

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra kybernetiky a řídicí techniky

Diplomová práce

Použití bezdrátových technologií v řídicích systémech

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.

V Plzni dne.....

Zadání diplomové práce

Uchazeč: Bc. Lubomír KRISTEK

Téma: Použití bezdrátových komunikací v řídicích systémech

Topic: Using wireless communications in control systems

Pokyny pro vypracování:

- Seznamte se základními vlastnostmi bezdrátových komunikací a jejich výhodami a nevýhodami oproti klasickým komunikacím, viz např. [1]
- Seznamte se s bezdrátovými moduly řady V-MON 4000 firmy Inertia Technology [2].
- Seznamte se s řídicím systémem REX [3] a jeho nástroji pro vytváření ovladačů.
- Navrhněte a implementujte do řídicího systému REX ovladač pro moduly V-MON 4000, který umožní maximální rychlost komunikace.
- Vyvinutý ovladač ověřte na vhodně zvolených příkladech.

Doporučená literatura:

[1] Molisch, A. F.: Wireless Communications, 2nd Edititon, ISBN: 978-0-470-74186-3, Wiley, 2010

[2] Inertia Technology web page: <http://inertia-technology.com/>

[3] REX Controls: Funkční bloky system REX, Referenční příručka. Plzeň, 2014.

Abstrakt

Cílem práce je seznámit čtenáře s bezdrátovými komunikacemi, zejména bezdrátovými sensorovými sítěmi, a využít jejich výhod v řídicím systému REX. První kapitola je zaměřena na popis bezdrátových komunikací a služeb. Ve druhé kapitole jsou představeny bezdrátové sensorové sítě. Konkrétní zástupce sensorové jednotky V-Mon 4000 je představen ve třetí kapitole. Čtvrtá kapitola popisuje řídicí systém REX a jeho nástroje pro tvorbu ovladačů. V páté kapitole jsou nástroje využity pro tvorbu ovladače k bezdrátovým sensorovým jednotkám V-Mon 4000. Funkce ovladače je ověřena a zanalyzována na sestavené testovací platformě v šesté kapitole. Poslední kapitola je věnována využití bezdrátové komunikace při aktivním tlumení vibrací vetknutého nosníku.

Klíčová slova: bezdrátové komunikace, bezdrátové sensorové sítě, V-Mon 4000, MEMS, piezoelektrický akcelerometr, řídicí systém REX, vstupně-výstupní ovladače systému REX, UML, NexCom, ARK

Abstract

The goal of this thesis is to provide overview of the wireless communications, especially wireless sensor networks; and take advantage of their benefits in the REX control system. The first chapter provides an introduction and description of the wireless communications. Subsequently the wireless sensor networks are presented in the second chapter. The third chapter is dedicated to the particular representative of the wireless sensor nodes V-Mon 4000. The REX control system and its driver development tools are described in the fourth chapter. The development tools are used for the wireless sensor node V-Mon 4000 driver in the fifth chapter. The driver functionality and speed is verified and analyzed on the testing platform in the sixth chapter. The last chapter is devoted to the use of wireless communication in the active vibration damping of the cantilever.

Keywords: wireless communications, wireless sensor network, V-Mon 4000, MEMS, piezoelectric accelerometer, REX control system, REX I/O drivers, UML, NexCom, ARK

Seznam použitých zkratk

Zkratky jsou řazeny podle jejich výskytu v textu:

Zkratka	Význam	Překlad nebo vysvětlení
WSN	Wireless Sensor Network	Bezdrátová senzorová síť
1G	Sítě 1. Generace	označení mobilních sítí
2G	Sítě 2. Generace	označení mobilních sítí
3G	Sítě 3. Generace	označení mobilních sítí
4G	Sítě 4. Generace	označení mobilních sítí
GSM	Global System for Mobile	standard pro mobilní komunikace
SIM	Subscriber Identity Module	účastnická karta v mobilní komunikaci
BAN	Body Area Networky	síť nejmenšího rozsahu
PAN	Personal Area Network	síť pokrývající osobní prostor
LAN	Local Area Network	síť pro pokrytí pokojů či budov
MAN	Metropolitan Area Network	rozlehlá síť pro pokrytí měst
WAN	Wide Area Network	síť pro pokrytí regionu, státu, též internet
WLAN	Wireless LAN	bezdrátová síť typu LAN
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	mezinárodní organizace elektrotechnických inženýrů
MAC	Media Access Control	identifikátor síťového prvku
HD	High Definition	formát videa s vysokým rozlišením
kbps	kilobit za sekundu	přenosová rychlost
Mbps	Megabit za sekundu	přenosová rychlost
Gbps	Gigabit za sekundu	přenosová rychlost
ISM	Industrial, Scientific & Medical	pásma pro rádiové vysílání v průmyslu, vědě a medicíně
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum	metoda přenosu v rozprostřeném spektru pomocí frekvenčních přeskoků
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	metoda spektra rozprostřeného přímou sekvencí
TDMA	Time Division Multiple Access	metoda vícenásobného přístupu k médiu v časových oknech
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems	technologie velice malých elektromechanických zařízení
FFT	Fast Fourier Transform	algoritmus pro počítání Fourierovy transformace
IP	Ingress Protection	stupeň ochrany zařízení před vniknutím cizích předmětů a vody
IEPE	Integrated Electronics Piezo Electric	druh piezoelektrických akcelerometrů s integrovanou elektronikou pro zpracování signálu

ICP	Integrated Circuit Piezoelectric	IEPE akcelerometry značky PCB Piezotronics
PLC	Programmable Logic Controller	programovatelný logický automat
PAC	Programmable Automation Controller	kombinace průmyslového počítače s PLC
OPC	OLE for Process Control	standard pro komunikaci mezi řídicími systémy
OLE	Object Linking and Embedding	technologie pro spojování objektů různých aplikací
HMI	Human-Machine Interface	rozhraní pro komunikaci člověka se strojem
FBD	Function Block Diagram	jazyk blokových schémat pro programování PLC
SVG	Scalable Vector Graphics	škálovatelná vektorová grafika
SFC	Sequential Function Chart	jazyk pro programování konečných automatů
UML	Unified Modeling Language	grafický jazyk pro návrh, vizualizaci a dokumentaci softwaru
OS	Operating System	operační systém
Std Dev	Standard Deviation	směrodatná odchylka

Obsah

1	Úvod	4
2	Bezdrátové komunikace	6
2.1	Historie	6
2.1.1	Objev elektromagnetických vln	6
2.1.2	Dvousměrné přenosy	7
2.1.3	Analogové sítě a satelity	8
2.1.4	Digitální buňkové sítě	8
2.1.5	Renesance bezdrátových systémů	9
2.2	Typy služeb	10
2.2.1	Broadcast	10
2.2.2	Mobilní telekomunikační (cellular) sítě	11
2.2.3	Bezdrátové LAN a PAN sítě	12
2.2.4	Fixní bezdrátové systémy	13
2.2.5	Satelitní systémy	14
2.2.6	Ad hoc a senzorové sítě	14
2.3	Požadavky na služby	15
2.3.1	Datový tok	15
2.3.2	Dosah a počet uživatelů	16
2.3.3	Pohyblivost	18
2.3.4	Spotřeba energie	18
2.3.5	Směr přenosu	19
2.3.6	Využité spektrum	20
2.3.7	Kvalita služeb	21
2.4	Srovnání bezdrátových a drátových komunikací	21
3	Bezdrátové senzorové sítě	23
3.1	Popis technologie	23
3.2	Problematika návrhu	24
3.2.1	Odolnost vůči chybám	24
3.2.2	Škálovatelnost	24
3.2.3	Výrobní náklady	25
3.2.4	Hardwarová omezení	25
3.2.5	Síťová topologie	25
3.2.6	Nosné médium	26
3.2.7	Spotřeba energie	27
3.3	Protokoly	27

3.3.1	Tabulkové srovnání protokolů	30
3.4	Aplikace	32
4	Bezdrátové senzorové jednotky V-Mon 4000	33
4.1	Popis zařízení	33
4.2	Podporované typy senzorů	34
4.2.1	Vestavěný 3D akcelerátor MEMS	34
4.2.2	Piezoelektrické a IEPE/ICP akcelerometry	36
4.2.3	Napěťová čidla	37
4.2.4	Pasivní odporová čidla	37
4.3	Technická data	38
5	Řídicí systém REX	39
5.1	Popis systému REX	39
5.2	Součásti systému REX	41
5.2.1	RexDraw	41
5.2.2	RexComp	42
5.2.3	RexCore	43
5.2.4	RexView	43
5.2.5	Další nástroje	43
5.3	Tvorba ovladačů systému REX	43
5.3.1	Rozhraní modulů systému REX	44
5.3.2	Základní typy ovladačů a implementace	44
5.3.3	Metody ovladače ve vývojovém prostředí	45
5.3.4	Metody ovladače v cílovém prostředí	46
5.3.5	Indikace stavu ovladače	46
6	Ovladač systému REX pro moduly V-Mon 4000	48
6.1	Struktura ovladače	48
6.1.1	Datové členy ovladače VMonDrv	48
6.1.2	Metody ovladače VMonDrv	50
6.2	Možnosti získávání dat ze senzorových uzlů	51
6.2.1	Použití binární knihovny <i>Inertia.dll</i>	51
6.2.2	Čtení z fyzického média, rozbor a zpracování podle specifikace protokolu	52
6.3	Typy signálů předávaných ovladačem	57
6.4	Konfigurace a použití ovladače	57
7	Vyhodnocení rychlosti ovladače	59
7.1	Způsob měření	59
7.1.1	Systém pro vyhodnocení odezvy řídicího systému	60
7.2	Testované platformy	61
7.2.1	Osobní stolní počítač	62
7.2.2	Průmyslové PC ARK 1503 s výstupním modulem B&R	62
7.2.3	Průmyslové PC NexCom s výstupní PCI kartou	64
7.3	Výsledky testů	64
7.3.1	Osobní stolní počítač	66
7.3.2	Průmyslové PC ARK 1503 s výstupním modulem B&R	68

7.3.3	Průmyslové PC NexCom s výstupní PCI kartou	69
7.3.4	Závěry z měření	71
8	Příklad použití bezdrátových jednotek v řídicím systému	73
8.1	Popis soustavy	73
8.2	Popis tlumícího algoritmu	75
8.3	Výsledky regulace	76
9	Závěr	78

Kapitola 1

Úvod

Bezdrátové sítě v dnešním světě provázejí jednotlivce na každém kroku a jsou jednou z nejvýznamnějších technologií jednadvacátého století. Umožňují člověku komunikovat na dlouhou vzdálenost v reálném čase. Díky satelitním telefonům je možné telefonovat z nejdlehlších končin planety. Bez bezdrátového přenosu by nebylo možné zkoumat okolní vesmírná tělesa a vesmír, ani hloubky světových oceánů. Díky bezdrátovému připojení si mohou lidé prohlížet nezměrné množství informací, uložených ve světové síti internet, na tabletech či chytrých telefonech a přitom se volně pohybovat po okolí bez nutnosti kamkoliv zapojovat kabel.

Bezdrátové technologie si najdou uplatnění i v průmyslu. Odlehlým objektům poskytují spojení se světem fixní bezdrátové systémy. Pracovníci továren mohou být v neustálém kontaktu díky bezdrátové telefonní síti. Přenosné vysílačky najdou uplatnění u ostrahy objektu, umožňují komunikovat horníkům v hlubokých dolech a v případě potřeby velice dobře slouží záchranným sborům.

V současné době si pomalu hledají průmyslové zákazníci i bezdrátové sensorové sítě. Slouží k monitorování rozlehlých oblastí, zejména přírodních, prostřednictvím malých a nenáročných sensorových uzlů schopných spolu komunikovat. V průmyslových procesech jsou nasazovány zejména pro sledování teploty, tlaku, objemu či chemického složení v nádržích, sýpkách, kontejnerech a ve skladových prostorách.

V případě znalosti procesních veličin, poskytnutých sensorovou sítí, již zbývá jen malý krůček k využití této informace v řídicím systému. Ten může, v souvislosti s uvedenými příklady, autonomně upravovat výkon topné soustavy, čerpadel či ventilů tak, aby udržel sledovanou veličinu v předepsaných mezích. Tím vzniká nezanedbatelná úspora času, energie a hlavně financí oproti zaměstnání lidského operátora.

Rostoucí kvalita bezdrátových technologií, řídicích systémů a automatizačních prostředků, společně s klesající cenou těchto nástrojů a s rostoucími náklady na pracovní sílu způsobují posun výroby k částečně až plně automatické. V automatizovaných podnicích budou mít sensorové sítě spolu s patřičným řídicím systémem nezastupitelné místo, proto byly tyto technologie vybrány jako vhodné a aktuální téma ke zpracování v diplomové práci.

Prvním cílem je nejprve v kapitole 2 poskytnout ucelený přehled bezdrátové komunikace z pohledu historického vývoje od prvních pokusů s bezdrátovými přenosy koncem devatenáctého století až po současné všudepřítomné vysokorychlostní připojení k celosvětové síti internet. Kapitola se dále zabývá popisem základních typů

poskytovaných služeb a rozděluje služby do vhodných kategorií podle nabízených parametrů. Bezdrátové komunikace jsou v závěru kapitoly porovnány s klasickými drátovými.

Po uvedení do problematiky bezdrátové technologie jsou představeny bezdrátové sensorové sítě jako významná podmnožina bezdrátových sítí. V kapitole 3 je popsána motivace pro vývoj bezdrátových sensorových sítí a problematika návrhu jako například škálovatelnost, síťová topologie či nosné médium. V kapitole jsou navíc představeny a porovnány nejdůležitější standardy, platné pro tento typ sítí, a jejich typické aplikace.

Následně je představeno zařízení V-Mon 4000 (kapitola 4) jako zástupce bezdrátových sensorových jednotek. Jednotka V-Mon 4000 je vhodná zejména pro sítě s jednoduchou topologií, s krátkodobým během na baterie, a zejména s vysokou rychlostí přenosu dat. Tyto vlastnosti z ní udělaly kandidáta pro začlenění do průmyslového řídicího systému.

Jednotka V-Mon 4000 bude zařazena do platformy určené pro řízení průmyslových procesů řídicím systémem REX, kterému je věnována kapitola 5. Představena je celková architektura řídicího systému, knihovna funkcí pro tvorbu výkonných řídicích algoritmů a softwarové součásti pro vývoj, kompilaci, běh a diagnostiku řídicího systému. Zvýšená pozornost je kladena na nástroje pro tvorbu vstupně-výstupních ovladačů řídicího systému REX.

S využitím představených nástrojů pro tvorbu ovladačů bude vyvinut ovladač pro komunikaci mezi řídicím systémem REX a jednotkami V-Mon 4000. Popisu vývoje a navržené struktury tříd ovladače je věnována kapitola 6. Speciálně jsou zde popsány způsoby pro čtení a zpracování dat ze sensorové sítě od přečtení z fyzického média až po předání řídicímu systému.

Důraz při vývoji ovladače je kladen především na rychlost. Pro otestování rychlosti přenosu dat při různých konfiguracích hardwaru i ovladače bude v kapitole 7 sestavena testovací platforma, na které bude demonstrován příklad použití jednotky V-Mon 4000 s řídicím systémem REX. Kapitola se dále věnuje popisu metodiky testování, prezentaci výsledků a analýze rychlosti testovaných konfigurací.

