů se mění podle pseudonáhodné sekvence, díky protokolu TSCH. Střídáním kanálů při přenosu v ISN pásmu 2,4 GHz je možné se vyhnout vzájemnému úzkopásmovému rušení. WirelessHART podporuje i vynechání některých komunikačních kanálů z důvodu velké zátěže nebo kvůli vznikajícímu rušení s jinými zařízeními. Předtím než začne zařízení vysílat, ověří si metodou CSMA/CA, zda je médium prázdné. Kombinací těchto metod je dosaženo při přenosu větší spolehlivosti a propustnosti než při použití pouze vrstvy MAC u IEEE 802.15.4. Navíc zařízení musí být synchronizována, za použití časové známky připojené k potvrzení příjmu rámce. Na obr. 11 je zobrazen možný výběr a přeskakování mezi jednotlivými kanály s časovými sloty. (Hynčica a Pavlata, 2011a)



Obr. 11 – Komunikace přístupové metody WirelessHART ke sdílenému médiu (Hynčica a Pavlata, 2011a)

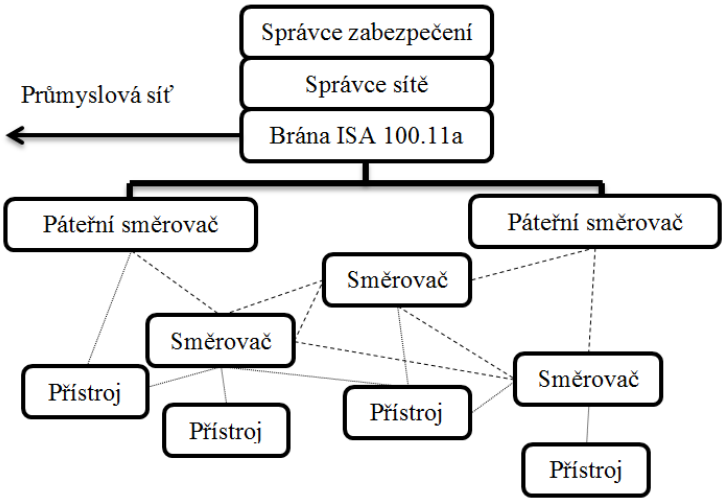
Na síťové vrstvě každé zařízení v síti pracuje jako směrovač. Topologie je typu mesh nebo hvězda. Směrování je typu graph routing (cesty pro pakety jsou nastaveny správcem sítě), nebo source routing (cesta je součástí paketu a při výpadku zařízení přes tuto cestu, je paket zahozen). U graph routingu se použije alternativní cesta.

Aplikační vrstva odpovídá drátové verzi.

3.5 ISA 100.11a

Jedná se o bezdrátovou normu od organizace ISA (International Society of Automation). Uplatnění této normy je především v automatizaci, monitorování a řízení procesů. V normě je zabudována i specifikace 6LoWPAN, která je orientována na protokol IP s využitím adresování IPv6.

3.5.1 Architektura



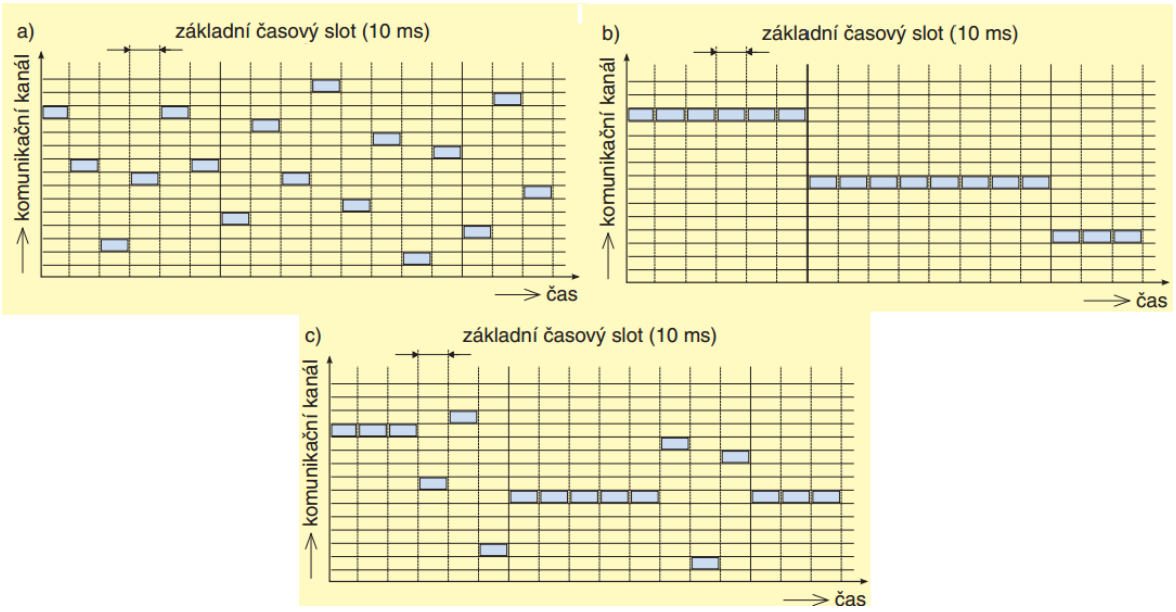
Obr. 12 – Příkladová ukázka topologie ISA100.11a překresleno (Hynčica a Pavlata, 2011b)

