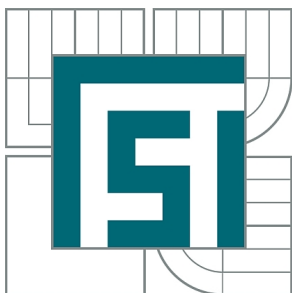


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

BEZDRÁTOVÉ SENZOROVÉ SÍTĚ V PRŮMYSLOVÉ PRAXI

WIRELESS SENSOR NETWORK IN INDUSTRIAL PRACTICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL PODHORSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÍTĚZSLAV MÁŠA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Podhorský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Bezdrátové senzorové sítě v průmyslové praxi

v anglickém jazyce:

Wireless sensor network in industrial practice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bezdrátové senzorové sítě (wireless sensor network, WSN) jsou progresivním komunikačním prostředkem používaným v procesním průmyslu pro sběr dat. Tématem práce je představení těchto sítí s ohledem na jejich praktické využití. Daná problematika zapadá do výzkumného programu nového centra „NETME Centre” při Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je seznámení se s technologií bezdrátových senzorových sítí (WSN) a jejich praktickým využitím v různých průmyslových odvětvích. Práce by měla předložit přehled využití WSN v průmyslové praxi a zhodnocení jejich potenciálu pro měření procesních veličin.

Seznam odborné literatury:

YICK J., MUKHERJEE B., GHOSAL D., Wireless sensor network survey, Computer Networks, 2008, 52:2292-2330.

LEWIS F. L., Wireless Sensor Networks, [online], 2004, [cit. 2010-09-20]. Dostupné z: <citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.98.794&rep=rep1&type=pdf>.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 2.11.2010

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Práce se věnuje tématu bezdrátových senzorových sítí. První část je zaměřena na komponenty bezdrátové sítě. Jsou popsány dvě základní části hardwaru, a to senzorový uzel a základní stanice. Dále jsou představeny základní vlastnosti této technologie a potřebná softwarová vybava pro její využívání.

Druhá část práce je zaměřena na použití bezdrátových senzorových sítí v průmyslové praxi. Představeny jsou konkrétní příklady reálného nasazení této technologie. Závěrečná kapitola naznačuje budoucí směr výzkumu v oblasti senzorových sítí a hodnotí potenciál k jejich průmyslovému využití.

Klíčová slova:

Komponenty bezdrátových senzorových sítí, aplikace bezdrátových senzorových sítí

Abstract

The bachelor thesis is dedicated to wireless sensor networks. The first part focuses on the wireless network components. Two basic hardware parts – sensor node and base station – are described there. The following topic speaks about the basic feature of this technology and software technology equipment for its use.

The second part of this bachelor thesis is focused on the using wireless sensor network in industrial practise. Specific examples of the real deployment if this technology are shown there. The final part foreshadows the future direction of research in wireless sensor networks and assesses their potential for industrial use.

Key words:

Components of wireless sensor networks, industrial application in practice

Bibliografická citace

PODHORSKÝ, M. *Bezdrátové senzorové sítě v průmyslové praxi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval

V Brně

Dne 16. 5. 2012

.....

PODĚKOVÁNÍ

Nejprve bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vítězslavovi Mášovi, Ph.D. za to, že mi pomáhal při sestavování bakalářské práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, že mi připravili takové podmínky, za kterých jsem mohl nerušeně pracovat a za to, že mě v mé práci vždy podporovali.

Obsah

1.	Úvod.....	8
2.	Představení technologie bezdrátových senzorových sítí.....	10
3.	Komponenty senzorových sítí.....	12
3.1	Hardware	12
3.1.1	Sensor nodes	13
3.1.2	Base station.....	15
3.2	Software.....	16
3.2.1	TinyOS.....	16
3.2.2	LabVIEW Wireless Sensor Network Pioneer.....	16
4.	Vlastnosti bezdrátových senzorových sítí.....	18
4.1	Používané komunikační standardy.....	18
4.1.1	ZigBee	19
4.1.2	WirelessHart	19
4.1.3	ISA100.11a	20
4.2	Mobilita	20
4.3	Napájení senzorových uzlů.....	21
4.4	Souhrn hlavních výhod.....	22
5.	Aplikace bezdrátových senzorových sítí.....	24
5.1	Bezdrátová senzorová síť instalovaná na vrtné plošině Gullfaks.....	25
5.2	Bezdrátové monitorování napětí ve šroubu	26
5.3	Měření elektromotorických sil v hutní peci.....	28
5.4	Monitorování výšky hladiny.....	30
5.5	Monitorování na rotační peci.....	31
5.6	Monitorování ložisek v letadlech.....	32
6.	Trendy	33
7.	Závěr	34
	Použitá literatura.....	35
	Seznam obrázků	38
	Seznam zkratk	39

1. Úvod

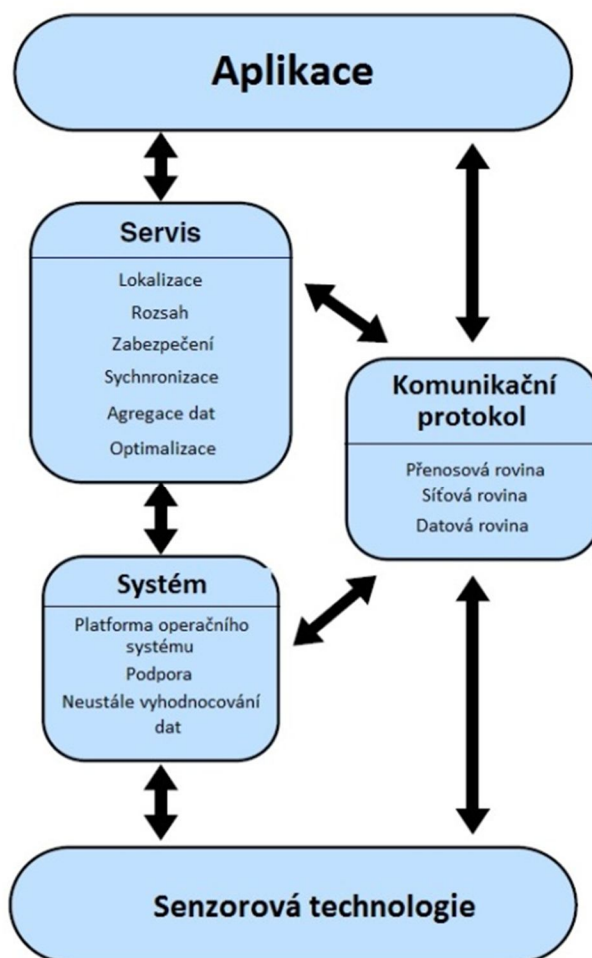
Technologie bezdrátových senzorových sítí (WSN – wireless sensor network) prokazuje velký potenciál pro průmyslovou aplikaci. Konkrétně v oblasti monitorování procesních veličin jako jsou tlak, vlhkost, teplota, průtok, hladina, viskozita, hustota nebo měření intenzity vibrací a to jako součást řídicího systému. Využití WSN pro monitorování a řízení procesů poskytuje velké výhody oproti tradičním drátovým systémům (žádná elektroinstalační omezení, snadná údržba, snížení nákladů na elektromontáže, viz kapitola 4.4). Výraznějšímu rozšíření však brání specifické požadavky průmyslové praxe, které mají v případě WSN nepříznivý dopad na investiční i provozní náklady.

Bezdrátové senzorové sítě si získávají celosvětovou pozornost zejména v posledních letech s nárůstem MEMS (micro electro mechanical systems) technologií, které usnadňují vývoj tzv. *intelligentních senzorů*. Jedná se o malé senzory, jejichž výhodou je nižší pořizovací cena v porovnání s tradičními senzory. Tyto senzorové uzly mohou snímat, měřit a shromažďovat informace a na základě místního rozhodovacího procesu mohou přenášet snímaná data k uživateli. [1]

Na rozdíl od tradičních sítí, WSN mají svůj vlastní koncept, ale také různá omezení. Omezení se týkají zejména objemu dostupné energie, dosahu komunikace, šířky komunikačního pásma, kapacity zpracování dat a objemu úložiště v každém jednotlivém uzlu. Konstrukční omezení se odvíjí od konkrétní aplikace, podle toho v jakém prostředí jsou nasazeny. Prostoru totiž hraje klíčovou úlohu při rozhodování o velikosti sítě a rozmístění uzlů.

Probíhající výzkum v oblasti WSN představuje nové návrhové koncepce, vytváří a zlepšuje stávající protokoly, buduje nové aplikace a zavádí nové algoritmy. Témata pro další výzkum a vývoj technologie WSN shrnuje Obr. 1. V této práci se budeme věnovat především následujícím oblastem:

- popis současných potřeb hardwarových komponent WSN
- porovnání různých typů bezdrátových senzorových sítí
- představení současných nejvíce používaných aplikací
- přehled aktuálních trendů v oblasti senzorových technologií



Obr. 1: Klasifikace nejruznějších témat pro výzkum a vývoj technologie WSN, přeloženo z [1]

2. Představení technologie bezdrátových senzorových sítí

Počátky WSN jsou spojeny především s vojenským výzkumem, který byl hnacím motorem ve vývoji a měl dostatek finančních i technických prostředků k vývoji. Protože WSN spojuje snímací, komunikační a výpočetní oblasti technologie, v následujících obdobích těžilo především ze samostatného vývoje těchto oblastí. [2]

Výzkum vojenských senzorových sítí začal kolem roku 1980 v programu DNS (Distributed Sensor Networks) podporovaný agenturou DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) pod záštitou amerického ministerstva obrany. ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network - předchůdce Internetu) byl touto dobou v provozu už několik let. Cílem bylo zjistit, zda přístup ARPANET ke komunikaci by mohl být rozšířen také na senzorové sítě. V technologii DNS bylo využito mnoho prostorově distribuovaných, levných snímacích uzlů, které by spolupracovaly mezi sebou navzájem, ale zároveň by operovaly samostatně. Nutno připomenout, že v 80. letech, byly jednotlivé uzly tak velké, že musely být na vozidlech, a všechny komponenty byly vyrobeny na zakázku. Obr. 2 ukazuje uzel jako mobilní vozidlo a komunikační bránu (*gateway*) umístěnou ve vozidle. [3]



Mobile Node



Equipment Rack

Obr. 2: Prvky distribuované senzorové sítě okolo roku 1985 [2]

Až pokrok v oblasti informačních technologií a komunikace během 21. století způsobil významný posun ve vývoji WSN. Rozměry i pořizovací náklady na senzory, procesory a komunikační zařízení se dramaticky snížily. Samotné senzory obsahující snímání, výpočetní jádro a komunikaci na jednom čipu, začaly dosahovat velikostí srovnatelných s krabičkou od sirek a hmotností řádově v gramech. Výzkum se také přesunul z čistě vojenského či akademického prostředí do komerční oblasti [2].