Jako ukázková aplikace byl zvolen model pro demonstraci algoritmů aktivního tlumení vibrací. V kapitole 8 je popsán model, způsob regulace a výsledky srovnání bezdrátové a klasické platformy. Dále jsou v kapitole popsány klíčové příležitosti ke zlepšení platformy.

Kapitola 2

Bezdrátové komunikace

Kapitola si klade za cíl představit a uvést do problematiky bezdrátových sítí. Po shrnutí významných milníků a důležitých období v historickém vývoji bezdrátových sítí jsou uvedeny základní typy bezdrátových služeb a jejich specifika. V sekci 2.3 jsou diskutovány požadavky na bezdrátové komunikace. Závěr kapitoly je věnován stručnému porovnání vlastností bezdrátových a drátových komunikací.

2.1 Historie

Podíváme-li se na heslo komunikace do oxfordského slovníku [5], najdeme následující definici: „předávání, či výměna informací řečí, písmem či jiným médiem“. Pokud budeme v tomto duchu na komunikaci a její historii nahlížet (podobně jako Andreas Molisch v [17]), dojdeme k závěru, že původní formy komunikace byly přirozeně bezdrátové. Nebylo nutné natahovat dráty či kabely pro přenos zvuků bubnů, pokřiků či kouřových signálů.

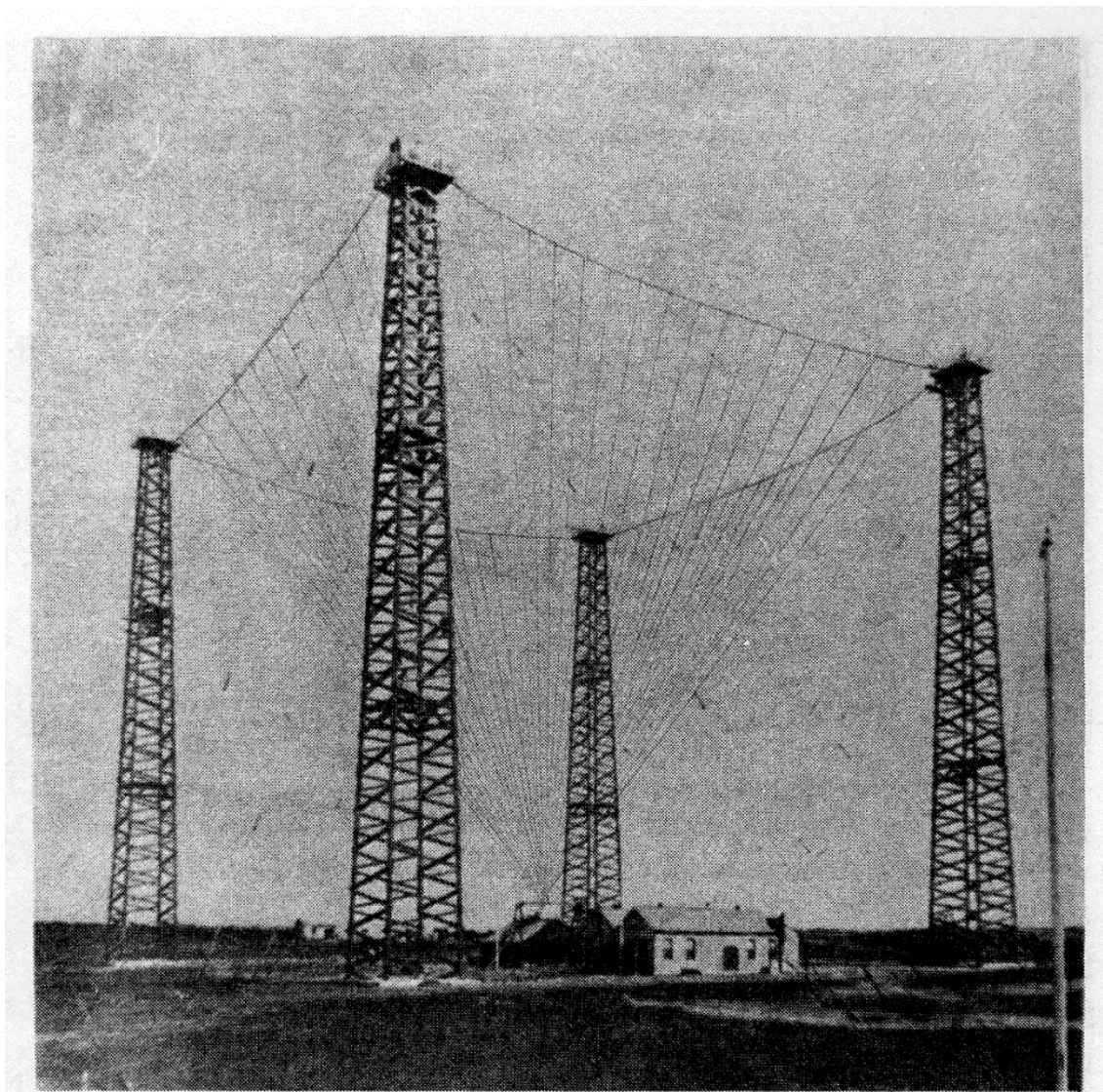
2.1.1 Objev elektromagnetických vln

Nicméně bezdrátová komunikace ve formě, jak ji známe dnes, přišla až s vědeckými objevy pánů Maxwella a Herze, kteří položili základy porozumění elektromagnetickým vlnám. Nedlouho po objevení elektromagnetických vln pro ně našel a demonstroval využití Nikola Tesla. Použil je při přenosu informací vzduchem, čímž představil světu první bezdrátový komunikační systém.

Koncem devadesátých let devatenáctého století Guglielmo Marconi aplikoval výsledky předchozího vědeckého bádání v loďní komunikaci a bezdrátovém telegrafu (v červenci 1898 jeho společnost vysílala výsledky závodů jachet do redakce novin, koncem roku 1899 vysílal přes Lamanšský průliv) [29]. V roce 1901 jako první dokázal vysílat přes Atlantický oceán. Signál byl vyslán z anglického Poldhu (obr. 2.1) a přijat na kopci Signal Hill na území Newfoundland.

Ačkoliv Nikola Tesla představil své aplikace dříve, Marconi je díky svým kontaktům a publicitě považován za vynálezce bezdrátové komunikace¹, což mu přineslo miliardové jmění a za což obdržel i Nobelovu cenu v roce 1909.

¹Americký nejvyšší soud roku 1943 ochranu některých patentů zrušil kvůli rozporu s patenty Nikoly Tesly



Obrázek 2.1: Marconioho vysílací stanice v Poldhu

V následujících letech se využití rádia (později i televize) rozšířilo do celého světa. V dnešní době o televizi a rádiu jako o bezdrátové komunikaci neuvažujeme, nicméně z technického pohledu se stále jedná o přenos informace pomocí elektromagnetických vln. V některých případech dokonce rádio a televize plní úlohu mobilní komunikace (mobilní ve smyslu pohybujícího se přijímače), např. u autorádií. Mnoho základního a aplikovaného výzkumu bylo počátkem dvacátého století věnováno bezdrátové komunikaci právě díky zájmu zábavních společností. Koncem třicátých let dvacátého století již existovala rozsáhlá síť pro (zatím jednosměrný) bezdrátový přenos.

2.1.2 Dvousměrné přenosy

Krátce po rozšíření radiopřijímačů se začínaly objevovat první požadavky na obousměrnou komunikaci, ze zřejmých důvodů pocházely od bezpečnostních a záchranných sborů. Vojenské aplikace následně v průběhu druhé světové války a ještě nějakou dobu po jejím skončení udávaly směr výzkumu a vývoje bezdrátových technolo-

gií. V této době byly položeny mnohé teoretické základy komunikací. Průkopníkem této oblasti byl Claude Shannon s prací *Matematická teorie komunikace*, jež například popisuje možnost přenosu informace bez chyb při omezení na datový tok a na poměr signál-šum v koncovém bodě (Signal-to-Noise ratio).

Ve čtyřicátých a padesátých letech také došlo k rozkvětu amatérského rádia na tzv. občanských pásmech. V české republice používání těchto pásem upravuje Český radiokomunikační úřad. Jedná se o frekvenční pásma mezi 26.5 – 27.5 MHz. Tato pásma jsou v dnešní době používána: pro spojení mezi členy rodiny (chata-auto-dům), nadšenci v rámci expedic a řidiči kamionů pro sdělování stavu vozovky a dopravních komplikací. Nevýhodou těchto pásem je nízký dosah, podle výkonu vysílače 50 – 100 km.

2.1.3 Analogové sítě a satelity

V poválečném období byla vybudována v americkém St. Louis první síť pro mobilní telefony. Hovory byly přepojovány lidskými operátory do pozemní telefonní sítě. Síť nabízela šest řečových kanálů pro celé město, proto se brzy stala nedostatečnou. Vědci z Bellových laboratoří řešili jak umožnit připojení více uživatelům a současně zachovat velikost alokovaného spektra. Zavedli princip tzv. buněk (cells) – geografická oblast je rozdělena do buněk, v rámci kterých mohou být využívány stejné frekvenční kanály různými uživateli. Tento princip využívá mnoho bezdrátových sítí i v dnešních dnech.

V šedesátých letech se objevilo další zajímavé uplatnění, protože byla v roce 1957 vypuštěna první sovětská družice *Sputnik*, načež i Spojené státy brzy vyslaly vlastní satelity. Tyto události přinutily vědce zabývat se novými tématy: efekt průchodu signálu atmosférou, vliv slunečních bouří na kvalitu signálu nebo optimalizace výkonu vysílače vzhledem k energii dodávané solárními panely. Satelitní komunikace je dnes velice rozšířená v televizním vysílání a telefonních sítích pro slabě osídlené oblasti.

Sedmdesátá léta znamenala revitalizaci mobilních telefonních sítí. Nemalou zásluhu na tom měl technologický pokrok umožňující podstatné zmenšení výrobních komponent. Tím byla umožněna výroba prvních skutečně přenositelných zařízení. Společnosti jako Motorola a AT&T (USA), Nippon Telephone and Telegraph (Japonsko) a Ericsson (Švédsko) začaly budovat první sítě založené na principu propojení mnoha malých buněk (cells). V této době byla technologie přenosu dat analogová, sítě z tohoto období jsou proto mnohdy popisovány jako 'analogové buňkové sítě' (Analog Cellular Systems) či sítě první generace (1G). Během osmdesátých let se začaly mobilní telefony pomalu šířit mezi obyvatelstvo, trh byl nasycen zhruba z 10% v Evropě a ve Spojených státech o něco méně. Telefony v této době byly mobilní, nicméně rozhodně ne kapesní. V některých zemích dostaly označení „automobilové“, neboť kvůli rozměrům a hmotnosti pro ně byl kufr automobilu vhodným úložištěm.

2.1.4 Digitální buňkové sítě

Koncem osmdesátých let již bylo zřejmé, že lze očekávat příchod globální telefonní sítě. Evropský institut telekomunikačních standardů vydal normu pro digitální mobilní buňkové sítě – sítě druhé generace (2G). Standard *Global System for Mobile*





communications (GSM) se později stal pojítkem světových sítí. GSM popisuje strukturu sítě, definuje nosné frekvence, kompresi hlasu, SIM (*Subscriber Identity Module*) karty, zamykání telefonu a bezpečnostní šifrovací algoritmy [8]. Počátkem devadesátých let vznikaly první GSM sítě. Díky lepší kvalitě hovoru a zabezpečené komunikaci brzy převzaly sítě založené na GSM standardu vedoucí pozici na trhu a nastartovaly skutečný boom mobilních telekomunikací.

Ačkoli mobilní sítě definovaly podobu bezdrátové komunikace v devadesátých letech, nebyly jedinou bezdrátovou technologií na trhu. Brzy k nim přibýly bezdrátové domácí telefony a fixní bezdrátové sítě. Fixní bezdrátová spojení měla nahradit stávající kabelové rozvody pro služby v domácnostech (televize a telefon). Státní zásahy však zajistily rovný přístup k vybudovaným rozvodům a technologie fixního bezdrátového přenosu se ukázala jako nepotřebná. Nejslibnější oblastí bezdrátové komunikace se zdály být mobilní sítě třetí generace (3G). 3G sítě měly kromě základních hlasových služeb a krátkých textových zpráv poskytovat také datové přenosy, srovnatelné s pevnými přípojkami. Mobilní datové připojení vyžadovalo rozšířit používaná frekvenční spektra o další. Operátoři si je mohli v letech 2000 a 2001 nakoupit ve speciálních aukcích. Poptávka vynesla ceny vysoko, což způsobilo nedůvěru akcionářů v návratnost investic, důsledkem čehož hodnota telekomunikačních firem prudce klesla [13]. Zároveň klesl objem zakázek a příjmy firem, realizujících výzkum a vývoj v oblasti mobilní komunikace. O práci přišlo během roku na 100 000 lidí. Toto období bývá nazýváno jako 'telekomunikační krach'. Vývoj mnohých bezdrátových systémů se rapidně zpomalil či úplně skončil a jejich propagátoři krachovali. Krize postihla i akademické instituce, neboť výrazně ubyly finanční prostředky pro podporu výzkumu.

2.1.5 Renesance bezdrátových systémů

Od roku 2003 lákaly bezdrátové komunikační systémy investory zpět. Důvodem byla za prvé poptávka po 2G sítích na nových trzích (zejména v Asii) a za druhé nové technologie, které umožňovaly snáze a levněji realizovat 3G sítě. Rychlost připojení přes mobilní telekomunikační sítě dosahovala rychlosti pevných přípojek (až 5 Mbps). Technologie umožnila vznik nových zařízení, určených nejen k obsluze hlasových a textových služeb, ale i prohlížení webových stránek a streaming multimedialního obsahu. Velice úspěšným zařízením, reprezentujícím nově vzniklou skupinu takzvaných „smartphone“ telefonů, byl v roce 2007 představený *iPhone* [7]. Brzy byl následován dalšími zařízeními, vyžadujícími neustálé připojení k rychlému internetu a trh s datovými přenosy pro mobilní telefony rychle rostl. Zatímco byly v širokém měřítku nasazovány 3G sítě, výzkumně-vývojová centra již pracovala na čtvrté generaci (4G). Nejnovější generace mobilních sítí cílí na připojení velkého počtu uživatelů k rychlému mobilnímu internetu například při sledování televizních vysílání v reálném čase na chytrém telefonu či tabletu. Generace mobilní telekomunikace jsou srovnány na obrázku 2.2.

Druhou významnou oblastí bezdrátových komunikací s nečekaně vysokým potenciálem se ukázaly být bezdrátové lokální počítačové sítě. Počítače a podobná zařízení plnící normu IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11 byla téměř stejně všestranná jako mobilní telefony. O oblíbenosti této technologie, známé dnes pod značkou Wi-Fi, svědčí rostoucí počet zařízení pro bezdrátový přístup k in-

1G	2G	3G	4G
			
1980	1990	2003	2009
- základní hlasové služby - analogová technologie	- vylepšení kvality hovorů - digitální standard GSM	- multimediální služby - přístup k internetu	- cíleno na datové služby - rychlý mobilní internet
2.4 kbps	64 kbps	2 Mbps	100 Mbps

Obrázek 2.2: Srovnání generací mobilních sítí

ternetu v domácnostech, v kavárnách, na letištích a dalších veřejných místech. Důsledkem toho si mohou mnozí lidé, jež si vystačí k práci s laptopem a internetovým připojením, zvolit, kdy a odkud budou vykonávat své zaměstnání.