Role zařízení v síti ISA100.11a jsou následující:

1. Provozní přístroje – jejich role v síti je produkování nebo konzumování dat. Nepodílejí se na směrování, ale mohou komunikovat s více směrovači a vysílat jim stejná data v jednom časovém slotu, čímž se dosáhne větší spolehlivosti přenosu.
2. Bezdrátové směrovače – směrují data v rámci jedné podsítě.
3. Páteřní směrovače – směřují data přes páteřní síť.
4. Správce sítě – řídí a spravuje celou síť.
5. Správce zabezpečení – spravuje kryptografické klíče.
6. Brána – rozhraní mezi sítí ISA100.11a a dalšími systémy.

3.5.2 Komunikační model

ISA 100.11a obdobně jako WirelessHART využívá fyzickou vrstvu normy IEEE 802.15.4-2006 a definuje si vlastní linkovou a aplikační vrstvu. Na linkové vrstvě využívá kombinaci přístupu k médiu TDMA, CSMA a dynamickou změnu kanálu. Přístup k jednotlivým kanálům je rozdělen na časové sloty s volitelnou délkou 10 až 14 ms. Podle délky časového slotu se určuje rychlost přeskakování mezi jednotlivými komunikačními kanály. Pro krátké časové sloty se používá rychlé přeskakování mezi kanály založené čistě na metodě TDMA. Oproti tomu dlouhé časové sloty používají pomalou změnu kanálů. Časové sloty se spojí do jednoho dlouhého bloku a jsou odesílány na jednom společném kanálu. Pro dlouhé sloty se používá přístupová metoda CSMA-CA převzatá z linkové vrstvy normy IEEE 802.15.4. Další možností je kombinace obojího, což je znázorněno na obr. 13.



Obr. 13 – Příklad přeskakování kanálů u normy ISA 1000.11a, a) rychlé přeskakování, b) pomalé, c) kombinace obojího (Hynčica a Pavlata, 2011b)

Výběr komunikačních kanálů je centrálně řízen správcem sítě a to tak, že se skáče vždy minimálně o 3 kanály, tedy o 15 MHz, čímž by se mělo docílit, že následující sloty nebudou ve stejném přenosovém pásmu téhož kanálu Wi-Fi. Správce sítě si vede vlastní statistiku jednotlivých kanálu a podle počtu neobdržených potvrzení o doručení dat zařazuje nebo odebírá ze sekvence komunikační kanály. Podobně fungují i jednotlivá zařízení v síti, která si zprostředkovávají informace o svých sousedech a pak vybírají kanály s lepší spolehlivostí pro přenos.

Linková vrstva zajišťuje směřování paketů uvnitř podsítě. Směrování je založené na algoritmu graph routing, tedy podle komunikačních cest sestavených správcem sítě a uložených pod identifikátorem v tabulce cest. Díky redundantním cestám se rozlišují i cesty s větší propustností nebo spolehlivostí.

Na síťové vrstvě ISA 100.11a využívá protokol 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network). Tento protokol specifikuje internetovou konektivitu bezdrátového zařízení se standardem IEEE 802.15.4. Přenos paketů IPv6 přes síť WPAN naráží na problémy maximálního rámce v této síti a příliš velké délky adresy a hlaviček protokolů IPv6. Toto se řeší na linkové vrstvě pomocí fragmentace hlaviček a zkracování adres. Interpretování IPv6 je řešeno až po průchodu paketu sítí ke směrovači vrstvou 6LoWPAN.

Transportní vrstva je řešena protokolem UDP tedy nezárukovou službou přenosu.

Aplikační vrstva obsahuje objektově orientovanou podvrstvu, pro podporu uživatelských aplikací, které se tváří jako procesy. Poskytují služby pro připojení brány k nadřazenému systému, či podporu dalších protokolů (profibus, HART) a jejich tunelování a mapování se provádí na aplikační vrstvě. (Hynčica a Pavlata, 2011b)

3.6 Protokol WIA-PA

Vývoj protokolu WIA-PA (Wireless nerwork for Industrial Automation) byl zahájen 2007 a na podzim 2008 byl schválen jako veřejně přístupná specifikace IEC pod označením IEC/PAS 62601. Tento protokol je postaven na podobných principech jako WirelessHART a ISA 100.11a, ale na rozdíl od těchto protokolů má plnou kompatibilitu s původní normou IEEE 802.15.4. (Hynčica a Pavlata, 2011b)