Jak už bylo naznačeno, současné senzory jsou založené na MEMS technologii, která je ve své nejobecnější podobě definována jako miniaturní mechanické a elektromechanické prvky. Díky této technologii se bezdrátové sítě stávají energeticky nenáročné a umožňují rozšíření pro mnoho dalších aplikací. Roku 1997, byl odstartován projekt *SmartDust* s cílem demonstrovat možnost vytvoření modulu o objemu 1mm^3 , který by byl schopen komunikovat a snímat data ze svého okolí (například světlo, teplotu, vibrace, magnetismus nebo chemické látky). Projekt byl představen jako dokončený v roce 2001[4]. Dalším vývojem vznikaly nové typy senzorových uzlů a to vedlo také ke vzniku firem zabývajících se výrobou potřebného hardwaru a vývojem aplikací. Nejznámějšími společnostmi vyvíjejícími senzorové systémy jsou *Ember*, *Crossbow* a *Sensoria*. Budoucí směr naznačuje společnost *Dust Inc.*, Berkeley, CA. Tato společnost vyvíjí MEMS senzory schopné snímání a komunikace, které by měly dosahovat velikosti krychlového 1mm^3 . Je jasné, že WSN tvořená tímto „chytrým prachem“ bude umožňovat využití ve zcela výjimečných oblastech [2].



TRSS Node



Crossbow



Ember



Sensoria



Dust, Inc.

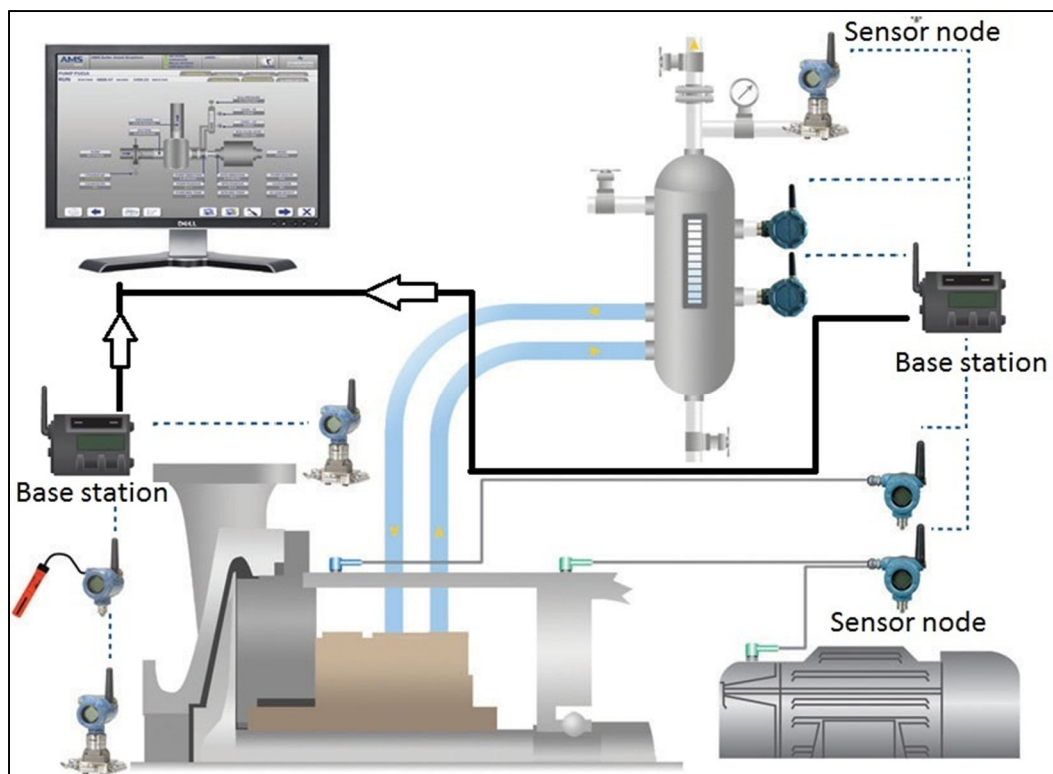
Obr. 3: Postupný vývoj senzorových uzlů s názvy výrobců [3]

3. Komponenty senzorových sítí

Bezdrátové senzorové sítě se obvykle skládají z velkého množství levných a energeticky nenáročných senzorů rozložených na velké ploše. Hlavní rozdíl mezi WSN a tradiční sítí je, že senzorové uzly mají obvykle velmi omezené zdroje energie. Bezdrátové rádiové technologie používané v dnešních sítích (viz kapitola 4.1) spadají díky nízké spotřebě především do oblasti standardu IEEE 802.15.4. Také jejich komunikační protokoly jsou navrženy s ohledem na co nejmenší odběr energie. [5]

3.1 Hardware

Hardwarové schopnosti senzorových uzlů jsou omezené rozměry a použitím bateriového napájení. Jelikož je jedním z hlavních požadavků na senzorové uzly nízká pořizovací cena, většina senzorů se skládá z nízkonákladové jednotky CPU a radiofrekvenčního (RF) vysílače. Rovněž jejich síťový protokol je jednoduchý. Proto se jedno ze základních senzorových zařízení používá specifickým způsobem. Jedná se o základní stanici (označována jako *gateway* nebo *base station*). Základní stanice, která řídí celou senzorovou síť, komunikuje s jinými síťovými technologiemi (např. PC) [5]. Síť se skládá ze senzorových uzlů, které jsou závislé na komunikaci se základní stanicí. Příklad zapojení kompletní bezdrátové sítě ilustruje Obr. 4.



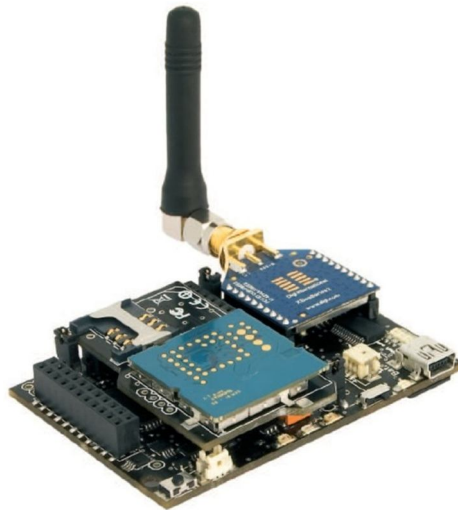
Obr. 4: Průmyslová bezdrátová senzorová síť [6]

Na všechny komponenty jsou kladeny vysoké požadavky. Patří mezi ně:

- stabilní komunikační technologii
- nízkonákladové energeticky úsporné procesory
- přizpůsobitelné I/O pro nejrůznější senzory
- energie zdroje s dlouhou životností

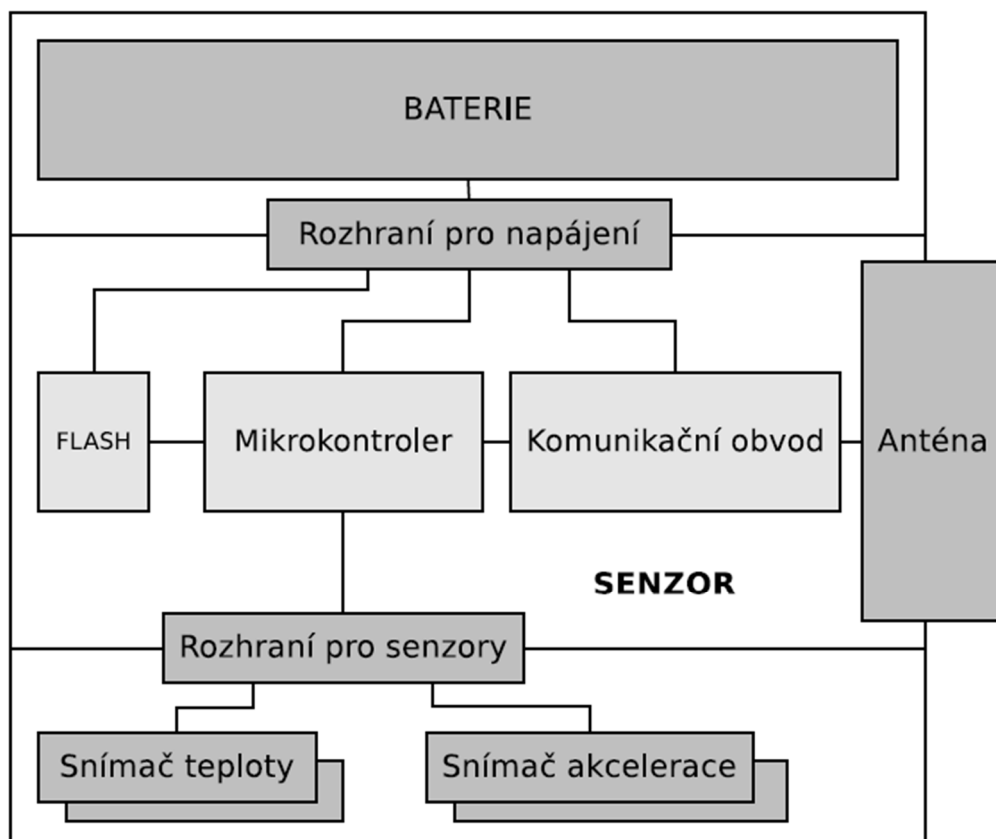
3.1.1 Sensor nodes

Bezdrátové senzorové uzly (obr. 5) jsou hlavním prvkem v bezdrátových senzorových sítích. Skrze senzorové uzly probíhá veškeré snímání fyzikálních veličin, následné uložení a odesílání přes komunikační jednotku.