Do třetice přinesl rozvoj bezdrátových technologií i nové možnosti pro monitorování a řízení domácností, průmyslových procesů i celých továren. Vznik bezdrátových senzorových sítí (více o nich v kapitole 3) byl podporován především průmyslovými subjekty a armádou. Výzkumným institucím přinesl nové problémy k řešení, konkrétně ad hoc² a peer-to-peer³ síťovou infrastrukturu. Senzorové sítě totiž nemají předem danou strukturu. Pokud je vzdálenost mezi zdrojem a cílem příliš velká, ostatní uzly mají za úkol pomoci s přeposíláním zprávy. Kvůli významným strukturálním odlišnostem vznikly pro senzorové sítě nové oblasti výzkumu a senzorové sítě chápeme jako samostatnou kategorii bezdrátových komunikací.

2.2 Typy služeb

V předešlé sekci byly zmíněny některé služby pro bezdrátovou komunikaci z pohledu historického vývoje. Tato část kapitoly o bezdrátových komunikacích se bude věnovat jejich logickému rozčlenění do skupin a stručnému popisu [20].

2.2.1 Broadcast

Broadcast neboli plošné vysílání je nejstarší bezdrátovou službou. Jedná se o distribuci audio nebo video signálu posluchačům a divákům. Pro plošné vysílání platí následující čtyři specifika:

²Decentralizovaný typ sítě, nespolehlivý na existující infrastrukturu. Každý uzel se podílí na trasování a přeposílání dat [18]

³Distribuovaná síť složená pouze z rovnocenných uzlů, bez centralizované administrativy [18]

- Informace jsou odesílány pouze v jednom směru, od vysílací stanice k příjemcům. Příjemci nemají možnost posílat informace nazpět.
- Přenášená informace je stejná pro všechny příjemce
- Informace jsou předávány nepřetržitě.
- V mnohých případech vysílá více vysílačů totožnou informaci. Příkladem mohou být celostátní televizní a rozhlasové stanice.

Zmiňované vlastnosti umožňují mnohá zjednodušení při vývoji a nasazení komunikačních systémů typu broadcast. Není nutné řešit dvousměrnou komunikaci (duplexní kanály), počet koncových uživatelů nijak neovlivní funkčnost sítě, informace je určena komukoliv, tudíž nevzniká požadavek na šifrování spojení.

2.2.2 Mobilní telekomunikační (cellular) sítě

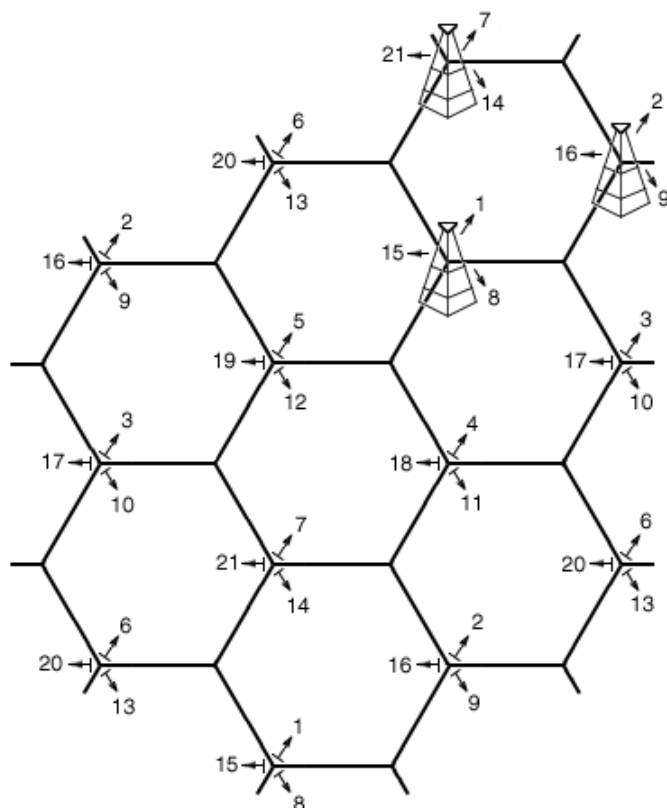
Mobilní telekomunikace je ekonomicky nejdůležitější formou bezdrátové komunikace. Charakterizují je následující vlastnosti:

- Informační tok funguje obousměrně. Uživatel může odesílat a přijímat data ve stejný okamžik.
- Uživatel může být kdekoliv uvnitř sítě (národní i mezinárodní). Ani jeden z účastníků hovoru nemusí znát polohu protistrany, úkolem sítě je zajistit libovolné spojení s přihlédnutím k mobilitě účastníků.
- Hovor může být iniciován uživatelem i sítí. Jinými slovy uživatel může volat i být volán.
- Hovor je určen jedinému uživateli, ostatní zařízení v síti by neměla být schopná odposlouchávat.
- Uživatel se může neomezeně pohybovat, jeho poloha se může v průběhu hovoru významně měnit.

Protože každý uživatel sítě chce přijímat a vysílat odlišná sdělení, počet aktivních zařízení je omezený. Dostupné přenosové pásmo musí být sdíleno různými uživateli, čehož je dosahováno technikami vícenásobného přístupu. Tímto se mobilní sítě liší od plošného vysílání, kde je počet uživatelů neomezený, protože přijímají stejné informace.

Pro zvýšení maximálního počtu aktivních uživatelů je uplatňován takzvaný buňkový přístup: pokrytá oblast je rozdělena na podoblasti, zvané buňky. V každé buňce sdílí různí uživatelé přenosové pásmo. Situaci komplikuje fakt, že buňky sousedící blízko sebe nemohou přidělovat stejné nosné frekvence, aby nedocházelo k rušení. Nicméně pokud jsou buňky dostatečně daleko, mohou využívat stejné nosné frekvence, protože rušivý signál je se zvyšující se vzdáleností slabší. Proto na území státu existují stovky až tisíce buněk užívajících stejné frekvence.

Často využívané je rozmístění vysílačů na třech vrcholech pomyslného šestiúhelníku (obr. 2.3). Vysílač má tři směrové antény natočené do třech různých buněk,



Obrázek 2.3: Schéma rozmístění vysílačů a opakování frekvenčních kanálů mobilní sítě

buňka je pokryta třemi různými vysílači, což jí zajistí minimálně tři frekvenční kanály. Čísla v ilustraci jsou číselná označení kanálů, která se opakují každé tři buňky.

Dalším významným aspektem mobilních sítí je neomezený pohyb uživatele. Uživatel se může nacházet kdekoliv v pokryté oblasti a během pohybu si buňky předávají obsluhu jeho hovoru. Jak již bylo zmíněno v historickém přehledu, mobilní sítě získaly na popularitě v osmdesátých letech dvacátého století a nyní jsou dominantní formou bezdrátové komunikace s více než 7.1 miliardy aktivních zařízení po celém světě [6].

2.2.3 Bezdrátové LAN a PAN sítě

Hlavním úkolem místních sítí (Local Area Network – LAN) a jejich bezdrátové alternativy (Wireless LAN – WLAN) je připojit uživatele k páteřní lince. Zařízením v síti zpravidla bývá laptop či tablet, páteřní linka pak zajistí připojení k internetu. Největším lákadlem bezdrátových LAN je pohodlí a volnost pohybu uživatele, svoje místo si však najdou i u stolních počítačů, protože ušetří čas i peníze investované při pokládání kabelů.

Sledovaným parametrem bezdrátových LAN je především rychlost. Minimálním požadavkem je překonání rychlosti internetové přípojky. Ve třetím čtvrtletí roku 2014 byly naměřeny a zveřejněny společnostmi Akamai Technologies [1] tyto údaje:

- Průměrná rychlost připojení globálně dosáhla 4.5 Mbps.

- Průměrná rychlost připojení v České republice se pohybovala kolem 12.3 Mbps.
- Nejvyšší hodnoty rychlosti připojení měl Hong Kong, až 84.6 Mbps.
- Maximální hodnoty rychlosti připojení v České republice byly okolo 43.4 Mbps.
- 20% přípojek v České republice bylo rychlejších než 15 Mbps.
- Přípojek rychlejších než 4 Mbps bylo v České republice 83%.

Se stále se zvyšující rychlostí internetových přípojek přichází odpovídající standardy IEEE 802.11, což jsou normy pro bezdrátové LAN sítě. Zatímco první verze z roku 1997 uváděla maximální rychlost 2 Mbps, její úprava z roku 2013 (IEEE 802.11ac) již předpokládá maximum 780 Mbps. Srovnání revizí je uvedeno v tabulce 2.1. Za zmínku také stojí standard 802.11b, jež byl jako první označen dnes tolik populární značkou Wi-Fi [9]. Vzhledem k vysoké úrovni standardizace je tedy teoreticky možné se s Wi-Fi zařízením připojit do libovolné bezdrátové LAN sítě. Prakticky však zájemci v připojení velmi často brání majitel přístupového bodu minimálně heslem, častěji i filtrováním MAC adresy⁴.

Pokud budeme uvažovat menší oblast pokrytí než u WLAN, mluvíme o osobních sítích (Personal Area Network – PAN). PAN sítě slouží pro jednoduché nahrazování drátů v okolí člověka. Například zařízení v souladu se standardem Bluetooth umožňují bezdrátové náhlavní soupravě komunikovat s mobilním telefonem. Bluetooth a příbuzné technologie, založené na standardu IEEE 802.15 pro PAN sítě, jsou využívány v oblastech se vzdáleností mezi zařízeními v řádech metrů. Aplikace můžeme najít u počítačových periferií (bezdrátové myši, klávesnice, tiskárny, sluchátka) či v domácích zábavních systémech.

Standard	Rok vydání	Pásmo [GHz]	Maximální rychlost [Mbps]
IEEE 802.11	1997	2.4	2
IEEE 802.11a	1999	5	54
IEEE 802.11b	1999	2.4	11
IEEE 802.11g	2003	2.4	54
IEEE 802.11n	2009	2.4/5	65/135
IEEE 802.11ac	2013	5	780
IEEE 802.11ad	2012	60	6912

Tabulka 2.1: Přehled standardů IEEE 802.11

2.2.4 Fixní bezdrátové systémy

Fixní bezdrátové systémy zastupují kabelová spojení tam, kde by bylo položení kabelu ekonomicky náročné, či přímo neproveditelné. Na rozdíl od již zmiňovaných bezdrátových LAN není jejich cílem umožnit neomezenou mobilitu koncových zařízení. Specifikem fixních bezdrátových soustav je v první řadě překlenutá vzdálenost, začínající na stovkách metrů a dosahující i desítek kilometrů.

⁴„Media Access Control“ adresa – jedinečný identifikátor síťového prvku

Fixní bezdrátové sítě byly představeny mobilním operátorům jako alternativa stávajícího drátového telefonního vedení. Nicméně po státních zásazích bylo ve většině států majitelům rozvodů nařízeno dělit se o konektivitu s konkurencí. Těmito regulacemi ztratila většina fixních bezdrátových sítí své opodstatnění. Dnes je možné fixní bezdrátové sítě nalézt hlavně v rozvojových zemích, kde drátové sítě úplně chybí.

2.2.5 Satelitní systémy

Kromě televizního vysílání, které generuje na satelitním trhu nejvyšší zisky, jsou významnou aplikací satelitní komunikace mobilní sítě. Satelitní telefonní sítě se funkční strukturou příliš neliší od klasických, které mají antény umístěné na stožárech v zemi. Nicméně lze najít několik klíčových rozdílů.

Vzdálenost mezi základnou a mobilním telefonem je mnohem větší, v případě geostacionárních družic je to 36 000 km, pro satelity na nízké oběžné dráze jsou to stovky kilometrů. Následkem toho je vyžadována mnohem větší vysílací energie. Na satelitech, někdy i telefonech, musí být instalovány antény s vysokým zesílením a komunikace z interiéru budov je téměř nemožná.

Další důležitý rozdíl mezi satelitními a klasickými telefonními sítěmi leží ve velikosti buňky. Kvůli vzdálenosti mezi satelitem a zemí není možné vytvořit buňky o průměru menším než 100 km. Velikost pokryté buňky je největší výhodou i slabinou satelitních sítí. Umožňuje operátorům získat jednoduše pokrytí rozlehlé, málo obydlené oblasti – jedna buňka může pokrýt i region o rozloze Sahary. Na druhou stranu spektrální efektivita u tak velkých buněk je malá, což znamená, že v jednu chvíli může síť využívat jen několik lidí.

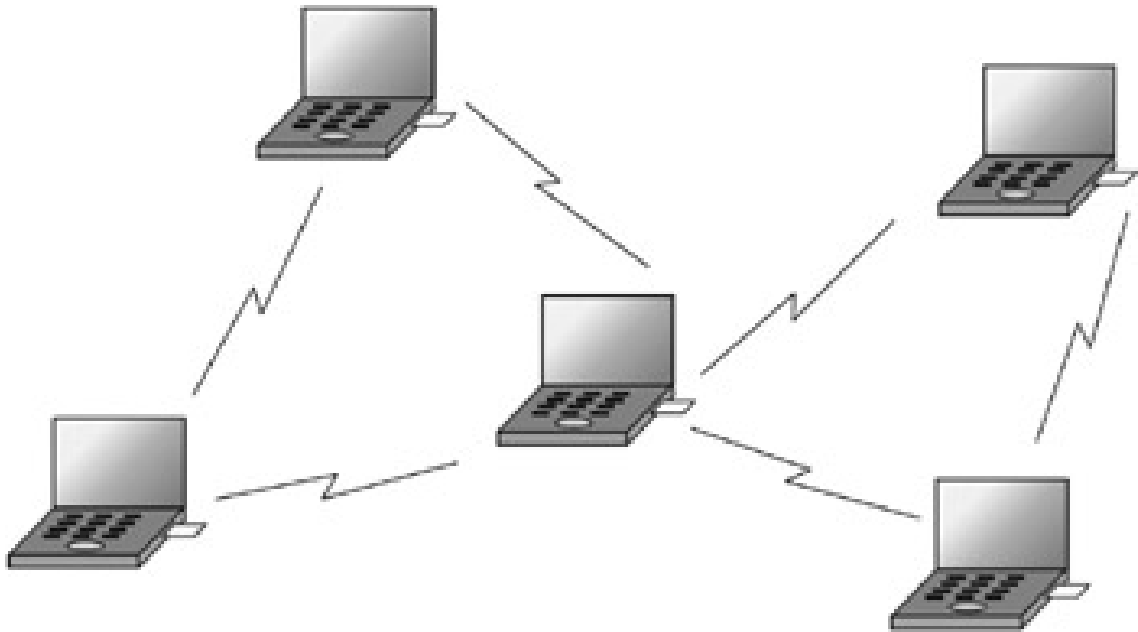
Náklady na vybudování satelitní sítě, což zahrnuje vypuštění satelitů na oběžnou dráhu a zároveň vybudování potřebné infrastruktury pro spojení s telefonní sítí na zemi, jsou mnohem větší než u mobilních sítí. Z tohoto důvodu je využití satelitních telefonů svázáno s vysokými finančními náklady. Proto takové systémy nacházejí využití v vybraných záchranných a bezpečnostních složkách, u novinářů v katastrofami či válkou postižených oblastech a u zaměstnanců ropných vrtů na oceánských plošinách. Vedoucím poskytovatelem připojení je INMARSAT. Na konci devadesátých let vznikl ve snaze poskytnout levné satelitní spojení projekt IRIDIUM, bohužel skončil krachem.