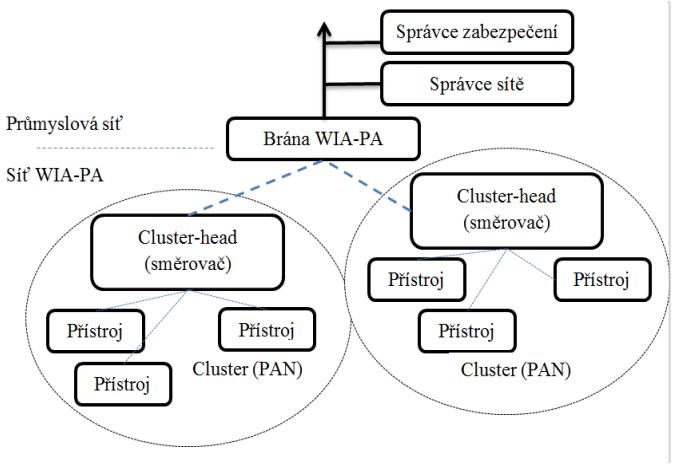
3.6.1 Architektura WIA-PA

V topologii sítě WIA-PA se nacházejí následující zařízení:

1. Nadřazené rozhraní (správa sítě).
2. Brána – propojení sítě WIA-PA s dalšími protokoly.
3. Směrovač – slouží k propojení různých částí sítí WIA-PA.
4. Přístroj – funguje jako akční člen.
5. Přenosný přístroj – sloužící pro diagnostiku a konfiguraci zařízení.

Navíc jsou v této síti ještě dvě logická zařízení:

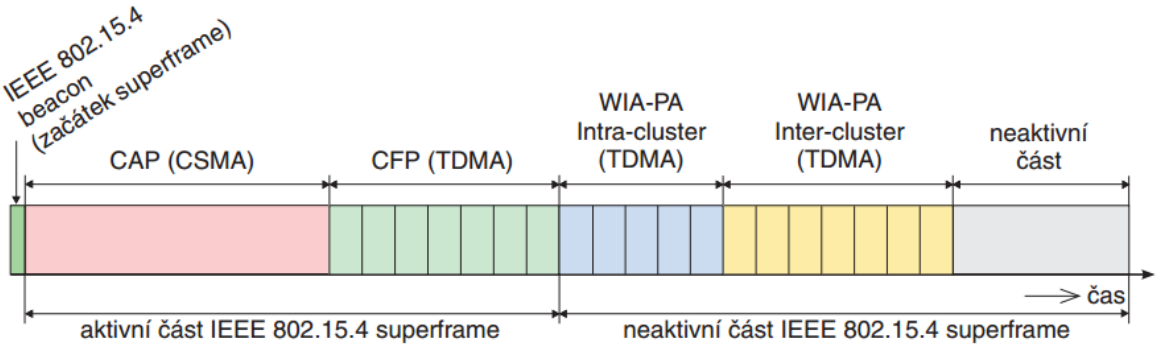
1. Správce sítě – se stará o komunikaci v síti, udržuje směrovací tabulky a monitoruje síť.
2. Správce zabezpečení – slouží pro autentifikaci jednotlivých přístrojů a spravuje klíče.



Obr. 14 – Příklad topologie WIA-PA, překresleno (Hynčica a Pavlata, 2011b)

3.6.2 Komunikační model

Komunikace probíhá v pásmu ISM 2.4 GHz podle normy IEEE 802.15.4-2006. Na linkové vrstvě se používá dle normy IEEE 802.15.4 takzvaná „super-rámcová struktura“ doplněná linkovou podvrstvou.



Obr. 15 – Struktura super-rámce (Hynčica a Pavlata, 2011b)

Komunikační super-rámec se dělí na dvě části, aktivní a neaktivní. Synchronizace jednotlivých zařízení probíhá na začátku super-rámce určitou posloupností nazvanou beacon. Komunikace probíhá v aktivní části rozdělené na 16 časových slotů. V prvních slotech aktivní části probíhá náhodný přístup CAP (Contention Access Period) s přístupem CSMA k médiu.

V druhé aktivní části je volitelná fáze CFP (Contention Free Period) IEEE 802.15.4 super-rámce s vyhrazeným přístupem TDMA k médiu. Další dvě části slouží ke komunikaci uvnitř a mezi clustery.

Při přenosu se využívá více kanálů, aby byl možný výskyt několika clusterů na stejném místě a ve stejném čase pomocí přístupu FDMA (Frequency Division Multiple Access). Síť umožňuje i dynamickou změnu kanálu pro různé časti super-rámce. Topologie sítě je hybridního charakteru. Jednotlivé směrovače tvoří pro koncové přístroje jakoby správce sítě (topologie hvězda). Také směrovače komunikují mezi jednotlivými clustery, čímž vzniká topologie typu mesh.