Obr. 5: Senzorový uzel od firmy Libelium

Při výběru hardwarových komponent pro senzorový uzel, budou rozhodujícími faktory velikost senzorového uzlu, náklady na pořízení a spotřeba energie. *V některých extrémních případech by celý senzor mohl být menší než 1 cm^3 , váhou nižší než 100 g, levnější než 1 USD a spotřebou nižší než $100\text{ }\mu\text{W}_{el}$ [5].* V reálných podmínkách jsou nejdůležitějšími parametry jednoduché napájení a náklady na pořízení. Základní senzorový uzel se skládá z pěti hlavních komponent (Obr. 6):



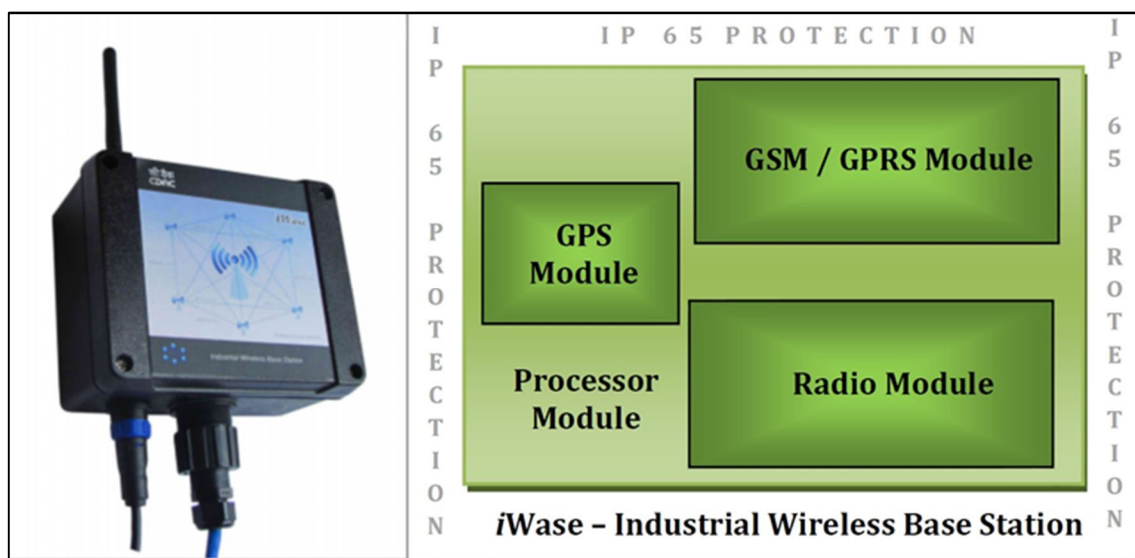
Obr. 6: Komponenty sensorového uzlu [4]

- Mikrokontroler – je výpočetním jádrem sensorového uzlu. Úlohou je zpracování dat ze snímačů a uzlů a následně rozhodnout kdy a kam je poslat. [5]
- Komunikační jednotka – slouží k výměně dat mezi jednotlivými uzly. Komunikace probíhá na RF bázi, která poskytuje poměrně dlouhý dosah, vysokou přenosovou rychlost a přijatelnou chybovost při přiměřených energetických výdajích
- Snímač – je převodník, který produkuje měřitelnou odezvu na vnější podněty jako je teplota, vlhkost, elektromagnetické pole nebo změnu v chemické koncentraci. Snímač hraje klíčovou roli v ceně celého sensorového uzlu. Dále vyjmenujeme hlavní sensorové technologie, které mohou najít uplatnění v oblasti WSN. Obecně lze tyto technologie rozdělit do následujících kategorií: Mechanický snímač, termální snímač, optický a chemický snímač
- Paměť – v převážné většině případů se používá paměť s technologií flash, která zajišťuje ukládání dat a paměť se nevymaže při nedostatku energie
- Baterie (více viz kapitola 4.3)

3.1.2 Base station

Základní stanice (base station) je speciální uzel, který plní různé funkce systému. Na jedné straně je cílem získávat informace od všech uzlů, na druhé straně má na starost organizaci a řízení celé sítě. Nakonec se také podílí na vyhodnocování dat, ať už je to detekce poplachových situací nebo odolnost proti chybným akcím (např. detekce chybně naměřených hodnot). Zprostředkovává také komunikaci s uživatelským zařízením (PC, PDA atd.). To klade vysoké požadavky na dnešní základní stanice. Očekávané vlastnosti lze shrnout do následujících bodů [5]:

1. Vysoký výkon: protože data ze všech senzorových uzlů je třeba přijímat a zpracovávat v base station, měl by mít procesor schopnost zpracovat a poskytovat formy kabelové i bezdrátové komunikace. [7]
2. Flexibilní architektura: WSN v průmyslové automatizaci zahrnují širokou škálu aplikací. Základní stanice by měly být schopny přijímat senzorová data z uzlů používajících různé druhy komunikačních protokolů. Jednoduše řečeno, základna by měla být schopna umět začlenit nejrozličnější způsoby komunikace pro práci v různorodých průmyslových aplikacích. [7]
3. Odolnost proti elektromagnetickému rušení a vlivům průmyslovému prostředí: průmyslové prostředí je předmětem mnoha elektromagnetických rušení a také podmínek zahrnující vysoké teploty, chemikálie, vlhkost a jiné. Sensorový uzel by tedy měl být navržen s náležitou ochranou izolací. [7]



Obr. 7: Příklad průmyslové bezdrátové základní stanice [7]

3.2 Software

Systémový software kontroluje hardwarové komponenty, spravuje systémové prostředky a umožňuje aplikacím chod na potřebných softwarových systémech. Mnoho variant systémového softwaru je již k dispozici pro PC a servery. Mezi softwarové požadavky pro bezdrátové senzory patří:

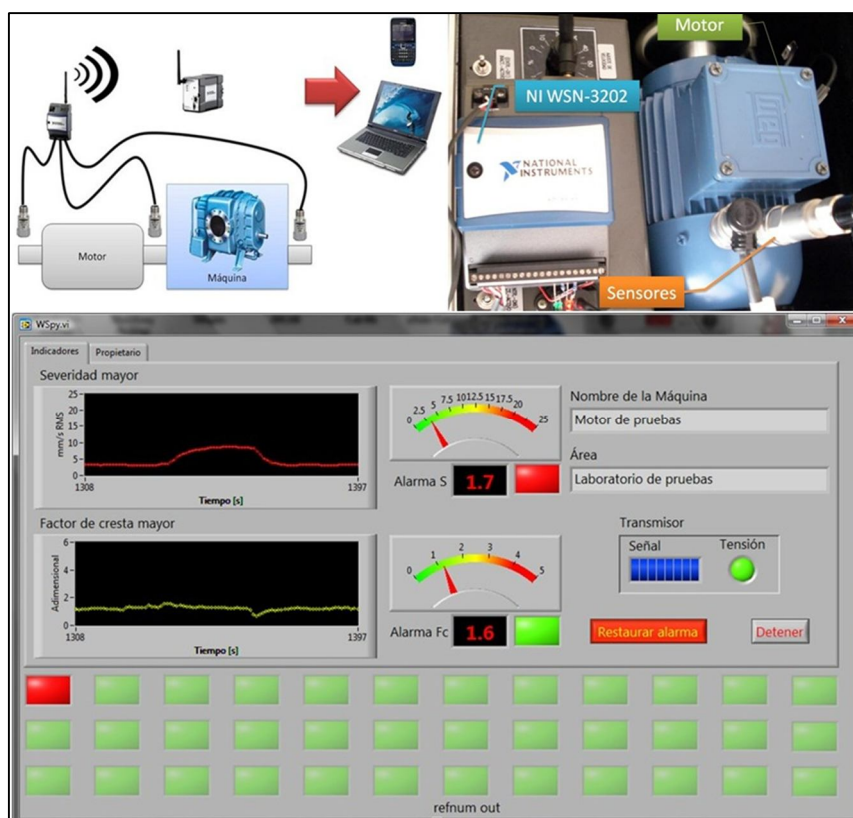
- malá velikost pro provoz na nepříliš výkonných procesorech
- efektivní využití energie
- vysoká modularita
- flexibilní „open-source“ vývojová platforma

3.2.1 TinyOS

TinyOS začal jako projekt na Kalifornské univerzitě v Berkeley, jako součást programu DAPRA a jeho základem je programovací jazyk nesC. První verze systému byla vydána roku 2000. Systém TinyOS na bázi operačního prostředí, je navržen k použití především pro WSN [2]. TinyOS se liší od většiny ostatních operačních systémů v tom, že jeho architektura je zaměřena na ultra nízkou spotřebu provozu. Spíše než pro plnohodnotný procesor, je TinyOS určen pro malé, nízko příkonové mikrokontroléry. Poskytuje řadu důležitých služeb jako je snímání, komunikace, skladování a časování. Definuje souběžný provedení modelu, takže vývojáři mohou vytvářet aplikace z opětovně použitelných komponent a služeb, aniž by se museli starat o nepředvídatelné interakce. TinyOS běží na více než tucet obecných platform, z nichž většina snadno podporuje vytváření nových senzorů. Navíc TinyOS struktura umožňuje poměrně snadno přejít na nové platformy [8].