2.2.6 Ad hoc a senzorové sítě

Všechny doposud zmíněné systémy vycházely z předem definované architektury, ve které byly určeny prvky pro vykonávání dohledu nad řízením sítě (např. switch, router). Velikosti popisovaných sítí se liší, ve všech je však možné jasně rozlišit mezi prvky síťové infrastruktury a připojeným vybavením. K tomuto přístupu existuje alternativní architektura, ve které figuruje pouze jeden druh zařízení. Tato zařízení, která mohou být všechna přenositelná, se sama organizují do sítí na základě jejich polohy a potřeb.

Takové sítě pak nazýváme *ad hoc*. V ad hoc sítích (obr. 2.4) nalezneme prvky spravující síť, ovšem role zařízení v síti se liší podle situace a bývá ustanovena při vytváření sítě či při změně její struktury. Zatímco nosné médium (fyzická vrstva

komunikace) je totožné se sítěmi s infrastrukturou, vrstvy zajišťující síťovou komunikaci se liší.



Obrázek 2.4: Síť typu ad hoc

Výhodou ad hoc sítí je jejich nízká cena (nevyžadují další infrastrukturu) a velká flexibilita. Slabinou je nižší efektivita, menší dosah komunikace a omezení na počet zařízení v síti. Ad hoc sítě jsou široce zastoupeny v bezdrátových senzorových systémech (Wireless Sensor Network – WSN), protože umožňují vzájemně komunikovat zařízeními pro automatizaci budov a továren či pro ostrahu objektu.

2.3 Požadavky na služby

Klíčem k úspěšnému návrhu bezdrátového systému je uvědomění, že různé služby vyžadují velice odlišné parametry sítě ve smyslu přenosové rychlosti, dosahu, spotřeby energie, zabezpečení atd. Není opodstatněné navrhovat síť schopnou přenášet gigabity za sekundu na vzdálenost sta kilometrů uživateli, jež se pohybuje rychlostí 500 km/h. Ačkoli cílem inženýrských snah mnohdy bývají podobně ambiciózní projekty, z ekonomického pohledu jde o drahé nápady s malou až žádnou cílovou skupinou. V následující sekci budou vyjmenovány nejčastější požadavky na bezdrátové sítě i s výčtem příslušných aplikací.

2.3.1 Datový tok

Datové toky bezdrátových služeb začínají u několika málo bitů za sekundu a dosahují až několik gigabitů za sekundu, záleží na typu aplikace.

Senzorové sítě zpravidla vyžadují menší datové toky do rychlosti zhruba 1 kbps. Většina aplikací zahrnuje měření provozních hodnot (teploty, rychlosti, tlaku, napětí) a odesílání těchto hodnot několikrát za vteřinu až několikrát za hodinu. Rychlejší

datový tok je poté vyžadován u centrálních uzlů, které pozorované hodnoty shromažďují a předávají nadřazenému systému ke zpracování.

Hlasové služby si zpravidla vystačí s rychlostmi 5 až 64 kbps v závislosti na deklarované kvalitě a použitých kompresních algoritmech. V mobilní komunikaci je standard okolo 10 kbps, pro firemní bezdrátové telefony pak 32 kbps.

Osobní místní síť PAN byly původně vymezené pro připojení periférií k osobním počítačům a nevyžadovaly vysoké datové toky. Bluetooth jako typický zástupce PAN nabízí datovou propustnost okolo 700 kbps. V poslední době však přibývá pokusů posílat bezdrátově i zvuk, a především video ve vysoké kvalitě, což vyžaduje přinejmenším 10 Mbps.

Vysokorychlostní datové síť Mobilní telefonní síť třetí generace poskytují datové připojení o rychlosti minimálně 200 kbps. Síť čtvrté generace dosahují až 100 Mbps.

Počítačové bezdrátové síť WLAN (Wireless LAN), implementující standard IEEE 802.11ac v dnešní době reálně dosahují rychlostí 400 Mbps.

2.3.2 Dosah a počet uživatelů

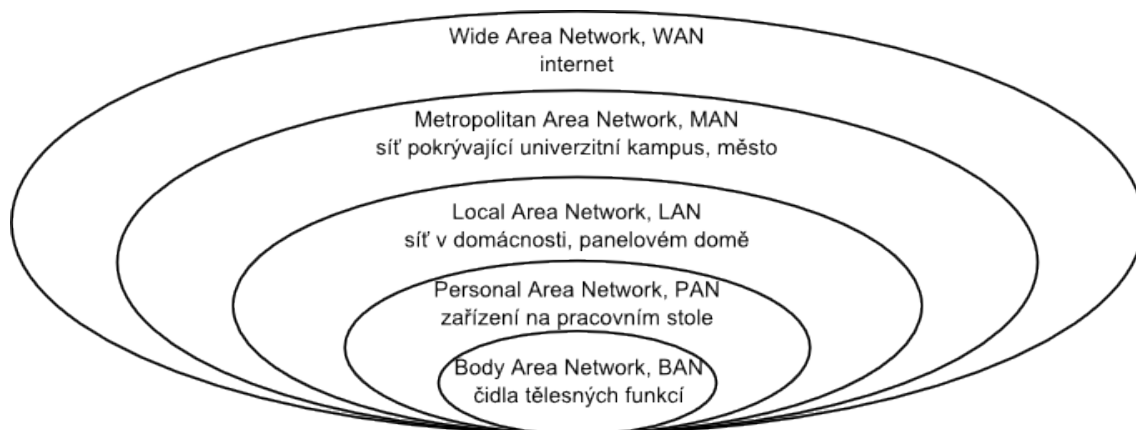
Další kritériem pro rozlišení bezdrátových sítí je jejich dosah a počet uživatelů. Dosahem je zde míněna vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. Pokrytá oblast nemusí být na tomto dosahu závislá, protože kombinací více vysílacích stanic je možné pokrýt libovolně velkou oblast.

Osobní počítačové síť PAN mají maximální dosah do 10 metrů. Pokrývají tedy osobní prostor uživatele. Zpravidla se jedná o připojení periférií počítače nebo domácích zábavních systémů. Kvůli malému dosahu je malý i počet aktivních komponent. Také počet překrývajících se sítí (tzn. více sítí v místnosti) je většinou menší než pět. Díky tomu je plánování a přístup k nosnému médiu (elektromagnetickému spektru) velmi snadný.

Speciální podkategorií PAN sítí jsou síť spojující zařízení v rozsahu těla (Body Area Network – BAN). Ty zajišťují připojení náhlavních souprav k mobilnímu telefonu, případně dnes velmi populárních senzorů životních funkcí pro fitness aplikace chytrých telefonů. Dosah BAN sítí je omezen na 1 metr.

Bezdrátové místní síť WLAN pokrývají větší oblasti řádově do 100 metrů. Většina zařízení v této skupině jsou domácí bezdrátové síť. Počet uživatelů je omezen na několik desítek. Při větším počtu připojených zařízení se rapidně snižuje přenosová rychlost soustavy. Ještě větší dosah mají metropolitní (Metropolitan Area Network, MAN) a rozlehlé (Wide Area Network, WAN) síť. Srovnání rozsahu pokrytí s příklady je na obrázku 2.5.

Mobilní telefonní síť rozlišují dva druhy pokrývaných buněk. Mikro-buňky (micro-cells) s dosahem 500 metrů a makro-buňky (macro-cells) o poloměru 10 až 30 kilometrů. V závislosti na poskytované kvalitě hovorů a datového připojení je počet aktivních uživatelů buňky 5 až 50.

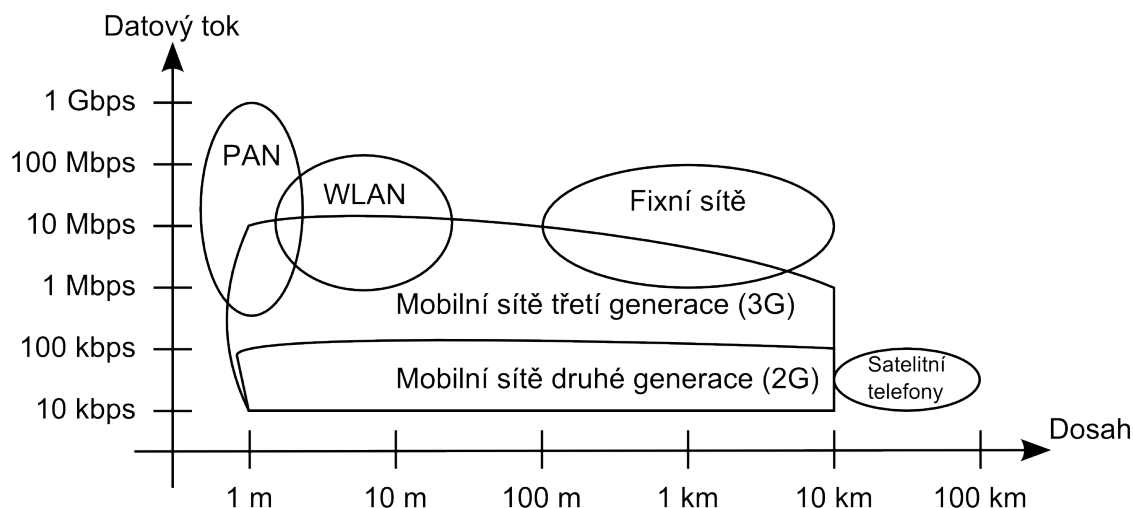


Obrázek 2.5: Srovnání rozsahu místních sítí s příklady

Fixní bezdrátové služby pokrývají srovnatelnou oblast jako mobilní sítě. Jmenovitě jsou to stovky metrů až desítky kilometrů. Počet zařízení dosahuje maximálně několika desítek.

Satelitní služby mají největší rozsah, mohou pokrývat celé státy, dokonce kontinenty. Velikost území je spjata s výškou oběžné dráhy satelitu.

Obrázek 2.6 graficky znázorňuje dosah sítě a poskytovanou rychlost pro jednotlivé aplikace. Je zřejmé, že vysokých rychlostí bude snadněji dosaženo při menší vzdálenosti od vysílače. Výjimkou jsou fixní systémy, které vyžadují dosah i rychlost výměnou za nepohyblivost zařízení v síti.



Obrázek 2.6: Datový tok vs dosah bezdrátových systémů

2.3.3 Pohyblivost

Bezdrátové sítě se liší i v rozsahu nevázaného pohybu, který musí uživateli poskytnout. Možnost pohybovat se a zároveň komunikovat je velkým lákadlem bezdrátových sítí, je nutné však rozlišit různé stupně mobility.

Nepohyblivá zařízení jsou jednou umístěna na určené místo a zde setrvávají. Hlavní motivací pro použití takových zařízení je snaha vyhnout se pokládání kabeláže. Příkladem jsou fixní bezdrátové sítě, ovšem do této skupiny by spadala i všechna komunikace po drátech.

Stěhovatelná zařízení jsou umístěna na dané místo a zde určitou dobu setrvávají, než jsou přestěhována. Takovým zařízením je laptop. Po dobu práce je položen někde na stole, poté je přenesen jinam. Není běžné používat jej při chůzi.

Pomalou se pohybující zařízení jsou zařízení užívaná při rychlosti chůze (mobilní telefony). Výsledkem pomalého pohybu jsou jen malé změny v komunikačním kanálu a k předávání komunikace mezi buňkami dochází zřídka.

Rychle se pohybujícím zařízením je vysílající mobilní telefon v osobním voze. Uvažovaná rychlost se pohybuje mezi 30 až 150 km/h.

Extrémně rychle se pohybující zařízení mohou být umístěna na palubě rychlovlaku, nebo letadla. Komunikace s rychle se pohybujícími objekty přináší nové výzvy pro návrh datové vrstvy, protože dochází k Dopplerově jevu⁵ a častým změnám operačních buněk.

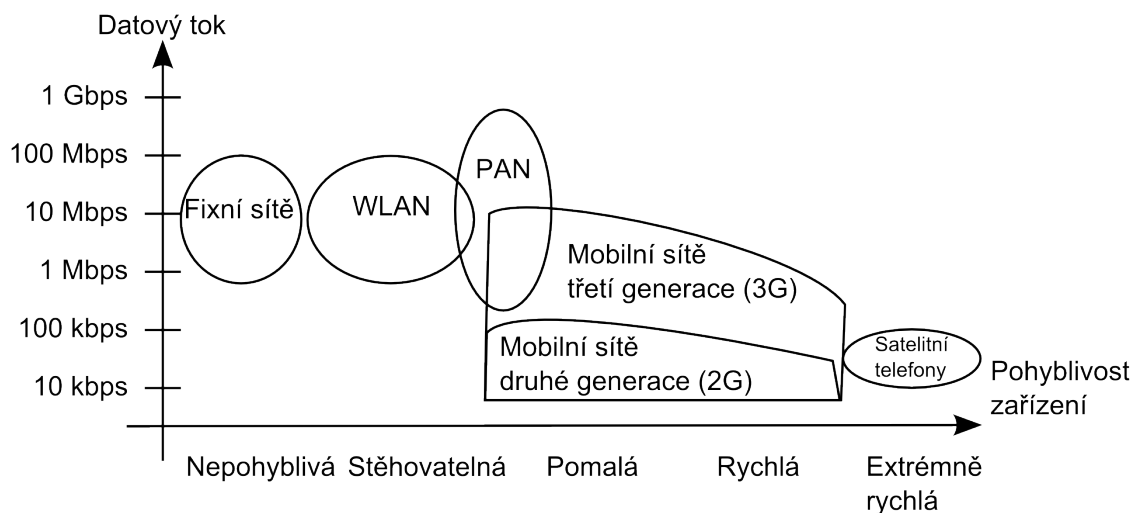
Obrázek 2.6 graficky znázorňuje vztah poskytované rychlosti a uvažované pohyblivosti pro různé aplikace. Pro systémy pohybující se rychlostí do 0.6 m/s nemá rychlost pohybu významný vliv na rychlost datového toku [3].

2.3.4 Spotřeba energie

Spotřeba energie je kritickým faktorem pro bezdrátová zařízení. Mnohá bezdrátová zařízení využívají baterie (jednorázové či nabíjecí), aby nebyla dotčena jejich přenositelnost.