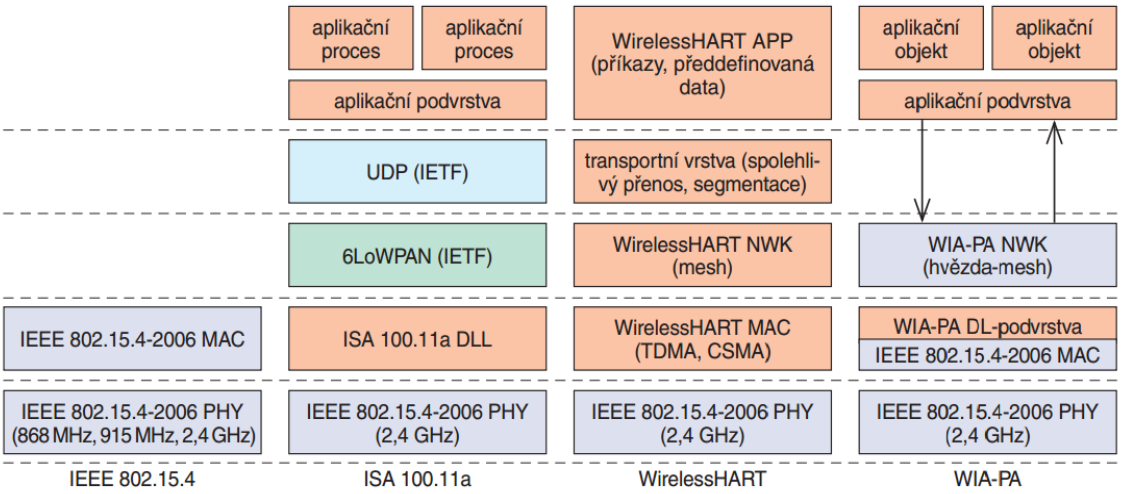
Směrování mezi jednotlivými clustery je řešeno statickými algoritmy metodou graph route.

Na aplikační vrstvě může existovat více aplikačních objektů na jednom zařízení, které mezi sebou můžou komunikovat. Podpora dalších protokolů jako je Profibus, HART a Modbus se využívá virtuálního zařízení. (Hynčica a Pavlata, 2011a)

4 Porovnání parametrů

V této kapitole si zopakujeme nejdůležitější parametry jednotlivých protokolů a porovnáme je mezi sebou.

4.1 ISA 100.11a, WirelessHART, WIA-PA



Obr. 16 – Komunikační modely IEEE 802.15.4, ISA 100.11a, WirelessHART a WIA-PA (Hynčica a Pavlata, 2011c)

Normy ISA 100.11a, WirelessHART, WIA-PA mají podobný základ, komunikují v pásmu ISM na 2,4 GHz a svoji fyzickou vrstvu berou z normy IEEE 802.15.4-2006. Od linkové vrstvy, kromě protokolu WIA-PA, která si udržuje zpětnou kompatibilitu s MAC vrstvou, se začínají lišit od již zmíněné normy IEEE 802.15.4. Tyto standardy podporují dynamickou změnu přenosových kanálů, liší se pouze v sekvenci přístupu. WirelessHART má sekvenci pevně danou od správce sítě. ISA 100.11a ji má také pevně danou s možností adaptace na statistiky přenosu jednotlivými kanály. WIA-PA používá svůj super-rámec.

5 Praktická část realizace senzorové sítě

V této části budou realizovány měření a simulace sítě ZigBee v topologii typu mesh a strom a porovnány jejich parametry při přenosu a komunikaci.

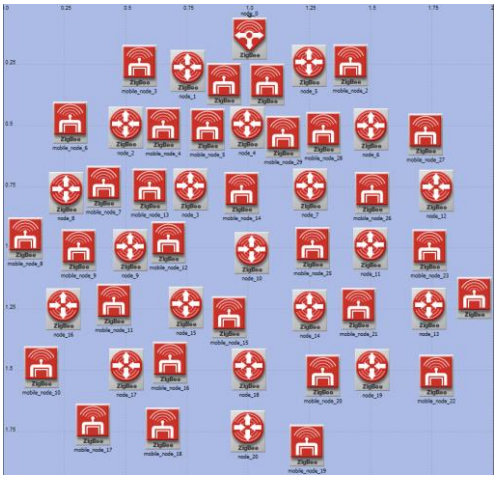
Měření budou prováděna v simulačním programu OPNET Modeler. OPNET je program pro tvorbu, simulaci a analýzu sítí v softwarovém prostředí. Také se hodí pro nastavení a optimalizaci sítě. Jedná se o grafický nástroj s velkou knihovnou různých zařízení a možností nastavení různých parametrů.

Pro jednotlivé sítě musíme nejdříve nastavit potřebné parametry provozu. Tyto hodnoty vyčteme z datasheetu výrobce jednotlivých zařízení, které chceme aplikovat v síti. Postup návrhu v Opnetu je tedy následující:

1. Vytvoření nového projektu.
2. Výběr jednotlivých zařízení.
3. Nastavení parametrů.
4. Nastavení sledovaných parametrů.
5. Simulace sítě.
6. Zobrazení výsledků.

5.1 Simulace zpoždění

Pro simulaci byla vytvořena síť ZigBee. Jednotlivá zařízení byla umístěna na rozlohu dva čtverečné kilometry. Bylo zde umístěno 20 směrovačů, 30 koncových zařízení a jeden koordinátor sítě. Všechna tato zařízení mají vysílací výkon 0,001 W a citlivost přijímače −94 dB. to odpovídá hodnotám reálného vysílače MRF24J40 od firmy Microchip. Bude provedeno měření pro tuto konfiguraci, jak v topologii mesh, tak strom.