3.2.2 LabVIEW Wireless Sensor Network Pioneer

Začátek vývoje LabVIEW se datuje kolem roku 1983, ale teprve o tři roky později byl představen pro operační systém Macintosh. Dnes pod firmou *National Instruments* má širokou podporu pro další vývoj. LabVIEW může dramaticky zvýšit efektivitu vývoje díky novým knihovnám a své schopnosti komunikovat s takřka libovolným hardwarovým zařízením či cílovým systémem. LabVIEW-WSN-Pioneer obsahuje jak grafické prostředí, tak zároveň implementaci pomocí jazyka C. Může integrovat stávající kabelové měření s novými bezdrátovými daty. Vlastnosti měřících uzlů WSN lze přizpůsobit pomocí LabVIEW úpravou architektury. Architektura LabVIEW WSN Pioneer, která je z převážné většiny řešena událostně, je jednoduše rozšiřitelná za použití grafického prostředí nebo příkazů jazyka C. Úpravou parametrů měřících uzlů lze snadno nastavit připojení různých typů snímačů, prodloužit životnost nebo zvýšit rychlost sběru dat [9]. Grafické rozhraní můžeme vidět na Obr. 8



Obr. 8: Monitorování motoru softwarem od LabVIEW [10]

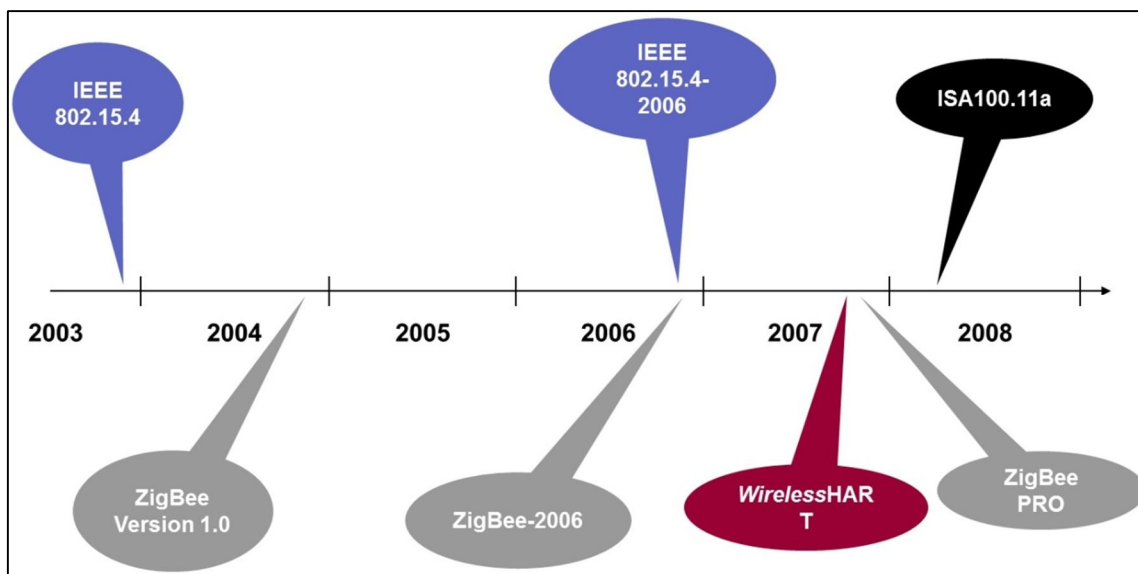
4. Vlastnosti bezdrátových senzorových sítí

Jak již bylo řečeno, senzorové sítě se skládají z uzlů, které jsou schopny snímat nebo řídit fyzikální či chemické parametry okolního prostředí. Jedná se o pokročilou bezdrátovou technologii, na kterou jsou kladeny následující požadavky [5]:

- velký počet uzlů v síti oproti WLAN (wireless local area network) sítím. Tento velký počet uzlů je s výhodou použit při směřování paketů a zaručení odolnosti sítě
- velmi nízká spotřeba a dlouhá výdrž zařízení. Uzly sítě obvykle nemají přístup k napájení a jsou napájena z baterií nebo z alternativních zdrojů energie
- krátká aktivní doba uzlů v síti
- nízká cena komponent
- malé rozměry zařízení
- odolnost vůči chybám jako je výpadek napájení nebo přerušení komunikace
- schopnost automatické konfigurace (self-organization) – síť je schopná logického uspořádání svých uzlů do definované topologie bez zásahu člověka
- schopnost automatické opravy sítě (self-healing) – síť je schopná detekovat případně i opravit své uzly bez zásahu člověka
- spolehlivost, bezpečný a šifrovaný přenos
- jednoduchá instalace, konfigurace a obsluha sítě
- komunikace v bezlicenčním frekvenčním pásmu

4.1 Používané komunikační standardy

Současné standardy pro bezdrátovou komunikaci jsou rozmanité, ale žádný z nich nemůže zahrnout celé pole působnosti WSN. V současné době je jednou z nejvíce využívaných technologií v oblasti bezdrátových sítí, ZigBee a její variace. Využitelnost je většinou omezena spotřebou energie a potřebným výkonem. Přesto nebo právě proto vznikají stále nové komunikační standardy. Jedním z nejzajímavějších je nadcházející standard ISA SP100.11a, který by měl pokrýt většinu aplikací v oblasti bezdrátových senzorových sítí [11].



Obr. 9: Časová osa komunikačních standardů používaných v technologii WSN [12]

4.1.1 ZigBee

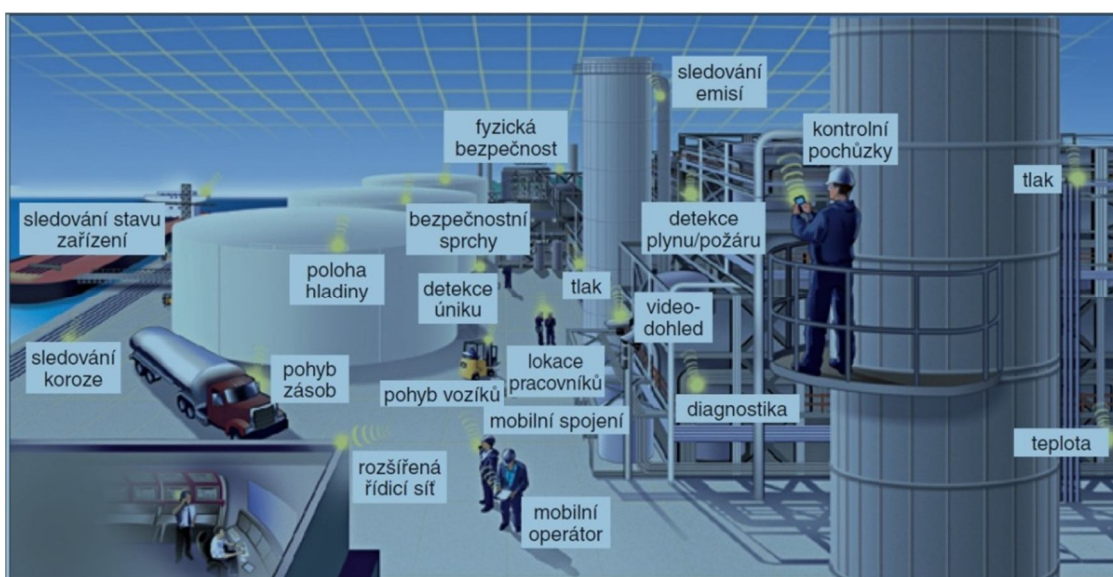
ZigBee (označovaný též jako IEEE 802.15.4) je jednoduchý, bezdrátový komunikační standard, který umožňuje vzájemnou komunikaci mnoha zařízení na vzdálenost stovek metrů. Jeho vlastností je však citlivost na hluk a rušení, a tudíž není dostatečně robustní do průmyslového prostředí. Proto aliance okolo Zigbee vytvořila nový standard ZigBee PRO, který je speciálně zaměřený na průmyslový trh. Nabízí jak zlepšené bezpečnostní aplikace, tak schopnost změnit operační kanál a tak omezit rušení. Díky nízkým nárokům na hardware a nízké spotřebě je vhodný pro uplatnění v oblasti řízení budov, spotřební elektroniky a průmyslu, například v podobě bateriově napájených bezdrátových senzorů [13].

4.1.2 WirelessHart

WirelessHART je otevřený standard bezdrátové komunikace schválený v roce 2007. Jeho autorem je organizace HCF (HART Communication Foundation). Je speciálně navržen pro procesní měření a monitorovací aplikace, mající přísné požadavky na komunikační prodlevy, spolehlivost a bezpečnost. WirelessHART je založen na standardu IEEE 802.15.4, ale komunikuje pouze v pásmu 2,4 GHz. V systému WirelessHART lze zpracovávat pouze protokoly HART. V průmyslu je však potřeba univerzálního komunikačního protokolu, který by umožňoval realizaci všech potřebných bezdrátových přenosů nezávisle na protokolech jednotlivých provozních sítí. Přesně tohoto lze dosáhnout při použití standardu ISA 100.11s. [13].

4.1.3 ISA100.11a

Protokol podle standardu ISA 100.11a je multifunkční protokol pro síť používané v průmyslu. Hlavními cílovými oblastmi je monitorování (kromě kritických dat), přenos alarmů, nadřazené řízení a automatizace procesní výroby (Obr. 10). Úlohy využívající ISA 100.11a by měly být schopny tolerovat komunikační zpoždění v řádu stovek milisekund. Pro směrování dat standard ISA100.11 používá protokol 6lowPAN, který pro adresování zařízení používá IPv6 protokol. Proto lze se zařízením komunikovat pomocí jakéhokoliv bezdrátového terminálu podporující IPv6 protokol. ISA 100.11a předpokládá průmyslovou komunikační síť splňující všechny současné i budoucí požadavky uživatelů v průmyslu a chrání jejich vynaložené prostředky – je univerzální, jednoduchá a výkonná [14].



Obr. 10: Možnosti uplatnění WSN v průmyslovém závodě

4.2 Mobilita

V bezdrátových senzorových sítích rozlišujeme tři druhy mobility

- (1) Mobilita senzorového uzlu – senzorový uzel může být umístěn na pohyblivých zařízeních. Jako příklad můžeme uvést sledování zvířat (např. skotu). [4]
- (2) Mobilita základní stanice – např. pracovník údržby v budově, který sleduje provozní události z přenosného počítače (PDA - Obr. 11). [4]



Obr. 11: Mobilní základní stanice pro přijímání dat [15]

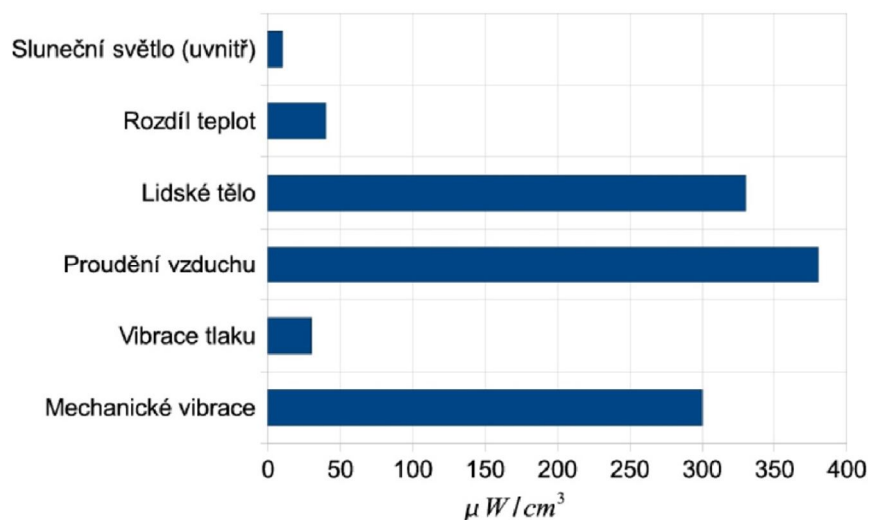
(3) Mobilita události – např. pohybující se nepřítel na válečném poli [4]

4.3 Napájení senzorových uzlů

Jeden z největších problémů senzorových sítí je nutnost efektivního nakládání s energií. Pro všechny bezdrátové senzorové uzly je napájení zásadní součástí systému. V zásadě existují dva přístupy k napájení: Za prvé je to ukládání energie a poskytování v požadované formě (vhodný typ baterií) a za druhé externí napájecí zdroj.