Dobíjecí baterie: jsou oblíbené a využívány u mobilních telefonů a laptopů. Výdrž na baterii je pro zákazníky důležitou vlastností. Energetická náročnost bezdrátové komunikace je závislá na uvažované vzdálenosti přijímače a množství přenesených dat. Zatímco u laptopů není spotřeba vysílače důležitým faktorem v celkové výdrži, u mobilních telefonů je tomu právě naopak. Dnes všeobecně uznávaným minimem je několik dní při zapnutém telefonu, při hovoru alespoň tři až čtyři hodiny. U chytrých telefonů je poměr mezi spotřebou technologie pro bezdrátovou komunikaci a spotřebou ostatních operací nejvyrovnanější, proto je zde obzvlášť důležitá optimalizace.

⁵Doppler shift – popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného signálu oproti vysílanému z důvodu vzájemné rychlosti



Obrázek 2.7: Datový tok vs pohyblivost bezdrátových systémů

Jednorázové baterie jsou využívány v bezdrátových senzorových sítích pro jejich nízkou cenu. U některých senzorů ani není možné baterii vyměnit, po skončení životnosti baterie jsou vyhazována celá, včetně senzoru a vysílače (např. jednorázové medicínské sondy). U těchto zařízení je kladen velký důraz na efektivní práci s baterií a úsporu energie.

Napájená zařízení: vysílací základny a další statická zařízení jsou připojená ke stálému zdroji energie. U těchto zařízení nebývá spotřeba nijak optimalizována. Naopak se zde setkáváme se snahou přesunout co nejvíce funkcí a úkolů na tyto základny a tím snížit spotřebu mobilních částí sítě.

2.3.5 Směr přenosu

Ne všechny bezdrátové sítě vyžadují přenos informace v obou směrech.

Jednosměrné systémy vysílají informaci pouze jedním směrem. Zástupcem jsou televizní a rozhlasové systémy.

Semi-duplex (částečně duplexní) systémy umožňují komunikovat oběma směry, ovšem ne ve stejný okamžik. Vysílačky, u kterých je nutné stisknout tlačítko pro vysílání hovoru, jsou typickým příkladem. U těchto zařízení uživatel slovem „přepínám“ dává najevo, že domluvil a další zájemci smí vysílat.

Full-duplex (plně duplexní) systémy mohou vysílat oběma směry současně – např. mobilní telefony.

Asymetrické full-duplex systémy v případě datových přenosů je často dopředu známo, že přenosy jedním směrem budou častější a objemnější (většinou stahování). Ačkoliv plně duplexní režim je zachován, síť vykazuje vyšší datovou propustnost v jednom

ze směrů.

2.3.6 Využití spektrum

Použité spektrum může být přiřazeno exkluzivně pro konkrétní službu, nebo je sdílené. S přihlédnutím k typu spektra je následně nutné navrhovat síť dostatečně odolnou rušení.

Spektrum určené pro službu a operátora znamená, že určitá část elektromagnetického spektra je příslušným radiokomunikačním úřadem exkluzivně přidělena (po zaplacení licenčních poplatků) poskytovateli služby. Takto fungují sítě mobilních operátorů, čímž umožňují plně kontrolovat celé spektrum a využít jednotlivé části spektra v geografické oblasti tak, aby se minimalizovalo rušení.

Spektrum pro více uživatelů

- *Spektrum vyhrazené službě*: tato spektra mohou být využívána více různými operátory či zařízeními. Spektrum ovšem slouží pouze k jednomu účelu. Mezi službami s vyhrazenými pásmy můžeme nalézt námořní systémy (informační služby, tísňová komunikace), spektra pro medicínské a veterinární implantáty, družicová a meteorologická čidla, synchronizaci přesného času. Bez příslušné licence není dovoleno vyhrazené spektrum používat. Protože rušení přichází pouze od zařízení stejného typu, je snazší mu předejít. V těchto pásmech bývá klíčem k eliminaci rušení omezení maximálního výkonu zařízení.
- *Volné spektrum* není vyhrazené ani službě, ani operátorovi. Velmi známým je ISM (Industrial, Scientific and medical – průmyslové, vědecké a medicínské) pásmo 2.4 GHz. V tomto pásmu pracují WiFi a Bluetooth zařízení, alarmy do automobilů, mikrovlnné trouby a další. I v tomto pásmu existují přísná omezení na maximální výkon vysílačů, aby se předešlo rušení. Bohužel v některých oblastech je přítomné množství odlišných technologií, neschopných navzájem komunikovat a kooperovat vysílání v pásmu. Komunikace ve zmiňovaném pásmu 2.4 GHz pak může připomínat spíše závody ve zbrojení, protože kdo má silnější vysílač, vysílá.

Po roce 2000 se začaly objevovat nové, sofistikovanější přístupy práce s frekvenčními spektry.

Ultra-širokopásmové přenosy posílají informace na širokém spektru a zároveň udržují nízký vysílací výkon. Proto může spektrum obsahovat i obsazené frekvence a nedojde k významnému rušení již zavedené služby. Využití širokého spektra frekvencí zvyšuje šanci, že informace bude přijata i přes malý vysílací výkon.

Adaptivní využití spektra je nejsofistikovanější způsob přístupu ke spektru. Zařízení před vysláním změří využitá spektra v oblasti, najde nejméně využívanou část a na té poté komunikuje. Spektrum bývá průběžně sledováno i během komunikace a síť se může v případě potřeby ve vhodném okamžiku přeladit. Tento přístup bývá nazýván kognitivní rádio.

2.3.7 Kvalita služeb

Kvalita je pro různé typy služeb hodnocena rozdílně, protože požadavky na poskytovanou kvalitu se napříč službami liší. Pro hlasovou komunikaci je hlavním kritériem kvalita hovoru, jež je hodnocena subjektivně takzvaným MOS (Mean Opinion Score) testem. Kvalita hovorů je ohodnocena bodovým ziskem 1 – 5 bodů od velkého množství respondentů, výsledná známka služby je průměr z hodnocení. U datových služeb posuzujeme rychlost přenosu, měřenou v bitech za sekundu. Vyšší je samozřejmě lepší.

Důležitým faktorem je dostupnost služby. Pro mobilní telekomunikace je kvalita počítána jako doplněk k součtu podílu neuskutečněných hovorů⁶ a desetinásobku podílu přerušovaných hovorů. Tento vzorec uvažuje fakt, že přerušování aktivního hovoru je pro uživatele horší, než když se nedovolá vůbec. V Evropě dosahuje kvalita služeb mobilních operátorů 95%.

V případě vojenských a záchranných složek se vzorec mění na doplněk k součtu podílu neuskutečněných hovorů a podílu přerušovaných hovorů, což odráží skutečnost, že při mimořádné situaci je stejně nepříjemné ztratit spojení jako se nedovolat. Hlasové služby pro záchranné složky jsou proto plánovány pečlivěji a robustněji, aby dosáhly hodnocení kvality 99%. Pro kategorii „ultraspolehlivých systémů“, kam spadá průmyslová automatizace, je stanovena minimální kvalita služby 99.99%.

Souvisejícím kritériem je *přípustné zpoždění*. U hlasové komunikace nesmí být zpoždění mezi vyřčením sdělení a jeho přijetím delší než 100 milisekund. Pro streaming videa a zvuku může být toto zpoždění delší (až desítky sekund), neboť se pro uživatele „ztratí“ při počátečním načítání dat do zásobníku (tzv. buffering). Je ovšem nutné, aby data chodila ve správném pořadí, to znamená, že první vysílaná data jsou i první přijatá. U datových přenosů jsou přijatelná i větší zpoždění, stejně tak není důležité pořadí přijatých dat. Data však musí být přijatá všechna, protože zatímco u živého přenosu fotbalového utkání mohou být krátké (stovky milisekund) výpadky tolerovány, ztráta několika bitů ze stahovaného souboru způsobí jeho úplné znehodnocení a nefunkčnost.

Aplikace kladoucí velký důraz na nízké hodnoty zpoždění jsou bezpečnostní systémy a řízení strojů a procesů.

2.4 Srovnání bezdrátových a drátových komunikací

V předešlé části byly popsány požadavky a nároky kladené na bezdrátové sítě. Na závěr kapitoly o bezdrátových systémech jsou v tabulce 2.2 shrnuty nejdůležitější vlastnosti bezdrátových a drátových systémů.

⁶Neuskutečněných z důvodu slabého signálu a vytížení kapacity sítě

Drátové systémy	Bezdrátové systémy
<p>Komunikace probíhá prostřednictvím stabilního média jako například měděný drát nebo optické vlákno. Vlastnosti média jsou dobře popsány a neměnné v čase</p>	<p>Kvůli pohybu uživatele a faktu, že se informace dostane k příjemci více cestami, se přenosové médium často mění.</p>
<p>Zvýšení přenosové kapacity může být dosaženo použitím jiné frekvence či natažením dalšího kabelu.</p>	<p>Zvýšení přenosové kapacity musí být dosaženo použitím sofistikovanějších návrhů vysílače a u telekomunikačních sítí zmenšením buňky. Počet dostupných spekter znamená velké omezení.</p>
<p>K rušení a přeslechům buď nedochází vůbec, nebo jsou jejich vlastnosti neměnné.</p>	<p>Rušení a přeslechy jsou nevyhnutelné. Kvůli pohyblivosti uživatelů se jejich vlastnosti často mění.</p>
<p>Zpoždění vzniklé přenosem je neměnné a je přímo úměrné délce spojení.</p>	<p>Zpoždění signálu je částečně způsobené vzdáleností od vysílače, mění se tedy v čase.</p>
<p>Chybovost přenosu silně závisí na síle signálu (exponenciálně). Při relativně malé změně vysílacího výkonu se prudce snižuje počet chyb.</p>	<p>Zvýšení vysílacího výkonu do určité míry snižuje chybovost sítě. Zesílení přenosu ovšem vede jen k malým změnám chybovosti. Více pomáhá pokročilejší zpracování signálu.</p>
<p>Díky dobře známým a příznivým vlastnostem média je kvalita vysoká.</p>	<p>Kvůli nestálému médiu bývá kvalita většinou malá.</p>
<p>Odposlech a rušení (bez vědomí operátora) je téměř nemožné.</p>	<p>Rušení je možné, odposlech je relativně snadný. Musí být kladen vysoký důraz na šifrování.</p>
<p>Vytváření spojení je závislé na lokaci, tzn. spojení je tvořeno mezi dvěma pevnými body (přípojkami) nezávisle na tom, kdo bude komunikovat.</p>	<p>Vytváření spojení závisí na poloze přístroje, dané spojení proto není vázané k pevnému umístění.</p>
<p>Energie je distribuována buď samotnou sítí, nebo z energetické sítě. V obou případech není energetická náročnost důležitým návrhovým parametrem systému.</p>	<p>Přenosná zařízení jsou poháněna jednorázovými, nebo dobíjecími bateriemi. Spotřeba energie je proto důležitým faktorem při návrhu zařízení.</p>

Tabulka 2.2: Srovnání bezdrátových a drátových systémů

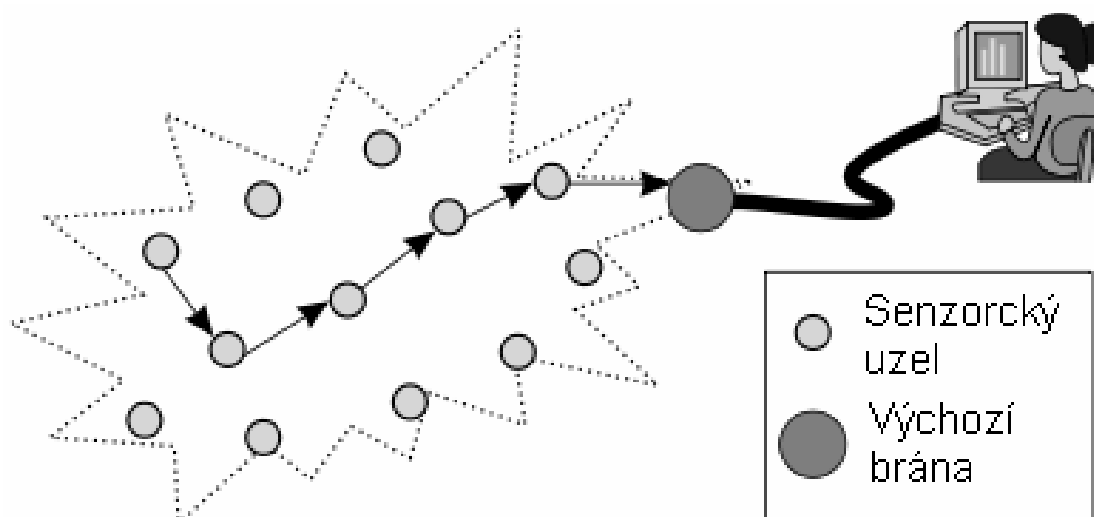
Kapitola 3

Bezdrátové senzorové sítě

Kapitola navazuje na úvod do problematiky bezdrátových komunikací z kapitoly 2 podrobnějším popisem bezdrátových systémů určených ke snímání a sběru dat. Zabitým termínem pro označování této technologie je Wireless Sensor Network (WSN), česky bezdrátová senzorová síť.

3.1 Popis technologie

Senzorová síť (obr. 3.1) je infrastruktura složená z elementů (senzorových uzlů) schopných snímat, zpracovávat a prostřednictvím výchozí brány odesílat údaje nadřazenému řídicímu systému či lidskému operátorovi. Tím umožňují pozorovat, vyhodnocovat a upravovat chování daného procesu [15]. Sledované prostředí může být průmyslový proces, přírodní děj, biologický subjekt nebo počítačová infrastruktura.



Obrázek 3.1: Bezdrátová senzorová síť

Bezdrátové senzorové sítě jsou ekonomickými i vědeckými experty vnímány jako významná technologie s nadějnou budoucností v mnoha oblastech lidské činnosti. Nejčastěji zmiňovaným důvodem pro takto optimistické prognózy jsou nižší náklady na montáž a údržbu ve srovnání s kabelovými systémy [28]. Zvyšující se kvalita a rychlost bezdrátového přenosu a klesající cena elektronických součástí nutných

pro výrobu sensorových uzlů (procesorová jednotka, komunikační čipy, snímací komponenty) napomáhají stabilnímu růstu trhu s WSN [10].

V sensorové síti rozlišujeme čtyři základní komponenty:

- Shluk náhodně nebo cíleně umístěných elementů (sensorových uzlů)
- Síť propojující senzory (bezdrátová infrastruktura)
- Sběrné místo pro shromáždění naměřených údajů (výchozí brána)
- Skupinu výpočetních jednotek pro zpracování dat od sběrného místa (nadřazený řídicí systém)

V případě rozsáhlých sítí může být shromažďováno enormní množství informací. Pak je nezbytné, aby samotné uzly částečně plnily úlohu zpracování dat.

Z hlediska výzkumu přinášejí WSN nové výzvy spojené se systémy složitě propojených bezdrátových zařízení pro přesné snímání okolního prostředí, které jsou omezeny nároky na nízkou energetickou spotřebu, malou kapacitou paměti a slabým výpočetním výkonem. Tato specifika dělají z bezdrátových sensorových sítí multidisciplinární obor, kombinující radiokomunikace, počítačové sítě, zpracování signálu, správu databází, optimalizaci využití výpočetních a energetických zdrojů, návrh hardwaru a softwaru [2].