Obr. 17 – Příklad topologie

Druhá konfigurace sítě je podobná té první, pouze s tím rozdílem, že jsou všechna zařízení na menší ploše jeden kilometr čtverečný a mají snížený vysílací výkon na 0,0001 W, to odpovídá hodnotě −10 dB.

Cílem sledování jsou parametry zpoždění přenosu v závislosti na velikosti a topologii sítě. Sledované hodnoty jsou:

1. Delay – zpoždění všech paketů přijatých MAC vrstvou a následné přeposlání vyšší vrstvě.
2. End-to-End Delay – Celkové zpoždění mezi příjmem a opětovným odesláním paketu.

5.1.1 Výsledky simulace

Byla naměřena data pro simulaci zpoždění paketu pro topologii strom 2 × 2 km a strom 1 × 1 km a mesh 2 × 2 km. Dále byl z hodnot vypočten aritmetický průměr pro každou topologii.

Tab. 4 – Naměřené hodnoty simulací

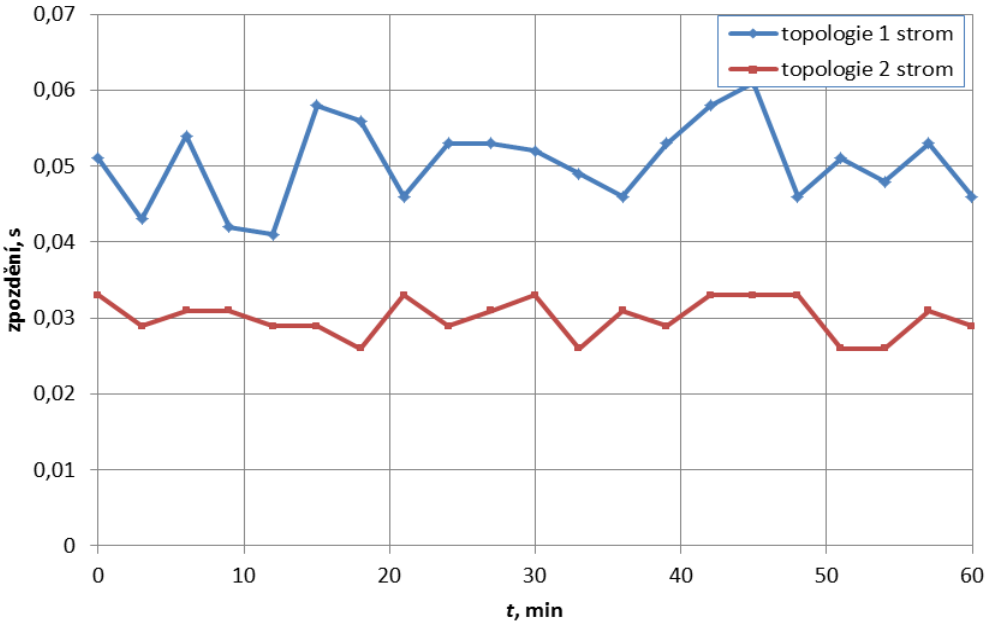
Čas, min	**Topologie**		
	Strom 2×2 km	**Strom 1×1 km**	**Mesh 2×2 km**
	Zpoždění, s		
0	0,051	0,033	0,035
3	0,043	0,029	0,025
6	0,054	0,031	0,041
9	0,042	0,031	0,039
12	0,041	0,029	0,035
15	0,058	0,029	0,028
18	0,056	0,026	0,026
21	0,046	0,033	0,038
24	0,053	0,029	0,029
27	0,053	0,031	0,042
30	0,052	0,033	0,027
33	0,049	0,026	0,039
36	0,046	0,031	0,031
39	0,053	0,029	0,028
42	0,058	0,033	0,033
45	0,061	0,033	0,038
48	0,046	0,033	0,042
51	0,051	0,026	0,036
54	0,048	0,026	0,039
57	0,053	0,031	0,029
60	0,046	0,029	0,035
Průměr, s	0,051	0,031	0,034

Pro výpočet průměrné hodnoty zpoždění byl použit tento vzorec:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i}^{n} x_i = \frac{1}{n}\left(x_1 + x_2 + \ldots + x_n\right) = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \tag{1}$$