Doplňování energie

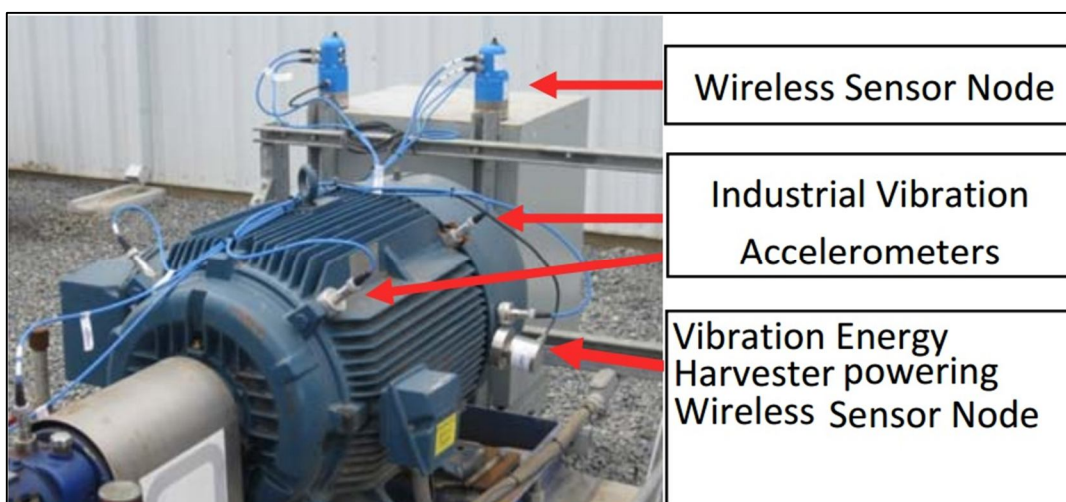
Perspektivní oblastí pro další vývoj je využití obnovitelných zdrojů energie pro výrobu elektřiny tak, aby bylo možné průběžné ukládání energie a její dodávka konkrétnímu prvku bezdrátové sítě. Následující obrázek ukazuje, kolik je v různých okolních zdrojích dostupné energie (Obr. 12).



Obr. 12: Kapacita různých zdrojů energie [4]

V současné době se využívají především tyto metody získávání energie z okolí:

- Solární články – mohou být využity k napájení senzorových uzlů. Dostupná energie závisí na tom, zda jsou uzly používány venku nebo v interiéru a na denní době. Výsledná energie se pohybuje někde mezi 10-15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Jednotlivé články mohou dosáhnout poměrně stabilní výstupní napětí 0,5V. Proto se solární články obvykle používají pro nabíjení akumulátorových baterií. Použití solárních článků se jeví jako potencionální zdroj. [16].
- Vibrační/Mechanická – Vibrační a mechanická energie je generována pohybem předmětů a poté může být pomocí akcelerometru ukládána a použita k napájení senzorového uzlu. Jednou z metod ukládání vibrační energie je pomocí piezoelektrického kondenzátoru. Výkon, který jsme schopný získat z této energie, se pohybuje v řádu maximálně desítek μW . Ukládání vibrační energie ilustruje Obr. 13. [16]



Obr. 13: Ukládání vibrační energie z motoru [17]

4.4 Souhrn hlavních výhod

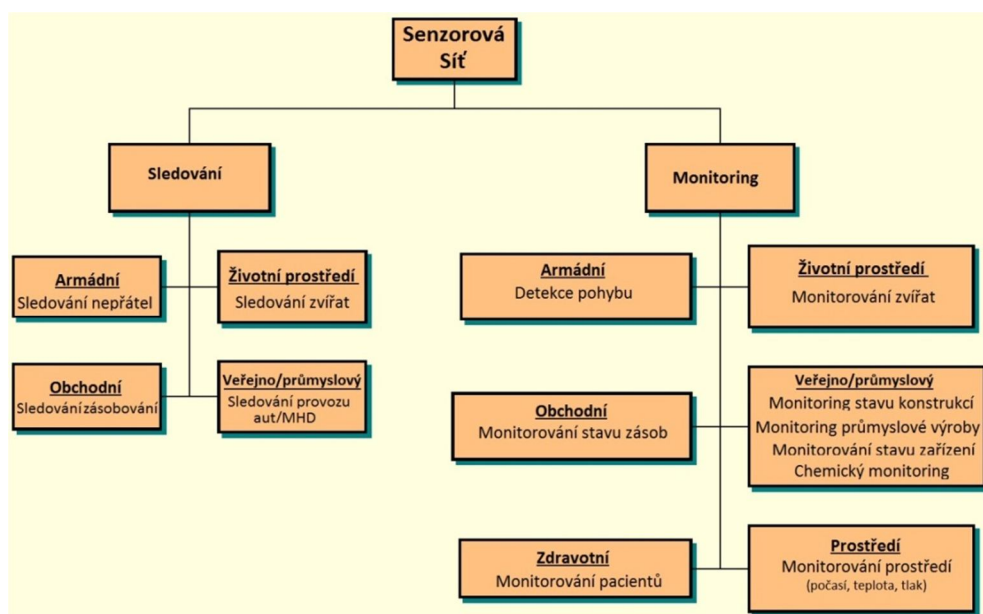
WSN přináší několik výhod oproti tradičním kabelovým monitorovacím a kontrolním systémům:

- Žádná elektroinstalační omezení - Bezdrátové senzorové uzly jsou instalovány na místa, které jsou fyzicky nedostupné, nebo jsou příliš nákladné na instalaci klasickou cestou. Příkladem může být monitorování a přijímání dat z rotačních zařízení. Kromě toho se tento systém stává vysoce flexibilní. Není nutné pokládat nové kabely, pokud se přidává nové zařízení nebo jen přemísťuje. Nový uzel může být nainstalovaný na jakémkoliv nové místo v případě rozšíření závodu.

- Snadná údržba - Po instalaci drátového zařízení se technici musí vypořádat s různými problémy jako je koroze, voda v potrubí, vyhořelá elektroinstalace, mechanické opotřebení, škody způsobené divokou zvěří, přesunem přístrojů nebo neočekávaným výpadkem proudu. WSN jsou téměř bez údržbové. Výměna baterií je nutná po několika měsících až letech provozu. Kromě toho je zde také možnost přemístit stávající bezdrátové zařízení, nebo nasadit nová, s minimálními změnami v existující konfiguraci.
- Snížení nákladů - *Elektromontáže a instalace pro stávající automatizační projekty může být až 80% z celkových nákladů na systém [16].*
- Lepší výkon - Průmyslové WSN mají potenciál k překonání stávajícího procesu řízení sítě. A na rozdíl od kabelových systémů, mohou komponenty bezdrátové sítě komunikovat současně, pokud nedochází k vzájemnému rádiovému rušení.

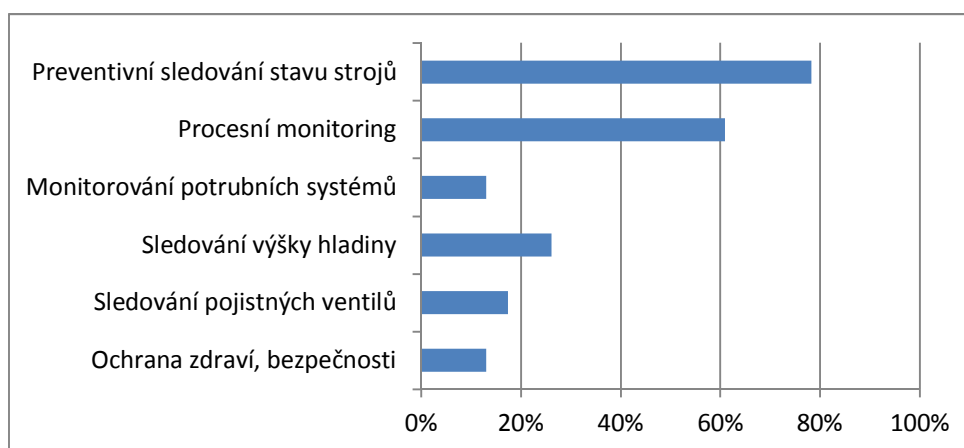
5. Aplikace bezdrátových senzorových sítí

Bezdrátové senzorové sítě inspirovaly vývojové pracovníky k mnoha aplikacím. Některé z nich jsou futuristické, zatímco velké množství je prakticky využitelné v krátkodobém horizontu. Rozmanitost aplikací je až pozoruhodná (viz Obr. 14) - monitorování životního prostředí, sledování potrubních systémů (voda, ropa, plyn), sledování stavu staveb, přesně řízené zemědělství, zdravotní péče, sledování aktivity vulkánů, sledování dopravní situace, armáda a mnoho dalších.



Obr. 14: Přehled oborů a aplikací WSN, přeloženo z [1]

Podívejme se na současný podíl použití WSN v průmyslu a kde se nejvíce vyskytují



Obr. 15: Podíl použití WSN v průmyslu

Následující kapitoly se vzhledem k zaměření práce zabývají především průmyslovými aplikacemi.