Příkladem prvních sensorových sítí jsou systémy pro: řízení letového provozu, monitorování elektrické přenosové soustavy, meteorologii. Tyto systémy využívají specializované výpočetní a komunikační vybavení, což se odráží na jejich vysoké ceně. Levnější WSN cílí na aplikace pro: zabezpečení objektů, zdravotnictví a monitorování procesů.

3.2 Problematika návrhu

Návrh sensorových sítí zahrnuje množství problémů. Řada z nich je společná s ad hoc sítěmi, představenými v 2.2.6.

3.2.1 Odolnost vůči chybám

Senzorové sítě jsou náchylné k chybám a často nasazované v nepříznivém prostředí. Uzly mohou selhat kvůli hardwarovému problému, fyzickému poškození nebo vyčerpání baterie. Celková chybovost je očekávána vyšší, než je tomu u drátových čidel. Protokoly nasazované u bezdrátových sensorových sítí by měly být schopné detekovat veškerá selhání co nejdříve a ošetřit i relativně velké množství chyb (a tím zajistit provozuschopnost sítě). Vysoký důraz je proto kladen na směrovací protokol, který musí zajistit alternativní cesty sítí pro doručení paketů v případě selhání některých síťových zařízení na původní trase.

3.2.2 Škálovatelnost

Senzorové sítě se liší počtem uzlů od několika kusů až po několik set tisíc. Také plošná hustota nasazení je různorodá. Snímání s vysokým rozlišením může vést k situaci,

kdy se ve vysílacím dosahu uzlu nachází až tisíce sousedů. Komunikační protokoly musí splňovat škálovatelnost až k takto extrémním úrovním při zachování adekvátního výkonu sítě.

3.2.3 Výrobní náklady

Protože některé plány na nasazení WSN počítají s uzly jako jednorázovým spotřebním materiálem, jedinou možností jak konkurovat klasickým drátovým sítím jsou nízké výrobní náklady na sensorové jednotky. Koncová cena drobných jednorázových uzlů by se měla pohybovat (a u některých typů uzlů pohybuje) do 5 \$.

3.2.4 Hardwarová omezení

Minimální konstrukce sensorového uzlu obsahuje snímací jednotku, výpočetní jádro, vysílač a baterii. Případně může uzel obsahovat vestavěné senzory nebo lokalizační čip. Každá další funkce ovšem zvyšuje energetickou náročnost, rozměry a cenu jednotky, proto musí být pečlivě zvažována.

3.2.5 Síťová topologie

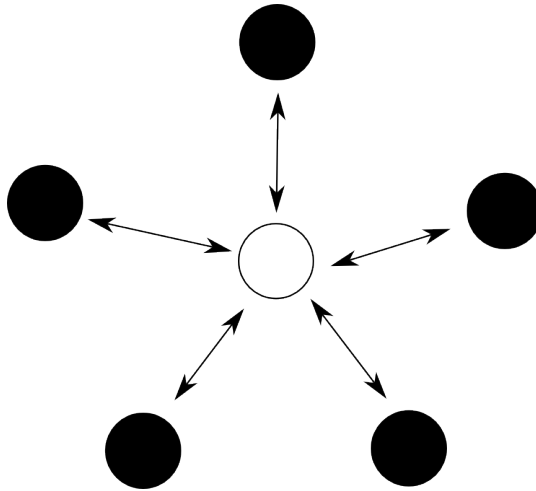
Vhodně navržená topologie může pozitivně ovlivnit energetickou spotřebu zařízení v síti, je jí proto věnována značná pozornost ze strany výzkumných institucí. Nasazená topologie se liší podle aplikace: někdy stačí, aby uzly pouze posílaly data do sběrného místa, jindy jsou uzly zodpovědné i za předávání informací od sousedních, které nemají sběrné místo v dosahu vysílače. Nejčastějšími topologiemi jsou:

- **Topologie typu Star**

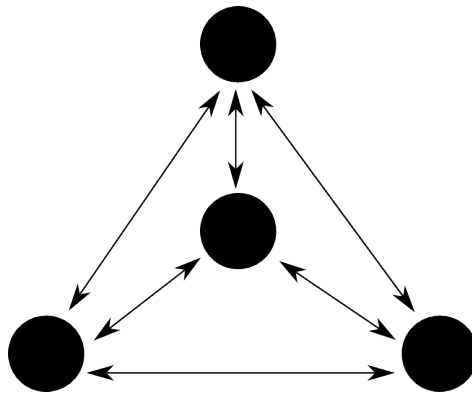
V síti s topologií star (hvězda) se nachází jedna základna, která může vysílat a přijímat data od vzdálených uzlů. Uzlům není dovoleno komunikovat mezi sebou. Výhodou takové organizace bezdrátové sítě je jednoduchost zasíťování a možnost minimalizovat spotřebu energie jednotlivých uzlů. Také umožňuje dosáhnout nižší latence komunikace mezi uzly a základnou. Nevýhodou je nutnost umístit základnu v rádiovém dosahu všech rozmístěných uzlů. Síť není příliš robustní, neboť správa veškeré komunikace je závislá na funkčnosti jediného uzlu – základny. Topologie je naznačena na obrázku 3.2.

- **Topologie typu Mesh**

V síti s topologií mesh (česky bývá označována smyčková) komunikují uzly se všemi ostatními v rádiovém dosahu. Tím je umožněna takzvaná multi-hop (více-skoková) komunikace. To v praxi znamená, že pokud uzel komunikuje s uzlem mimo dosah, může využít uzly na cestě k přeposílání zprávy. Mesh topologie (na obr. 3.3) má výhodu škálovatelnosti a redundance. Pokud některý z uzlů selže, ostatní uzly stále mohou komunikovat, čímž je zvýšena šance, že data budou doručena. Rozsah sítě není omezen dosahem jednotlivých uzlů, může být rozšířen přidáním dalších. Nevýhodou je vyšší spotřeba energie, způsobená podporou multi-hop komunikace. Zároveň se zvyšujícím se



Obrázek 3.2: Topologie typu Star



Obrázek 3.3: Topologie typu Mesh

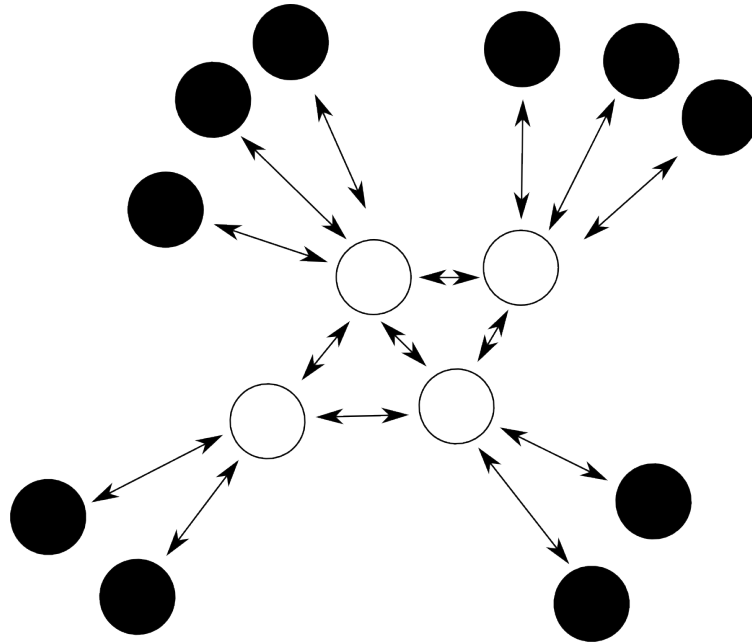
počtem skoků mezi zdrojem dat a cílovou stanicí se zvyšuje čas potřebný k doručení.

- **Hybridní topologie Star-Mesh**

Míšenec mezi topologiemi star a mesh nabízí robustní a adaptivní síť při zachování nízké spotřeby energie sensorových uzlů. V této topologii není umožněno koncovým uzlům přeposílat zprávy, čímž je dodržen požadavek na nízkou spotřebu. Síť však obsahuje i uzly se schopností multi-hop komunikace, které mohou přeposílat zprávy od koncových uzlů ostatním zařízením v síti. Struktura sítě je naznačena na obr. 3.4.

3.2.6 Nosné médium

Komunikace mezi uzly zpravidla probíhá v některém ISM pásmu (2.4 GHz, 5.8 GHz). V závislosti na aplikaci lze ovšem využít i optickou a infračervenou komunikaci, které jsou odolné vůči některým typům rušení. Pro větší odolnost vůči chybám byly vyvinuty i metody rozšíření spektra. Nejvýznamnějšími jsou [16]:



Obrázek 3.4: Hybridní topologie Star-Mesh

- **Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS)**, česky spektrum rozšířené frekvenčními přeskoky. Zařízení střídá před každým vysláním kanály v pseudonáhodném pořadí, aby byla zvýšena pravděpodobnost doručení i přes rušení v prostředí. Rozlišují se rychlé (během vysílání bitu) a pomalé přeskoky (vždy až po několika odeslaných bitech). Přeskoky se dějí 2 až 20 krát za sekundu.
- **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)** – spektrum rozšířené přímou sekvencí. Přenášené bity jsou nahrazeny delšími pseudonáhodnými sekvencemi. Zpráva po takové úpravě zabírá širší část přenosového spektra a tím je zvýšena pravděpodobnost doručení. Data se navíc při odposlechu jeví jako šum, jsou tedy lépe zabezpečena.

3.2.7 Spotřeba energie

Jak již bylo několikrát zmíněno, mnoho problémů, řešených při návrhu senzorových uzlů, se týká omezených zdrojů energie. Velikost uzlu velmi omezuje kapacitu baterie. Návrh softwaru a hardwaru musí dbát na prvním místě na spotřebu. Například kompresní algoritmy mohou snížit spotřebu při vysílání, ovšem spotřebují další energii na výpočty. Spotřeba také závisí na aplikaci: některé vyžadují současný běh všech uzlů, u jiných lze nepoužívané uzly vypínat.

3.3 Protokoly

Bezdrátové senzorové sítě podléhají standardům, odvozeným od norem pro bezdrátové sítě IEEE 802.11 (zmiňované například v kapitole 2.2.3). Kromě standardů

Norma	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Marketingové jméno	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Typ sítě	WLAN	PAN	WSN
Aplikační zaměření	Podnikové aplikace (data a VoIP telefonie)	Bezdrátové přislouženství k PC	Monitorování systémů
Rychlost [Mbps]	11 – 54	24	0.02 – 0.25
Dosah vysílače [m]	100	20	50

Tabulka 3.1: Srovnání IEEE standardů pro bezdrátové sítě

spravovaných skupinou IEEE, týkajících se především přístupu k fyzickému médiu, vznikly pro účely sensorových sítí komerční protokoly popisující síťové vrstvy. Nejvýznamnější z obou kategorií zde budou popsány.

Standardy IEEE

Skupina IEEE je mezinárodní organizace elektrotechnických inženýrů. Usiluje o rozvoj a šíření technologií. Jednou z jejích činností je správa standardů. Pro místní LAN sítě je vyhrazena skupina IEEE 802. Podskupina IEEE 802.11 pak popisuje bezdrátové místní sítě (WLAN), IEEE 802.15 sítě menšího rozsahu [30]. Poslední dvě zmiňované normy (802.11 a 802.15) jsou často implementovány v bezdrátových sensorových sítích. Norma 802.15 je dále členěna na podskupiny, z nichž významné jsou 802.15.1 s komerčním názvem Bluetooth a 802.15.4 určená přímo pro sensorové sítě (WSN). Srovnání zmiňovaných norem je uvedeno v tabulce 3.1.

Volba použité normy pro přístup k fyzickému médiu (elektromagnetickým vlnám) závisí na aplikaci.

IEEE 802.11 je nasazována na aplikace vyžadující vysoký datový tok a rychlou odezvu. Kvalita, rychlost a dosah připojení jsou ovšem vykoupeny vysokou spotřebou energie. Uzly jsou schopny komunikovat na vzdálenosti desítek metrů s datovým tokem až 4 Mbps, ovšem výdrž na baterii se počítá v řádech hodin.

IEEE 802.15.4 je určená pro dlouhodobé snímání provozních veličin (např. tlak, teplota, vlhkost, světlo). Datový tok ani odezva nijak neohromí, síť však vydrží fungovat na baterie měsíce až roky. Dosah vysílačů se pohybuje v řádech desítek metrů. Standard je vhodný pro velké skupiny malých jednorázových sensorů pro monitoring továren a domácností. Nad touto normou je vybudován síťový standard ZigBee.

IEEE 802.15.1 – Bluetooth¹ nabízí větší datový tok oproti 802.15.4. Dosah Bluetooth sítí je do deseti metrů. Původně sloužil k připojování počítačových periferií, později se prosadil v periferiích k mobilním telefonům. Kvůli krátkému dosahu je oblíbený ve zdravotnictví a fitness aplikacích, kde není důvod vysílat dál, než několik metrů. Delší dosah by znamenal pouze zbytečné rušení a odposlouchávatelnost.

ZigBee

Aliance ZigBee je skupina společností, která vyvinula a udržuje stejnojmennou specifikaci pro soubor vyšších komunikačních protokolů, postavených na základech IEEE 802.15.4 [32]. Cílem technologie je dosáhnout co nejpříjemnější ceny pro koncového spotřebitele. Je určena pro aplikace vyžadující: dlouhou životnost baterie, zabezpečené připojení a není pro ně překážkou nízká přenosová rychlost. V první řadě příznivá cena přispívá k širokému nasazování v bezdrátovém řízení a monitorování. Zařízení ZigBee jsou velmi oblíbená i v domácí automatizaci.

Protokol umožňuje směrování, vyhledávání a komunikaci mezi uzly, podporuje topologie typu mesh, star a hybridní. Uzly sdílí společný kanál a frekvenci. Zařízení v síti jsou rozdělena do dvou tříd: na plně funkční a na zařízení s omezenou funkcí. Plně funkční utvářejí síť, omezená (koncové senzorové uzly) se mohou připojit.

Síť tvoří tři typy zařízení. Koordinátor spouští a řídí síť, shromažďuje informace o síti a funguje jako databáze bezpečnostních klíčů. Směrovač rozšiřuje rozsah sítě, dynamicky směřuje síť okolo překážek a poskytuje zálohu v případě selhání části sítě. Koncová zařízení jsou určena pro přijímání a vysílání zpráv, mohou být spojena se směrovačem nebo koordinátorem.

WirelessHART

WirelessHART je síťová technologie operující v ISM pásmu 2.4 GHz, které je kompatibilní s IEEE 802.15.4, a které má jako jediné z ISM pásem dostatek kanálů pro využití metod rozšířeného spektra FHSS a DSSS [19]. Technologie nabízí zpětnou kompatibilitu s protokolem HART (Highway Addressable Remote Transducer). Pro minimalizaci rušení mezi zařízeními využívá techniku TDMA (Time Division Multiple Access – mnohonásobný přístup oddělením v čase), která specifikuje chování prvků v komunikaci přidělením časových oken pro vysílání. K dispozici je také funkce CCA (Clear Channel Assessment – přidělení čistého kanálu), jež před každým vysláním změří aktivitu v síti a najde nejméně využívaný kanál. Pro předcházení interferencím s již známými sítěmi je k dispozici tzv. blacklist, černá listina kanálů, na kterých se nebude komunikovat.