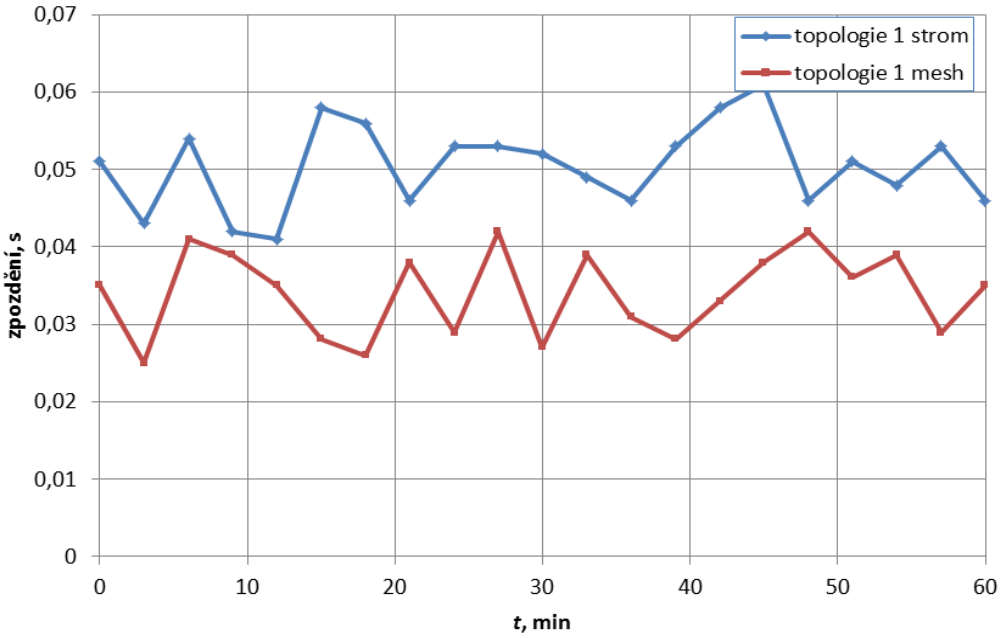
Ze simulace, jak je uvedeno na obr. 18, je zřejmé, že zpoždění přenosu paketu ve větší síti je zhruba o 17 ms vyšší než v méně rozlehlé síti, ačkoliv ve větší síti je vyšší vysílací výkon.

Výsledkem tedy je, že čím je vyšší vzdálenost mezi jednotlivými uzly, tím dochází k většímu zpoždění paketu i přes vyšší vysílací výkon. Hodnota zpoždění může být ovlivněna přeslechy a nastavenou citlivostí přijímače. Data přijatá velmi nízkým výkonem mohou být považována za šum.



Obr. 18 – Zpoždění v síti s rozdílnou rozlehlostí

Při porovnání zpoždění stejných sítí, ale rozdílných topologií je z obr. 19 zřetelné, že zpoždění v topologii mesh je menší než v topologii strom. Průměrné zpoždění topologie strom je 0,051 s a topologie typu mesh je pouze 0,034 s. To je důsledkem toho, že v síti typu mesh se hledá nejkratší cesta a tím se urychlí výsledný přenos. Dále má tato topologie výhodu při výpadku nějakého zařízení ze sítě. Najde se alternativní cesta, přes kterou je daný paket přeposlán a nedojde tak k výpadku sítě.



Obr. 19 – Zpoždění v síti s rozdílnou topologií

5.2 Simulace chybovosti přenosu

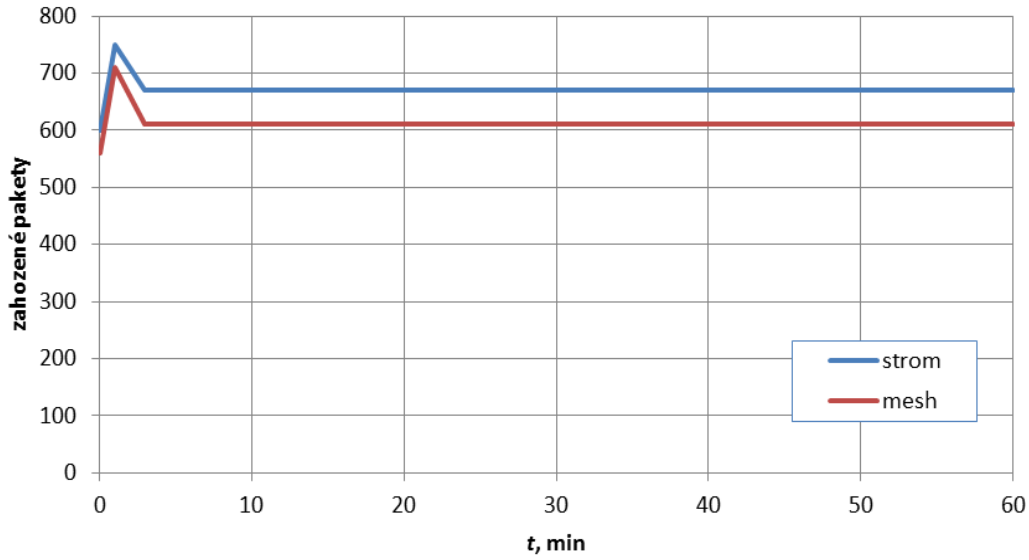
V této simulaci bude změřena chybovost přenosu dat v senzorové síti. Chybovost je poměr chybně přenesených paketů ke všem odeslaným.

Byly použity následující prvky pro zjištění parametrů chybovosti:

1. Data dropped – počet zahozených paketů MAC vrstvou.
2. Traffic dropped on route – udává počet paketů, které byly zahozeny přenosem k cíli.