5.1 Bezdrátová senzorová síť instalovaná na vrtné plošině Gullfaks

Pro ropný a plynárenský průmysl má použití WSN mnoho výhod. Umožňuje instalaci v odlehlých a nepříznivých podmínkách, které jsou příliš nákladné pro kabelové použití. *Výpočty provedené společností StatoilHydro ukazují, že bezdrátové přístroje mohou snížit náklady na výstavbu kolem 5%.* Při typických stavebních nákladech 10 miliard dolarů na jednu ropnou plošinu to představuje výrazné úspory. [19]



Obr. 16: Ropná plošina Gullfaks A [19]

Jednoduchý přístup ke stanovení změny průtoku ropy (zejména snížení), je měření teploty v určité vzdálenosti po proudu od ústí vrtu. To je založeno na principu, že snížení průtoku kapaliny sníží teplotu potrubí. Proto je měření teploty prováděno přímo na potrubí. Před instalací WSN docházelo k nežádoucímu snížení průtoku jednou až dvakrát každých 12 hodin. Jít tradiční cestou kabelového napájení a kabelových komunikačních propojení by vedlo k vysoké míře složitosti a nákladům na instalaci, včetně rizika odstavení výroby.

Jelikož je instalace WSN technologie na ropnou plošinu nákladná a časově náročná procedura, bylo nutné zajistit, aby zvolený systém byl v souladu s požadavky Gullfaks. Systém byl testován ve výzkumném centru StatoilHydro v Trondheimu. Testovanou sít tvořilo 5 vysílačů a jedna brána, která byla sledována po dobu 40 hodin. Výsledky ukazovali zpoždění cca 1,5-2s, stabilita v rozmezí 96-100% a spolehlivost zůstala na 100% po celou zkušební dobu. Zkušební provoz bezdrátové sítě ukazoval větší než požadované zpoždění u dvou senzorových uzlů. Jako řešení se ukázalo přidání druhé brány (Obr. 17) do blízkosti problémových uzlů. Uzly byly nakonfigurovány na měření 4 hodnot a to teploty, napětí baterie, vnitřní teploty uzlu a jednu přidavnou hodnotu (neobsazenou). Kromě instalace na Gullfaks A byly podobné bezdrátové sítě nainstalovány i na dvou ostatních plošinách B a C. V současné době je nasazeno 92 bezdrátových teplotních uzlů. Všechny byly roku 2009 modernizovány na standard WirelessHART.

Využití bezdrátové technologie na plošinách Gullfaks umožnilo dosáhnout následujících provozních parametrů:

- Spolehlivost: Jde o podíl přenesených dat, které dosáhnou svého cíle. Brána pak tato data přenáší dále do řídicí místnosti. V sítích na bázi IEEE 802.15.4 je možné dosáhnout i 100% spolehlivosti (v žádném čidle nedochází ke ztrátě), ale v praxi se ukázala reálnější hodnota okolo 90%.
- Rychlost komunikace: Doba mezi přenesením dat od senzoru k přijímači do 2s.
- Rozsah a přesnost měření: Měřicí rozsah se pohybuje mezi 50°C a 70°C s rozlišovací schopností maximálně 1°C.



Obr. 17: Instalovaná Base station [19]

Kombinací rychlejší a spolehlivější detekce nežádoucího snížení průtoku a díky možnosti okamžitého nasazení WSN došlo k odhadované roční úspoře na Gullfaks v hodnotě 40 milionů dolarů. Navrhnuté řešení s téměř 100% spolehlivostí a přijatelným zpožděním splnilo veškeré požadavky. To ukazuje, že WSN jsou plně schopné, robustní a spolehlivé komunikace v drsném prostředí Severního moře [19].

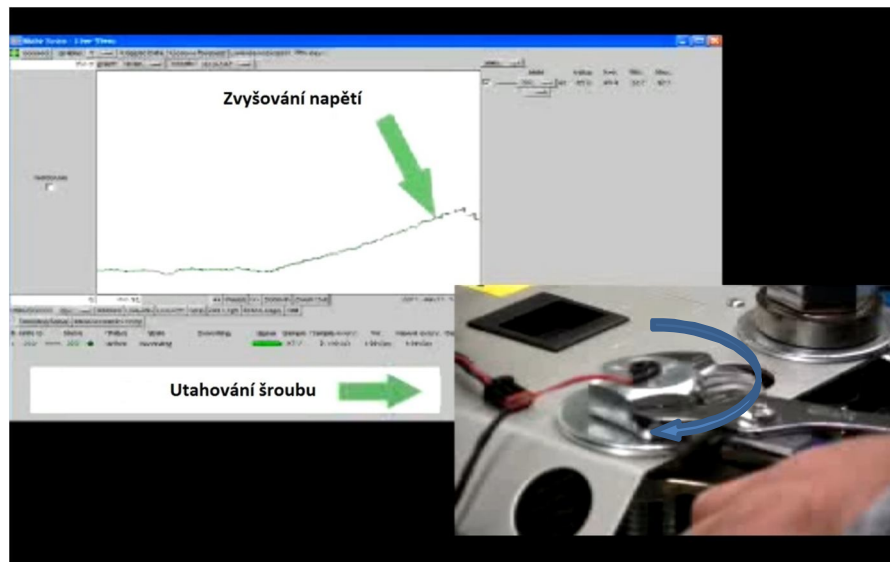
5.2 Bezdrátové monitorování napětí ve šroubu

Další pozoruhodnou aplikací WSN v průmyslové praxi je bezdrátové monitorování napětí ve šroubech. Tato aplikace má velký potenciál k širšímu uplatnění v průmyslu.



Obr. 18: Technologie Smart bolt [20]

Příkladem je těžká technika, kterou drží pohromadě výhradně šrouby. Některé z nich jsou důležitější než jiné. Pokud by u těchto kritických šroubů došlo k poruše, mohlo by dojít k poškození stroje, výpadku výroby, zranění personálu. Obzvláště výpadek výroby je spojen s nezanedbatelnými vícenáklady. Proto musí být kritické napětí ve šroubech průběžně a pečlivě kontrolováno. Dalšími důvody jsou, zajištění bezpečného provozu stroje, zdraví a bezpečnosti pracovníků.



Obr. 19: Princip Smart Bolt [20]

Nejběžnějším způsobem sledování je přímá fyzická kontrola a odečet krouticího momentu. Vzhledem k nutnosti kontrolovat každý jednotlivý šroub, může jít o zdoluhavý a nepřilíš přesný proces. Další používaná měřicí metoda je ultrazvukové měření napětí (ultrasonic bolt tension measurement). Ultrazvukové senzory používají tzv. *pulse-echo* technologii k měření prodloužení, zátěže a namáhání šroubu. Tato technologie je přesná, ale stejně jako ruční metoda je časově náročná a musí být provedena během plánované odstávky. Cena zahrnuje náklady na měřicí příslušenství a také mzdové náklady technika. Bezdrátové monitorování napětí šroubů přináší oproti klasickým způsobům řadu výhod:

- snadná instalace
- snížení prostojů zařízení
- neustálé monitorování důležitých šroubů, včetně těch těžko přístupných
- zkrácení doby pro kontrolu
- včasná signalizace při hrozbě selhání šroubu

Toto měření nabízí například společnost *Scanimetrics*. V následující tabulce si ukážeme porovnání ultrazvukového a bezdrátového měření napětí.

	Ultrazvukový senzor	Bezdrátové čidlo Scanimetrics
Konstrukce	Hliníkové tělo s poniklovanými koncovkami	Utěsněno epoxidovou sloučeninou (odolné vůči vodě a chemikáliím, standart IP67)
Cena zařízení	Jednorázové zakoupení cca \$3000 + \$300-\$900 za konektory	\$395 za číslo + \$175 monitorovací poplatek/měsíc
Cena měření	Cestovní náklady technika + měření. Cca 3 hodiny x \$200 = \$600	\$175/4 = \$ 43.75 (založeno na 4 měření v měsíci)
Životnost baterie	baterie použité v UZ měřáku	Až 1 rok provozu (závislost na měřicí periodě)
Zobrazení naměřených dat	Displej 2.4"x1.8". Data mohou být přesunuta do PC pomocí sériového portu	Naměřená data se zobrazují na dodaném softwaru v PC poté co byly předány serveru

Obr. 20: Porovnání UZ a WSN principu [20]

Pro příklad si můžeme uvést některé oblasti aplikací bezdrátového měření šroubu v praxi:

- těžká mobilní zařízení
- turbíny a zařízení k výrobě energie
- příruby a potrubí pro přepravu vysoce rizikových látek

5.3 Měření elektromotorických sil v hutní peci

Ternium Siderar je největší hutní společnost v Argentině. Produkce zahrnuje válcování za tepla i studena, žárové pozinkování a povrchovou úpravu kovů galvanizací. Za posledních několik let se po celém světě rozšířila technologie záznamu EMF (electromotive force – elektromotorických sil) ke stanovení úrovně surového železa uvnitř hutní pece.

Problémem kabelového řešení je, že musí být instalováno během plánované odstávky, která je každé dva měsíce. Celá instalace by se prodloužila až na šest měsíců. Protože se ještě jedná o začínající experimentální techniku měření, nedá se s přesností říci, kde nejlépe umístit měřicí elektrody. A zajištění nejlepšího možného umístění by zabrala další měsíce. [21]



Obr. 21: Umístění bezdrátových senzorových [21]

Jako nejlepším možným řešením se jeví použití bezdrátové senzorové sítě. Bezdrátové uzly mohou být kdykoliv podle potřeby přemístěny k lepšímu sběru dat a nemusíme se zabývat umístěním drátů. Bylo nainstalováno pět bezdrátových uzlů od firmy *Emerson* a typu *Rosemount® 648*, které jsou napájeny v blízkosti závitových otvorů u pece. Uzly přenášejí EMF data každé tři vteřiny k základní bráně, která je vzdálená 50 m v jiné místnosti a ta dále data přenáší do SCADA (supervisory control and data acquisition) systému. I v podmínkách obnášejících teploty okolo 60°C, prašné prostředí a elektromagnetické rušení byla výsledná korelace mezi EMF a množstvím železa a strusky uvnitř pece změřena velmi úspěšně a přesně. Díky tomu byla vylepšena energetická účinnost, procesní stabilita a bezpečnost. Náklady a potřebný čas na instalaci byly sníženy až na 50% ve srovnání s původním kabelovým řešením. [21]