Každé zařízení v síti funguje jako směrovač a je možné jej do sítě libovolně přidávat a zároveň jimi síť rozšiřovat. WirelessHART tedy implementuje topologii mesh.

Ve WirelessHART síti jsou tři klíčové komponenty. Výchozí brána pro zajišťuje spojení s vnější sítí rozhraním Modbus-Profibus-Ethernet. Síťový správce sestavuje

¹Jméno pochází od dánského krále Haralda Blaåtanda zvaného též "Modrý Zub" – Bluetooth. Ten v desátém století sjednotil skandinávské kmeny. Stejně tak i bezdrátový Bluetooth cílí na sjednocení komunikačních standardů počítačových periferií.

a dohlíží na síť, hledá optimální trasy mezi zařízeními a přiřazuje časové rámce. Bezpečností správce generuje, distribuuje a uchovává bezpečnostní šifrovací klíče.

ISA.100

ISA.100 je standard vytvořený společnostmi ISA (Instrumentation, System and Automation). Poskytuje jednotnou platformu pro ustanovení budoucích standardů bezdrátových systémů pro průmyslovou automatizaci a řídicí aplikace [19]. Nosnou myšlenkou je umožnit společný výskyt velkého množství sítí, spolehlivě plnících svěřené úkoly bez ohledu na to, zda jsou či nejsou založeny na stejném standardu. Architektura podporuje systémy, jejichž rozsah začíná u jednoduché, malé a izolované sítě až po soubory tisíců jednotek pokrývající několik čtverečních kilometrů. Protokol má v hlavičkách prázdné rámce pro budoucí využití a rámce vyhrazené pro značení verzí. Díky nim umožňuje další revize, optimalizaci a doplnění funkcionality. Podobně jako WirelessHART nabízí technologie FHSS, CCA a TDMA. Na rozdíl od ostatních protokolů jsou využívány hlavičky kompatibilní s 6LoWPAN².

3.3.1 Tabulkové srovnání protokolů

V tabulce 3.2 jsou stručně porovnány představené protokoly [21].

²6LoWPAN je standard pro aplikaci internetového protokolu IPv6 v malých a energeticky nenáročných zařízeních

Protokol	Standard & frekvenční pásmo	Popis	Výhody	Nevýhody
ZigBee	IEEE 802.15.4, ISM pásmo 2.4 Ghz a 900 MHz	Síťový standard typu mesh pro řízení a monitoring. Využíván v domácí automatizaci a řízení budov. Dosah do 50 metrů.	Levné, energeticky nenáročné a levné řešení pro malé sítě. Velice rozšířený standard.	Problémy s časováním při vyšším počtu zařízení.
WirelessHART	IEEE 802.15.4, ISM pásmo 2.4 Ghz	Standard podporovaný sdružením výrobců, vyvinutý na míru pro účely sledování a řízení. Síť typu mesh pro velký počet zařízení. Dosah do 30 metrů.	Navržen jako mezinárodní standard se základy v technologii HART, používané více než 30 let. Speciálně vytvořen pro průmyslové řízení	Nekompatibilní s některými existujícími drátovými protokoly (Fieldbus, Profibus). Do 250 uzlů v síti.
ISA.100	IEEE 802.15.4, ISM pásmo 2.4 Ghz	Standard vyvinutý skupinou výrobců pro spolehlivé a zabezpečené spojení v nekritickém řízení a sledování. Malý datový tok, malá spotřeba. Dosah až 600 metrů.	Může pojmout až 250 uzlů, obecně přijímaný standard, navržen pro průmyslové řízení. Dosah 600 metrů.	Nedostatečné rozšíření v průmyslu. Komunikuje s protokoly HART, Fieldbus, Modbus, Profibus.
Wi-Fi	IEEE 802.11a/b/g/n/ac ISM pásmo 2.4 GHz a 5GHz	Vyspělý bezdrátový protokol pro komerční využití. Dosah až 100 metrů.	Vyšší datový tok, vyspělý protokol, přímé připojení k internetu.	Vyšší spotřeba energie.
Bluetooth	IEEE 802.15.4, ISM pásmo 2.4 Ghz	Nahrazuje sériovou linku, Ethernet a USB na krátkých vzdálenostech (do 20 metrů)	Kompatibilita s množstvím spotřební elektroniky. Nízká cena, vysoký datový tok (do 24 Mbps).	Vyšší spotřeba než u 802.15.4 protokolů.

Tabulka 3.2: Srovnání protokolů pro bezdrátové sensorové sítě

3.4 Aplikace

Bezdrátové sensorové sítě si získaly značnou popularitu díky flexibilitě při řešení problémů v různých aplikacích. Mezi oblastí s nejvyšším zastoupením sensorových sítí patří:

Vojenství bylo od počátku hnací silou vývoje bezdrátových sensorových sítí. Bezdrátové senzory jsou často integrovány do zařízení pro velení operacím, rozvědku, dohled nad bitevním polem, průzkum a zaměřovací systémy.

Sledování oblastí: v aplikacích pro sledování a dohled nad oblastí jsou senzory nasazeny v rozlehlé oblasti, kde je potřeba sledovat určitý fenomén. Senzory buď pravidelně v dlouhých intervalech, případně při překročení limitní hodnoty, zpravují o stavu hlídané veličiny (zpravidla tlak, teplota) řídicí systém, který vykoná příčinnou reakci.

V *přepravě* shromažďují sensorové sítě informace o dopravě a v reálném čase je poskytují účastníkům dopravního provozu, službám pro řízení silničního provozu a výzkumným institucím pro zpřesnění dopravních modelů.

Zdravotnictví: Aplikace bezdrátových sensorových sítí ve zdravotnictví se týkají: podpůrných prostředků pro zdravotně postižené, monitorování životních funkcí pacientů, diagnostiky nemocí, správy medicínských zásob a kontroly pohybu lékařů i pacientů po nemocničních zařízeních.

Životní prostředí: aplikace bezdrátových sítí pro sledování životního prostředí nabýly v zámoří na takovém významu, že tato kategorie získala vlastní termín pro označení – Enviroment Sensor Networks (sensorové sítě pro dohled nad životním prostředím). Jsou nasazovány pro monitoring sopek, oceánů, ledovců a lesů. Oblastmi sledování jsou znečištění ovzduší, detekce lesních požárů, sledování vývoje skleníkových efektů, detekce tektonické aktivity.

Zemědělství: použití bezdrátových sensorových sítí umožňuje farmářům nepřetržitě dohlížet na chov či úrodu. Bezdrátové systémy pro krmení zvířete navíc snižují spotřebu vody a produkovaný odpad.

Údržba: sensorové sítě jsou v posledních letech oblastí zájmu mnohých firem kvůli sledování stavu a provozuschopnosti zařízení a včasným servisním zásahům. Cílem je snížit náklady na pravidelnou údržbu (ta je mnohdy předimenzovaná a díly jsou měněny v polovině životnosti) a zároveň ušetřit za případné opravy zařízení (pokud by byla údržba zanedbána a došlo k nehodě). Sensorové sítě v kombinaci s algoritmy prediktivní údržby dokáží upozornit na zhoršující se stav zařízení a nutnost servisního zásahu dřív, než dojde k poškození.

Kapitola 4

Bezdrátové senzorové jednotky V-Mon 4000

V předchozí kapitole byl představen koncept bezdrátových senzorových sítí. Komerčně dostupným zástupcem bezdrátové senzorové technologie je jednotka V-Mon 4000, které bude věnována tato kapitola.

4.1 Popis zařízení

Jednotku V-Mon 4000 (na obr. 4.1) vyvinula v rámci firma Inertia Technology projektu WiBRATE. Projekt WiBRATE si kladl za cíl vytvořit systém bezdrátových senzorových jednotek, schopných vykonávat tzv. energy harvesting (získávání elektrické energie z okolních vibrací), určených pro monitoring a analýzu vibrací strojů a budov [11]. Díky pokročilým algoritmům pro vyhodnocení snímaných vibrací šetří peníze za údržbu a servis zařízení zákazníkům z řad železničních, petrochemických a stavebních společností.

Jednotky V-Mon 4000 operují ve standardním ISM pásmu 2.4 GHz [12]. Přenosová rychlost dosahuje až 4 Mbps. Senzorový uzel nabízí 4 analogové vstupy a vestavěný 3D digitální akcelerometr typu MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Podporovaným typům senzorů a vestavěnému akcelerometru je věnována sekce 4.2.

Energie je dodávána vestavěným akumulátorem s kapacitou 2.6 Ah, který dokáže zajistit funkčnost na déle než osm hodin. Akumulátor lze nabíjet z USB portu (5 V) nebo libovolným jiným zdrojem o napětí 8 – 24 V. Jako výpočetní jádro slouží procesor ARM Cortex M4. Jednotky jsou chráněny před prachem a vlhkostí krytím IP67. Snímaná data mohou být zaznamenána přímo v bezdrátovém uzlu na paměťovou kartu, která zároveň slouží jako úložiště konfigurace uzlu.

Nastavení jednotlivých uzlů i celé sítě probíhá v přidruženém programu Inertia Studio. Ten nabízí kromě konfigurace také možnost vizualizace snímaných veličin v grafu, FFT (Fast Fourier Transform) analýzu dat, zaznamenávání měřených veličin na disk a informace o stavech uzlů (napětí baterie, síla signálu, procentuální ztrátovost dat, teplota uvnitř zařízení).

Síťový protokol FastMAC umožňuje komunikaci rychlostí až 4000 Mbps, frekvenci zasílání zpráv až 2000 Hz, synchronizaci uzlů s přesností pod 0.5 mikrosekundy. Topologie sítě je typu star. Základním prvkem sítě je bezdrátová brána (gateway), která přijímá data od jednotlivých uzlů a řídí komunikaci. Frekvenční pásmo 2.4 GHz



Obrázek 4.1: Bezdrátová senzorová jednotka V-Mon 4000

je rozděleno do šestnácti kanálů. Podle rychlosti vzorkovací frekvence (100 – 10000 Hz) může jedna brána obsloužit až 40 uzlů. Dosah sítě při maximálním vysílacím výkonu se pohybuje okolo třiceti metrů.

Připojení brány k PC je realizováno prostřednictvím USB nebo Ethernetu. USB komunikace nabízí veškerou funkčnost (předává naměřená data, konfiguraci sítě, stavové informace), vzhledem k povaze USB technologie však postrádá determinismus a způsobuje zpoždění (v řádech milisekund) při předávání dat do PC. Při komunikaci přes Ethernet jsou předávána pouze naměřená data formou raw socket paketů¹, což snižuje zpoždění způsobené přenosem dat mezi bránou a PC (jednotky mikrosekund).

4.2 Podporované typy senzorů

K senzorové jednotce V-Mon 4000 mohou být připojeny až čtyři analogové vstupy s napěťovým rozsahem 0 – 3.3 V, digitalizované s rozlišením 12 bitů. Navíc lze číst údaje z vestavěného akcelerometru. Tato sekce je věnována právě podporovaným senzorům.

4.2.1 Vestavěný 3D akcelerátor MEMS

Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), česky mikro-elektro-mechanické systémy, jsou systémy určené pro převod fyzikálních veličin na elektrický signál a naopak [4]. Na rozdíl od klasických senzorů a aktuátorů se velikosti jednotlivých součástí pohybují v řádech desítek mikrometrů. Elektronické a především mikro-mechanické

¹raw socket packets je zvláštní případ komunikace, při které není zapojen TCP/IP stack. Umožňují přímé odesílání a přijímání síťových paketů v aplikaci.

součástky jsou nanášeny na křemíkovou bázi za použití metod vycházejících z technologických postupů pro výrobu integrovaných obvodů [31].

Příkladem použití technologie MEMS jsou senzory pohybu (akcelerometry, gyroskopy), mikrofony, cívky, čočky a mechanické soustavy (mikročerpadla, mikropohony, mikropřevodovky).

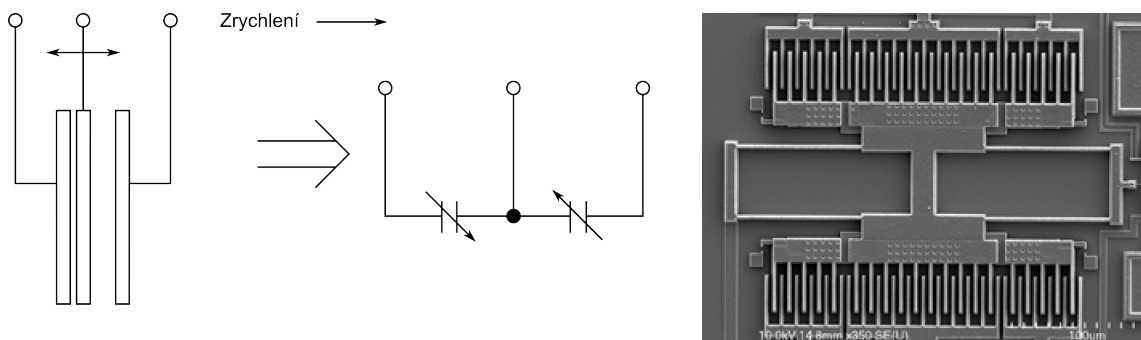
Technologie MEMS je úzce spjata s termínem "systém na čipu" (System on a Chip), jelikož se v součástce nachází zároveň část pro převod mechanické energie na elektrickou spolu se subsystémem pro zpracování získaného signálu.

MEMS Akcelerometry jsou přístroje pro měření zrychlení, vyvolaného působící silou. Struktura a funkce je založena na proměnné kapacitě tříelektrodového vzduchového kondenzátoru. Využívá se zde známé nelineární závislosti kapacity C na vzdálenosti elektrod kondenzátoru d (velikost vzduchové mezery) podle vzorce:

$$C = \frac{\epsilon S}{d}, \quad (4.1)$$

kde ϵ je konstanta permitivity, S plocha elektrod.

V případě MEMS akcelerometru je jedna z elektrod pevně ukotvena, druhá je součástí pohyblivého tělesa pružně svázaného se soustavou. Pohyb soustavy způsobí vychýlení pohyblivého tělesa a změnu kapacity kondenzátoru. Struktura a zjednodušený princip je znázorněn na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Princip a struktura MEMS akcelerometru

MEMS akcelerometry jsou v současné době nejvyužívanějším typem akcelerometrů kvůli jednoduchosti a nízké ceně. Velmi často je můžeme nalézt: v chytrých telefonech, kde slouží k detekci pohybu a ke zjištění orientace přístroje kvůli překlápění displeje, ve fitness příslušenství (krokoměry) a v zábavních aplikacích využívajících ovládání pohybem (např. zatřesením, švihnutím). Další oblastí uplatnění jsou laptopy, kde včasnou detekcí pádu zabraňují poškození pevných disků. Oblíbené jsou také jako součást stabilizačního mechanismu optických přístrojů.

Mezi průmyslové aplikace patří automobilový průmysl (senzorická část airbagů, detekce smyku), robotika a vojenství [27].

V jednotce V-Mon 4000 se nachází tříosý akcelerometr s rozsahem 2, 4, 8 nebo 16 G (vyšší nastavený rozsah znamená menší přesnost, proto lze zvolit) a maximální vzorkovací frekvencí 5000 Hz.