5.2.1 Výsledky simulace chybovosti přenosu

V této simulaci byla použita konfigurace 2 se zařízeními na menší ploše jeden kilometr čtverečný a to s rozdílnými topologiemi typu mesh a strom. Jednotlivé uzly od sebe měly menší vzdálenost a docházelo tedy k většímu rušení.



Obr. 20 – Zahozené pakety při sestavování sítě

Na obr. 20 je zřetelně vidět, že k největší ztrátě paketů docházelo při sestavování sítě. Tedy v prvních třech minutách, od této doby se ztráta paketů ustálila na konstantní hodnotu. Dále vyplývá, že topologie typu strom má větší chybovost přenosu než mesh.

Pomocí simulace sítě v určitém čase byla vypočítána spolehlivost přenosu sítě. Naměřená data z desáté minuty simulace jsou zaznamenána v následující tab. 5.

Tab. 5 – Data pro simulaci sítě v 10. minutě

	Strom 1 × 1 km	**Mesh 1 × 1 km**
Vyslané pakety	1600	1600
Přijaté pakety	280	328
Zahozené pakety	680	616
Obstálé pakety	640	656

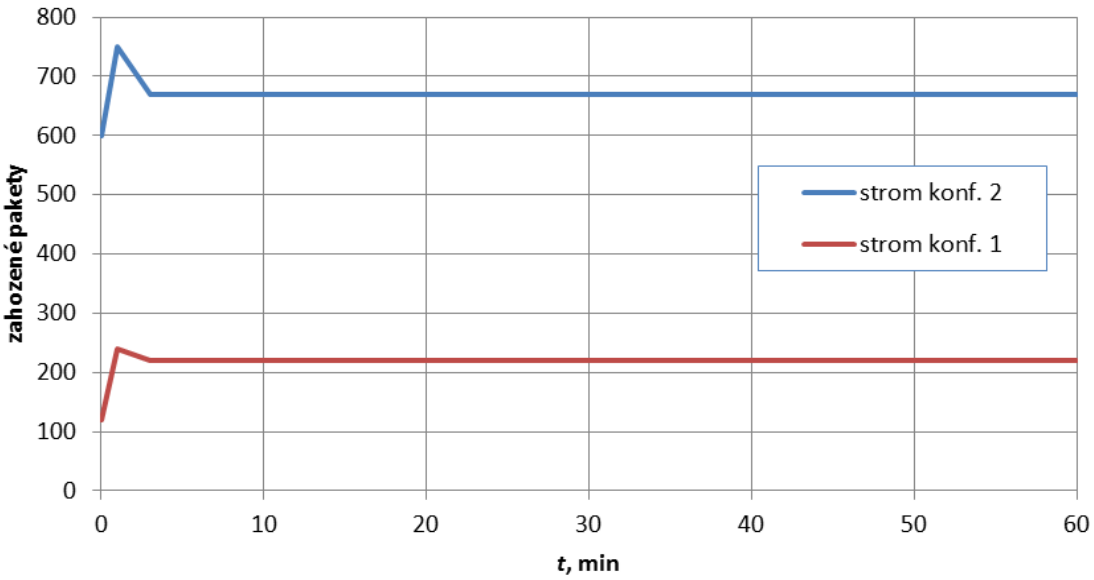
Když sečteme přijaté pakety, zahozené pakety a obstálé pakety, měli bychom dostat celkově všechny pakety odeslané. Z těchto dat je možno vypočítat chybovost přenosu v síti.
Chybovost topologie strom 1 × 1 km:

$$chybovost = \frac{zahozené}{vyslané} = \frac{680}{1600} \cdot 100 = 42{,}5\ \% \tag{2}$$

Chybovost topologie mesh 1×1 km:

$$chybovost = \frac{zahozené}{vyslané} = \frac{616}{1600} \cdot 100 = 38{,}5\ \% \tag{3}$$

Z výsledků je patrné, že síť topologie mesh má nižší chybovost přenosu, což by ji předurčovalo jako vhodnější. Nicméně chybovost 38,5 % je stále hodně vysoká. V další simulaci proto bude změřena konfigurace 1 s topologií typu strom 2 × 2 km a porovnána s konfigurací 2 typu strom 1 × 1 km z předcházejícího příkladu.



Obr. 21 – Zahozené pakety se sestavováním sítě

Z obr 21 je vidět, že znovu byla větší chybovost při sestavování sítě v prvních minutách s následným ustálením na konstantní hodnotu. Dále je vidět, že zahozené pakety v sítí s řidším rozmístěním uzlů má mnohem menší riziko zahození paketu, než v konfiguraci 2 s hustší koncentrací komunikujících uzlů.