Výsledek využití bezdrátové senzorové sítě

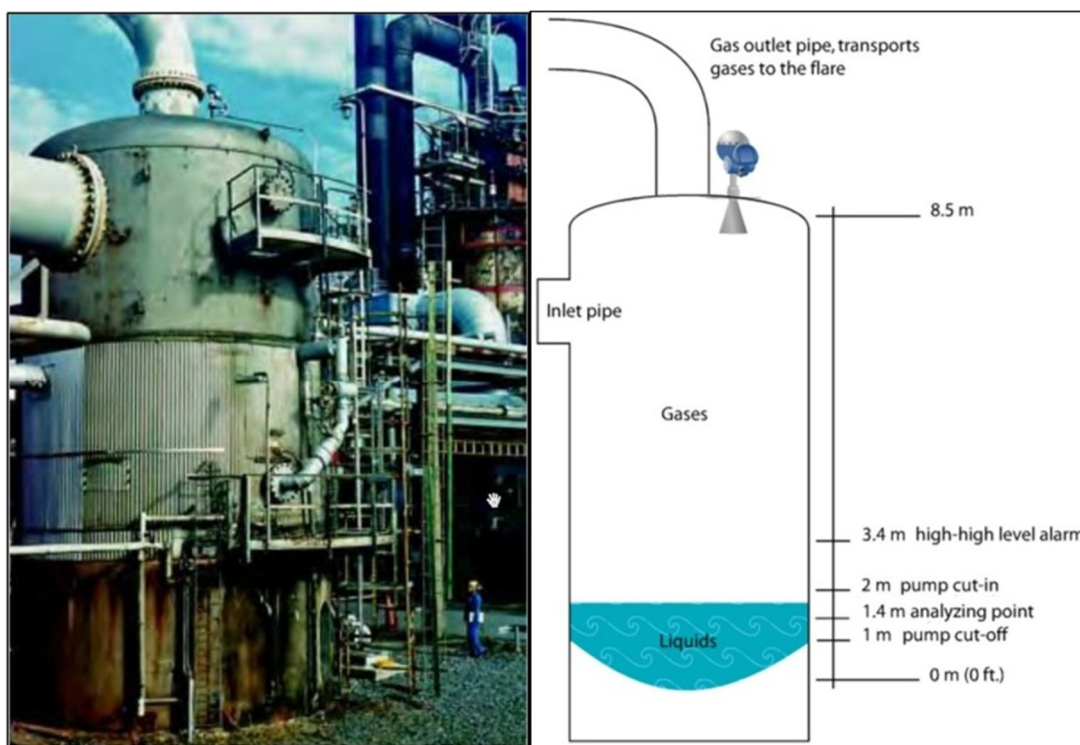
- 50% úspora nákladů na kabelové řešení
- týdenní instalace v porovnání se šesti měsíci
- zvýšení účinnosti pece a bezpečnosti
- úspěšné určení korelace mezi EMF a množstvím železa a strusky uvnitř pece
- nepřetržitý provoz s malou mírou chybovosti

5.4 Monitorování výšky hladiny

Další využití bezdrátových senzorových sítí v průmyslu je měření výšky hladiny. Zde je výhodou oproti kabelovému systému převážně v úspoře materiálu. V mnoha případech je vzdálenost mezi řídicí místností a jednotlivými nádržemi až stovky metrů.

V rafinérském procesu, pokud dojde k poruše, jsou plyny a kapaliny odkláněny potrubím do odkalovací nádrže skrz pojistné ventily. Obvykle to jsou lehké a těžké uhlovodíky, občas obsahující značné množství vody. Z hlediska bezpečnosti je stanovena maximální hodnota hladiny. Z tohoto důvodu je důležité mít spolehlivé měření hladiny v rámci místního poplašného systému. [21]

Změnou použití bezdrátového uzlu byla zlepšená spolehlivost, omezení nákladů na pořízení a údržbu kabelového připojení.



Obr. 22: Umístění bezdrátového senzorového uzlu na nádrži [21]

Výsledek bezdrátové senzorové sítě

- přesné on-line monitorování
- zrušení nákladné údržby spojené s přípojkami mechanických měřidel nádrže
- ušetřené nákladů spojených s kabeláží

5.5 Monitorování na rotační peci

Další možností využití bezdrátového měření je pro monitorování rotačních průmyslových součástí. Konkrétně v cementárně společnosti *Calportland* bylo WSN použito pro monitorování teploty a tlaku v průmyslovém procesu uvnitř rotující pece. Pec je 165 m dlouhá, 4 m v průměru, točí se téměř dvakrát za minutu, pracuje při teplotách 1500°C a je umístěná 6 až 12 m nad zemí. Tyto podmínky (otáčení, extrémní teploty a umístění pece) jsou pro kabelové řešení těžko překonatelnou výzvou. Proto se vedení společnosti rozhodlo využít bezdrátové získávání dat. Bylo požadováno měření teploty amoniaku (NH_4) a procesních plynů a měření podtlaku uvnitř pece. [21]

Byla nainstalována čtyři bezdrátová zařízení. Jeden bezdrátový snímač tlaku (viz Obr. 23) k vstřikovacímu otvoru k měření extrémně nízkého tlaku uvnitř pece a tři bezdrátové snímače teploty na různých místech po délce pece.



Obr. 23: Sledování emisí NO_x uvnitř rotační pece v cementárně CalPorland [21]

Data jsou přenášena spolehlivě a nedochází k žádným ztrátám dat. A to i přesto, že snímače jsou umístěny na opačných stranách rotační pece a není umožněn přímý pohled. Data z brány byla zavedena do stávajícího archivačního systému.

Díky úspěšné implementaci bezdrátového řešení a krátké době instalace (pouze jeden den) je v plánu vybavit touto technologií i druhou rotační pec.

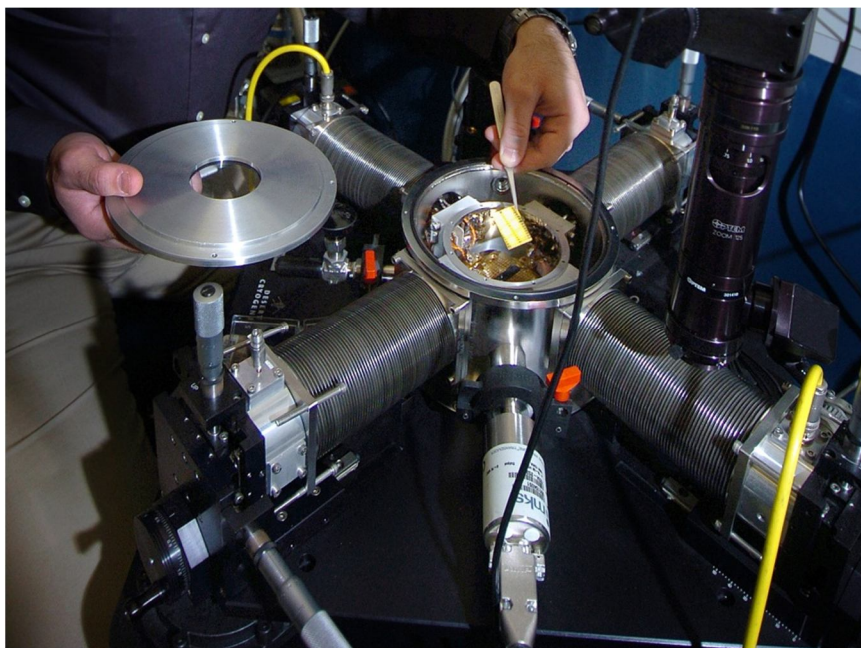
Výsledek bezdrátové senzorové sítě

- instalace bezdrátové sítě během jediného dne

- „Samoorganizující“ se síť spolehlivě monitoruje proces snižování emisi NO_x uvnitř rotující pece

5.6 Monitorování ložisek v letadlech

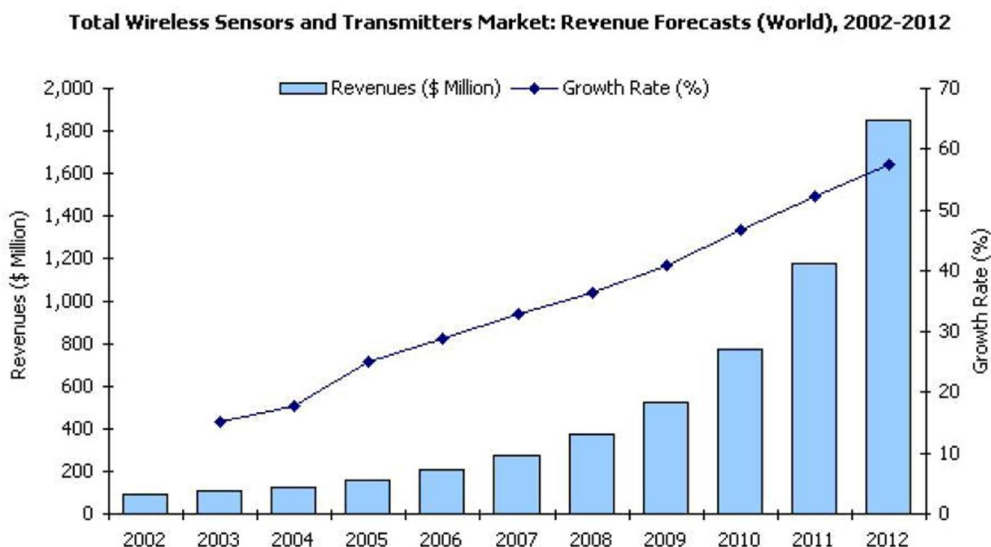
V roce 2007 na univerzitě Purdue, Indiana ve spolupráci s US Air Force byl představen bezdrátový senzorový snímač k monitorování stavu ložisek v proudových motorech. Výzkum prováděný na Purdue univerzitě vede k vytvoření drobných bezdrátových senzorů, které mohou detekovat kritická ložiska. Přesná koncepce této detekce nebyla v článku popsána. Zařízení je schopné vydržet i podmínky uvnitř proudového motoru. Teploty zde dosahují až 300°C, je zde olej a dochází zde k extrémně vysokým otáčkám, kdy hardware podléhá namáhání. Tyto senzory jsou založeny na technologii MEMS (zmíněno v kapitole 1.). Protože jsou dostatečně malé, nedochází zde k žádnému ovlivňování funkce ložiska samotného. Kromě bezdrátového přenosu dat je velkou výhodou, že napájení je zajištěno pomocí indukční smyčky, která používá cívky k výrobě proudu. Údaje ze senzoru posílané na palubu budou schopné nejen indikovat, zda ložisko selže, ale i za jak dlouho může dojít k poruše. V podstatě cokoliv, co má motor, by mohlo těžit z těchto MEMS čidel k monitorování důležitých ložisek. [22]



Obr. 24: Umístění senzorového uzlu s technologií MEMS [22]

6. Trendy

V prvé řadě si ukážeme reálné investice do této technologie. Nástupem standardizovaných protokolů jako je ISA100 a WirelessHART pro bezdrátové senzorové sítě se dramaticky změnilo tržní vnímání této technologie. Průmyslové podniky začínají implementovat bezdrátové sítě do svých provozů. Jak můžeme vidět na Obr. 25, počet peněz vložených do WSN se od r. 2002 více než zdesetinásobil. Hlavní důvody tohoto růstu spočívají v atraktivitě mobility bezdrátové sítě v průmyslových zařízeních a ve zvýšení povědomí o bezdrátových technologiích, dále rostoucí důvěra v bezdrátové technologie a snadná implementace.