Tab. 6 – Data pro simulaci rozdílných konfigurací

	Strom 1×1 km	**Strom 2×2 km**
Vyslané pakety	1600	1940
Přijaté pakety	280	270
Zahozené pakety	680	85
Obstálé pakety	640	1585

$$chybovost = \frac{zahozené}{vyslané} = \frac{85}{1940} \cdot 100 = 4{,}4\,\% \tag{4}$$

V porovnání s hustším a řidším umístěním komunikujících prvků v síti dochází k velkému rozdílu v procentech chybovosti jednotlivých zapojení. Topologie strom 2 × 2 km má chybovost 4,4 % a topologie typu strom1 × 1 km 42,5 %.

Tato velká změna chybovosti může být způsobena vzájemným rušením senzorů v síti. Vypočtená chybovost 4,4 % je v průmyslové praxi považována za přijatelnou.

Závěr

V práci byly teoreticky rozebrány základní principy a možnosti využití senzorových sítí v průmyslu. Bylo popsáno základní rozdělení nízko-výkonových sítí a jejich realizace logické a fyzické topologie. Byly popsány využívané protokoly s jejich specifiky a využitím v porovnání se síťovými protokoly počítačových sítí architektury TCP/IP. Také byl navrhnut model senzorové sítě s následnou simulací v programu OPNET.

V prvních kapitolách byly teoreticky rozebrány používané protokoly, specifika a jejich možná aplikace do senzorových sítí. V další kapitole byly rozebrány možné rozdíly mezi jednotlivými protokoly a určení. Byla rozebrána jejich fyzická i logická topologie. Byly vysvětleny jednotlivé vlastnosti, výhody či nevýhody v porovnání s konkurenčními protokoly a standardy. Následně tyto poznatky byly použity v praktické části.

V praktické části se pozornost upírala na simulaci, rozbor a chování senzorové sítě ZigBee v programu OPNET Modeler. Pro tvorbu senzorových sítí v programu OPNET bylo vytvořeno velké množství různých senzorových sítí, kde se programově simulovalo desítky hodin provozu těchto sítí. Z těchto simulací byla shromažďována data, ze kterých se následně mohl udělat závěr.

Pro analýzu velikosti zpoždění přenosu paketu bylo patrné větší zpoždění v sítích topologie typu strom než v sítích topologie typu mesh. Bylo zjištěno, že paket putoval sítí s rozlohou 2×2 km^2 a rozdílnou topologií:

Mesh – 34 ms;

Strom – 51 ms.

Z výsledků je zřejmé, že topologie mesh měla menší zpoždění přenosu dat než síť s topologií strom.

Pro měření spolehlivosti byl důležitým faktorem poměr zahozených paketů k celkovému počtu vyslaných paketů do sítě. Zde byla potvrzena větší chybovost u sítí s větší hustotou komunikujících uzlů. Tedy sítě s menší hustotou prvků na rozsáhlejší ploše mají méně zahozených paketů.

Měřením bylo zjištěno, že chybovost na konfiguraci s menší plochou 1×1 km^2 byla:

Mesh – 38,5 %;

Strom – 42,5 %.

Dále byla změřena i chybovost přenosu na konfiguraci se stejným počtem zařízení na ploše 2×2 km^2. Topologie typu mesh měla chybovost 4,4 %, což je v praxi již přijatelné procento.

Literatura

BÁRTA, T. 2010. *Implementace klasifikátoru v bezdrátové senzorové síti*. [online]. Bakalářská práce. Praha: České Vysoké Učení v Praze, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra kybernetiky a měření, 44 s. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/BP_2011_Barta_locked.pdf

BEDNAŘÍK, M. 2011. *Návrh paketového analyzátoru pro bezdrátové senzorové sítě založené na standardu IEEE 802.15.4*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 52 s.

HART Communication Protocol, 2012. *HART Communication Protocol and Foundation* [online]. [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_how_it_works.html

HYNČICA, O.; PAVLATA, K. 2011a. Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v procesní automatizaci (1. část). *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. [cit. 15. 03. 2014]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43411.pdf

HYNČICA, O.; PAVLATA, K. 2011b. Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v procesní automatizaci (2. část). *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. [cit. 15. 03. 2014]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43590.pdf

HYNČICA, O.; PAVLATA, K. 2011c. Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v procesní automatizaci (3. část). *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. [cit. 15. 03. 2014]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=43411

KLUES, K. 2006. *Power Management in Wireless Networks* [online]. [cit. 12. 03. 2014]. Dostupné na http://www.cs.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/energy_mgmt/index.html

KOTON, J.; ČÍKA, P.; KŘIVÁNEK, V. 2006. *Standard nízko rychlostní bezdrátové komunikace ZigBee*. Feld ČVUT [online]. [cit. 15. 03. 2014]. Dostupné z: http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001

PETERKA, J. 2007a. Rodina protokolů TCP/IP. *Báječný svět počítačových sítí* [online]. [cit. 15. 03. 2014]. Dostupné z: http://www.earchiv.cz/b05/b0600001.php3

PETERKA, J. 2007b. Wi-Fi. *Báječný svět počítačových sítí* [online]. [cit. 15. 03. 2014]. Dostupné z: http://www.earchiv.cz/b07/b0400001.php3

PODHORSKÝ, M. 2012. *Bezdrátové senzorové sítě v průmyslové praxi*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 39 s.