Obr. 25: Vývoj na trhu bezdrátových sítí [23]

Rovněž se počítá s mnohem sofistikovanějšími aplikacemi použitelné nejen v průmyslu. Vše půjde ruku v ruce s výzkumem a vývojem v oblasti WSN technologií. Jednotlivá výzkumná témata byla naznačena v kap. 1. Jde zde celá řada výzev a úkolů. Budoucí výzkum a vývoj bude zaměřen zejména na zmenšování rozměrů, rozšiřování komunikačních schopností a efektivní způsob napájení.

7. Závěr

Bezdrátové senzorové sítě mají velký potenciál do budoucna. Dalo by se říci, že by mohly vyvolat revoluci v oblasti monitorování a sledování procesních veličin. Jak demonstrují reálné příklady v 5. kapitole, jedná se o perspektivní technologii pro použití v průmyslové praxi. Hlavní výhodou je „bezdrátovost“ a rychlá instalace. Mírnou nevýhodou se může stát omezená výdrž baterie. Potenciál WSN dokládají také zvyšující se investice do této oblasti, které se exponenciálně zvyšují s nástupem standardizovaných protokolů (kap. 6).

Potenciál bezdrátových senzorových sítí však není ještě zdaleka vyčerpán. Dle mého názoru se bude dál WSN uplatňovat v následujících průmyslových oborech jako kontrola provozu budov, kontrola logistiky v průmyslových závodech, měření na rotačních částech průmyslových zařízení včetně monitorování jejich životnosti.

Měření veličin v sériové pásové výrobě, kde jsou měřené objekty v pohybu. Přechodná, krátkodobá měření během provozních testů průmyslových zařízení, kde by bylo náročné k celému systému měření připojit napájecí a komunikační kabeláž. Extrémní aplikací by mohlo být použití WSN při vesmírných misích pro on-line měření v otevřeném prostoru. Podobně bych si dokázal představit využití dostatečně malých a spolehlivě komunikujících senzorových uzlů při vyšetření zdravotního stavu pacienta polknutím senzorového uzly přenášejícího data na základní stanici. Takovým způsobům využití ale musí předcházet další vývoj v této oblasti. Díky tomu, že jde o obor, který je poměrně „mladý“, můžeme očekávat další pokrok v dohledné době spolu se zajištěným financováním ze strany průmyslových podniků.

Tím, že byly představeny základní komponenty bezdrátové senzorové sítě, poskytnut přehled základních protokolů a vlastností, ukázány konkrétní aplikace využití v průmyslové praxi k měření procesních veličin, práce naplnila všechny body zadání.

Věřím, že se jedná o natolik zajímavou technologii, že by měla být zmíněna i při výuce na FSI v oborech jako procesní inženýrství, fluidní inženýrství ale i metrologie a řízení jakosti.

Použitá literatura

- [1] Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D.: *Wireless sensor network survey*, Computer Networks, vol. 52, Issue 12, 2008, pp. 2292-2330, ISSN 1389-1286, 10.1016/j.comnet.2008.04.002
- [2] Houšť, M.: *Monitorování stavu bezdrátových senzorových sítí agenty*, diplomová práce, FIT VUT v Brně, 2011
- [3] Chong, Che.; Kumar, S.: "Sensor networks: evolution, opportunities and challenges," Proceedings of the IEEE, vol. 91, no. 8, pp. 1247- 1256, 2003 doi: 0.1109/JPROC.2003.814918
- [4] Čolakov, T., Dostálek, L., Ledvina, J., Šíroký, D.: *Bezdrátové senzorické sítě*. 1. vyd. Plzeň: Česká společnost uživatelů otevřených systémů EurOpen.CZ, 2009, 98 s. ISBN: 978-80-86583-18-1.
- [5] Karl, H., Willig, A.: *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. (p. 524). John Wiley & Sons, Ltd., 2005, Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/0470095121>>
- [6] EmersonProcess, Dostupné z: <www2.emersonprocess.com/en-US/industries/refining/applications/Pages/EAMPumps.aspx>
- [7] Daniel J, J.; Panicker, S.T.; Thomas, L.; Mathew, J.T.; Mathew, A.; "Industrial grade wireless base station for Wireless sensor networks," Electronics Computer Technology (ICECT), 2011 3rd International Conference on, vol. 2, pp 245-249, 2011 doi: 10.1109/ICECTECH.2011.
- [8] LEVIS, P., GAY, D.: *TinyOS Programming* [online]. Stanford University, 2009 [cit. 2010-12-09]. Dostupné z: <<http://csl.stanford.edu/%7Epal/pubs/tosprogramming-web.pdf>>
- [9] Nationals Instruments, Dostupné z: <www.ni.com/labview/>

- [10] MachineSpy, Dostupné z: < www.machinespy.com/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=89&Itemid=83>
- [11] Kohvakka, M.: *Medium access control and hardware prototype designs for low-energy wireless sensor networks*. Ph.D. thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland, 2009
- [12] 19th Australian Software Engineering Conference, Dostupné z: <www.aswec2008.curtin.edu.au>
- [13] Carlsen, S., Petersen, S.: *When the Industry Goes Wireless: Drivers, Requirements, Technology and Future Trends, Factory Automation*, Javier Silvestre-Blanes (Ed.), ISBN: 978-953-307-024-7, InTech 2010, Dostupné z: <www.intechopen.com/books/factory-automation/when-the-industry-goes-wireless-drivers-requirements-technology-and-future-trends>
- [14] Hynčica, O.: *Bezdrátové komunikační systémy založené na IEEE 802.15.4 v automatizaci*, 2011, Dostupné z: <www.odbornecasopisy.cz>
- [15] HoneywellProcess, Dostupné z: <www.honeywellprocess.com>
- [16] Seah W.K.G.; Zhi Ang Eu; Hwee-Pink Tan.: "Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) - Survey and challenges," *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on, pp 1-5, doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2009.
- [17] Perpetuum, Dostupné z: <www.perpetuum.com/resources/Getting%20Started%20with%20Vibration%20Energy%20Harvesting_V7.pdf>
- [18] J. Song, S. Han, A. Mok, D. Chen, M. Lucas, and M. Nixon, "WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control," in *Proc. 14th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS'08)*, St. Louis, MO, USA, 2008, pp. 377–386

- [19] Carlsen, S.; Skavhaug, A.; Petersen, S.; Doyle, P.; , "*Using wireless sensor networks to enable increased oil recovery*" Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008. IEEE International Conference, pp-1039-1048, 2008, doi: 10.1109/ETFA.2008.4638521
- [20] Scanimetrics, Dostupné z: < www.scanimetrics.com>
- [21] Emerson Process, Dostupné z: <www2.emersonprocess.com>
- [22] Purdue University, Indiana, Dostupné z:
<news.uns.purdue.edu/x/2007b/071030SadeghiMems.html>
- [23] Frost & Sullivan, Dostupné z: <www.frost.com>

Seznam obrázků

Obr. 1: Klasifikace nejrozličnějších témat pro výzkum a vývoj technologie WSN [1].....	9
Obr. 2: Prvky distribuované senzorové sítě okolo roku 1985 [2]	10
Obr. 3: Postupný vývoj senzorových uzlů s názvy výrobců [3]	11
Obr. 4: Průmyslová bezdrátová senzorová síť [6].....	12
Obr. 5: Senzorový uzel od firmy <i>Libelium</i>	13
Obr. 6: Komponenty senzorového uzlu [4].....	14
Obr. 7: Příklad průmyslové bezdrátové základní stanice [7].....	15
Obr. 8: Monitorování motoru softwarem od LabVIEW [10]	17
Obr. 9: Časová osa komunikačních standardů používaných v technologii WSN.....	19
Obr. 10: Možnosti uplatnění WSN v průmyslovém závodě.....	20
Obr. 11: Mobilní základní stanice pro přijímání dat [15].....	21
Obr. 12: Kapacita různých zdrojů energie [4].....	21
Obr. 13: Ukládání vibrační energie z motoru [17]	22
Obr. 14: Přehled oborů a aplikací WSN, přeloženo z [1].....	24
Obr. 15: Podíl použití WSN v průmyslu.....	24
Obr. 16: Ropná plošina Gullfaks A [19].....	25
Obr. 17: Instalovaná Base station [19]	26
Obr. 18: Technologie Smart bolt [20]	26
Obr. 19: Princip Smart Bolt [20].....	27
Obr. 20: Porovnání UZ a WSN principu [20].....	28
Obr. 21: Umístění bezdrátových senzorových [21].....	29
Obr. 22: Umístění bezdrátového senzorového uzlu na nádrži [21].....	30
Obr. 23: Sledování emisí NOx uvnitř rotační pece v cementárně CalPortland [21]	31
Obr. 24: Umístění senzorového uzlu s technologií MEMS [22].....	32
Obr. 25: Vývoj na trhu bezdrátových sítí [23]	33

Seznam zkratek

WSN	-	Wireless sensor network
MEMS	-	Micro electro mechanical systems
DNS	-	Distributed sensor networks
DARPA	-	Defence advanced research project agency
ARPANET	-	Advanced Research Projects Agency Network
IEEE	-	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CPU	-	Central processing unit
RF	-	Radio frequency
WLAN	-	Wireless local area network
HCF	-	HART communication foundation
PLC	-	Programmable logic controller
EMF	-	Electromotive force
SCADA	-	Super control and acquisition