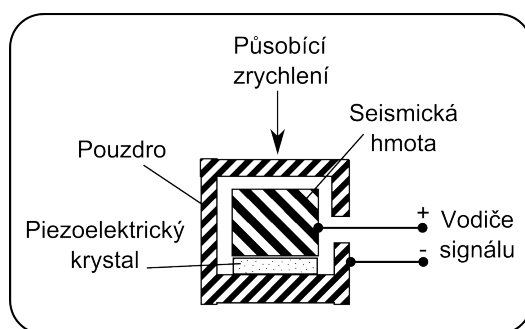
4.2.2 Piezoelektrické a IEPE/ICP akcelerometry

Jednou z předností jednotky V-Mon 4000 oproti jiným bezdrátovým sensorovým uzlům je podpora piezoelektrických akcelerometrů a akcelerometrů typu IEPE/ICP.

Klasické piezoelektrické akcelerometry se skládají z krystalu a seismické hmoty (obr. 4.3.). Při působení zrychlení naráží hmota do krystalu silou přímo úměrnou zrychlení a vyvolává drobné změny v rozložení iontů krystalu, které se projevují uvolněním nabitých částic. Vyprodukovaný náboj, který je přímo úměrný působící síle, je přiveden na kondenzátor, kde se projeví ve změně napětí podle vztahu:

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (4.2)$$

kde U je napětí, Q náboj na kondenzátoru a C kapacita kondenzátoru. Napětí je posléze zaznamenáno a vyhodnoceno.



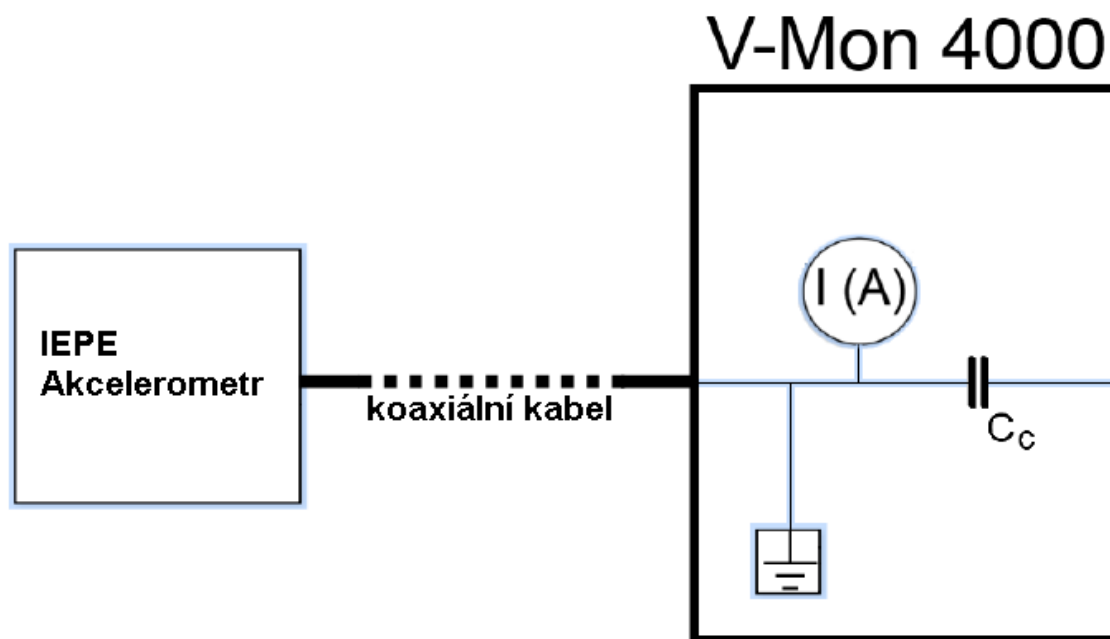
Obrázek 4.3: Piezoelektrický akcelerometr

IEPE je typ senzoru s vestavěnou elektronikou pro úpravu signálu. Označení vzniklo ze slov *Integrated Electronic Piezoelectric*. IEPE akcelerometry se skládají z piezoelektrického článku a integrovaného převodníku. Obvody v IEPE čidle jsou navrženy tak, aby při připojení ke zdroji konstantního proudu převáděly získaný náboj s vysokou impedancí na použitelný napěťový signál s malou impedancí, který lze snadno přenášet dvou vodičovým koaxiálním kabelem. V klidovém stavu při připojeném zdroji proudu lze na výstupu čidla naměřit pouze stejnosměrnou složku napětí. Při působení vibrací se začne měřená veličina (vibrace, zrychlení) projevovat jako střídavá složka napětí na výstupu čidla. Velikost střídavého napětí je přímo úměrná působené síle a je dána výrobcem čidla. Typické hodnoty citlivosti jsou 10 – 500 mV/g.

Jednotka V-Mon 4000 tedy dodává IEPE akcelerometru proud I a po stejném kabelu snímá napětí na senzoru. Stejnosměrná složka snímaného napětí je odstraněna na rozvazbujícím kondenzátoru C_c (schéma na obr. 4.4). Střídavá složka může být následně zesílena a je přivedena na A/D převodník.

Integrated Circuit-Piezoelectric (ICP) je obchodní značka společnosti PCB Piezotronics, Inc. používaná k označení IEPE zařízení. Vzhledem k širokému zastoupení senzorů této značky mezi akcelerometry bývají zkratky IEPE a ICP zaměňovány.

Jednotka V-Mon 4000 může poskytovat proud 0.1 – 5.4 mA, což je dostačující pro většinu akcelerometrů na trhu. Maximální výstupní napětí lze vybrat z rozmezí 9 – 23 V a je stejné pro všechny kanály. Signál z akcelerometru lze až desettisíckrát zesílit.



Obrázek 4.4: Schéma připojení jednotky V-Mon 4000 a IEPE akcelerometru

4.2.3 Napěťová čidla

Senzorový uzel V-Mon 4000 disponuje možností připojení čidel s napěťovým výstupem. Podporovaný rozsah je 0 – 3.3 V, převáděný do digitální podoby na převodníku s rozlišením 12 bitů. Při této konfiguraci je teoretické rozlišení:

$$Res = \frac{3300}{4096} = 0.805mV/bit \quad (4.3)$$

Napěťová čidla jsou častým elementem v řídicích a automatizačních systémech. Slouží pro snímání teploty, tlaku, vlhkosti, průtoku, chemického složení, hustoty, polohy a síly. Standardní unifikovaný výstupní signál je buď ± 10 V nebo 0 – 10 V. Sensorová jednotka není s tímto standardem plně kompatibilní, lze však využít určitou část měřicího rozsahu.

4.2.4 Pasivní odporová čidla

Pasivní odporová čidla reagují na změnu snímané veličiny změnou svého odporu. Typickými zástupci jsou odporová čidla teploty, potenciometrická čidla vzdálenosti a odporové tenzometr (pro měření mechanického napětí). Jejich velkou výhodou je nízká cena a jednoduché nasazení. V-Mon 4000 slouží v měřicím obvodu jako zdroj konstantního proudu o velikosti 0.1 – 5.4 mA, snímanou veličinou je opět napětí. Vyhodnocení probíhá podle vztahu:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (4.4)$$

kde R je aktuální odpor, U měřené napětí a I konstantní proud.

4.3 Technická data

Zmiňované technické údaje o jednotce V-Mon 4000 [12] jsou pro přehlednost vypsány do tabulky 4.1.

Parametr	Hodnota	Komentář
Analogové vstupy		
Počet kanálů	4	
Režim snímání	IEPE, napětí, náboj, odpor	
Rozlišení	12 bitů	
Vzorkovací frekvence	10 kHz	Max. pro každý vstup
Vstupní napětí	0 – 3.3 V	
Vstupní napětí maximální	24 V	
Zesílení vstupu	1 – 10000	
Frekvence low pass filtru	100 – 10000 Hz	
Výstupní napětí	9 – 23 V	Pro IEPE
Výstupní proud	0.1 – 5.4 mA	Pro IEPE
Zabudovaný akcelerometr		
Rozsah	± 2,4,8,16 g	
Vzorkovací frekvence	5000 Hz	Max.
Bezdrátová komunikace		
Frekvenční pásmo	2.4 GHz	
Datový tok	4 Mbps	Max.
Dosah	30 m	Při max. výkonu
Processing		
Procesorová jednotka	ARM Cortex M4	
Konektivita		
Analogové vstupy	M5 konektor	
Externí napájení USB	5 V	
Externí napájení M5	8 – 24 V	
Datové spojení	Mini-USB konektor	
Elektrické charakteristiky		
Spotřeba	340 mW	Max. bez senzorů
Typ baterie	3.75 V Li-Ion	
Kapacita baterie	2.6 Ah	
Ostatní		
Rozměry	66x117x40 mm	Bez antény
Materiál	ABS plast	
IP krytí	IP67	

Tabulka 4.1: Technické údaje jednotky V-Mon 4000

Kapitola 5

Řídicí systém REX

Kapitola se zabývá představením řídicího systému REX, jeho částí a nástrojů pro tvorbu ovladačů ke vstupně výstupním hardwarovým modulům.

5.1 Popis systému REX

Řídicí systém REX je moderní platforma vyvíjená společností REX Controls s.r.o.. Slouží k pokročilému řízení technologických procesů, k regulaci systémů, pro průmyslovou automatizaci a v neposlední řadě i k řízení pohybu robotických manipulátorů v reálném čase [26].

Jedna z významných myšlenek je kompatibilita s nástroji Matlab a Simulink. Díky tomu je možné navržené algoritmy simulovat před jejich nasazením a tím šetřit prostředky při vývoji a minimalizovat riziko spojené s experimentálním návrhem řízení.

Pro návrh algoritmů řízení je k dispozici knihovna funkčních bloků RexLib s téměř 300 bloky určenými pro:

- Průmyslovou regulaci (**REG**):
PID regulátory s momentovým nebo reléovým auto-tunerem, fuzzy regulátory, funkce pro identifikaci systémů, stavový regulátor.
- Generování vstupních signálů (**GEN**):
Zdroje binárních sekvencí, po částech lineárních funkcí a periodických signálů (pila, obdélník, sinus).
- Kombinační a sekvenční logiku (**LOGIC**):
Logické operace, klopné obvody, automat pro sekvenční řízení, čítače, detekce hran.
- Zpracování analogových signálů (**ANALOG**):
Filtrace, průměrování, integrace, porovnávání, zpoždění, tvarovače signálu.
- Simulaci a modelování systémů (**MODEL**):
Stavové a diskrétní stavové modely, modely systémů prvního a druhého řádu s dopravním zpožděním.

- Matematické operace a práci s maticemi (**MATH, MODEL**):
Standardní matematické operace, funkce jedné a dvou proměnných, vyhodnocení polynomu, gradientní optimalizace.
- Řízení pohybu podle normy PLCopen (**MOTION**):
Bloky pro řízení jedné osy, synchronizovaný pohyb více os.
- Speciální bloky (**SPEC**):
Univerzální programovatelný blok REXLANG (kompatibilní s jazykem ST), bloky pro výměnu dat se vzdálenými systémy, volání externího programu.
- Bloky pro konfiguraci a vstupně-výstupní bloky (**EXEC, INOUT**):
Nastavení exekutivy reálného času, konfigurace modulů a ovladačů, archivy, práce s časem, vlajky pro zpřehlednění regulačních schémat.

Zmiňované bloky jsou k dispozici jako rozšiřující balíky pro Matlab/Simulink a LabView, navíc existuje jejich verze v jazyce Java pro tvorbu virtuálních laboratoří.

Nejdůležitější úlohu ovšem plní jako nativní součást systému REX na cílových platformách určených pro vlastní běh řídicího algoritmu. Podporované řídicí počítače a operační systémy jsou:

- PLC/PAC firmy ICPDAS WinCon-8000, WinPAC-8000 a ViewPAC-8000 s operačním systémem Windows CE.
- Průmyslové platformy MOXA, ALIX, Lanner LEC a Advantech ARK s operačním systémem GNU/Linux a real-time nadstavbou Xenomai.
- Malý jednodeskový počítač Raspberry Pi pro domácí automatizaci a kutily [24], operační systém Raspbian.
- Klasické stolní počítače s operačním systémem Windows (Vista, 7, 8) nebo linuxovou distribucí odvozenou od Debianu (Ubuntu, Linux Mint).

Řídicí algoritmy jsou definovány grafickým programovacím jazykem FBD (Function Block Diagram, schéma z funkčních bloků) v souladu s normou IEC 61131-3 pro programovatelné logické kontroléry. Programování je principiálně podobné vývoji simulačních schémat v nástroji Simulink, jež je vyučován v úvodních kurzech studia kybernetiky a řídicí techniky. Kompatibilní je i způsob ukládání do souborů typu *mdl*, proto může vývoj a ladění programu střídavě probíhat v REXu i Simulinku.

Řídicí programy ze souborů typu *mdl* jsou následně převedeny do binárního konfiguračního souboru a odeslány na cílové zařízení, které zajišťuje jejich realizaci.

Zařízení se systémem REX lze tedy rozdělit do dvou skupin:

- **Target** – cílová část. Jedná se o zařízení, na kterém běží vlastní řídicí algoritmus, které shromažďuje informace, provádí výpočty a interaguje se svým okolím.
- **Host** je část, sloužící pro vývoj algoritmů a jejich překlad do binární podoby. Následně jsou algoritmy odeslány na cílové (target) zařízení. Host část je také určena pro diagnostiku a zásahy do algoritmu na cílovém zařízení.

Platformy nemusí být striktně odděleny, vývoj i realizace programu může probíhat na stejném zařízení.

Komunikace mezi řídicím systémem a programem pro diagnostiku je založená na TCP/IP diagnostickém protokolu. Ke spojení s operátorským rozhraním (Human Machine Interface, HMI) je implementován standard OPC pro předávání dat mezi průmyslovými kontroléry různých výrobců v reálném čase. Dalším podporovaným typem komunikace s HMI je WebSocket technologie pro přenos informací do webového prohlížeče. Díky těmto protokolům existuje možnost vytvářet různé formy ovládacích rozhraní a to jak ve formě tlustého klienta – specializovaného programu například v jazyce Java nebo C#, tak i jako tenkého klienta – speciální webové stránky interpretované v prohlížeči.

Z komunikačních sběrnic pro předávání dat s průmyslovými vstupně-výstupními moduly, čidly a akčními členy jsou implementovány protokoly Ethernet POWER-LINK, EtherCAT, CAN, Modbus a 1-Wire.

Specialitou je možnost vygenerovat z poskládaného graficky navrženého algoritmu zdrojový kód v jazyku C, jež může být následně zařazen do firmware zařízení pro vestavěné (embedded) řízení.

Řídicí systém REX byl úspěšně nasazen v projektech pro:

- **Automobilový průmysl:** experimentální přípravky pro testování brzdového systému, klimatizací, vůle v řadicím mechanismu a řídicích tyčích
- **Energetiku:** experimentální jaderný reaktor, řízení parní turbíny, řízení kotle
- **Řízení speciálních strojů a manipulátorů:** mykací stroj, tryskový stav, nanášení tenkých vrstev zirkonu, ustavování klikových hřídelí
- **Laboratorní modely:** stabilizace inverzního kyvadla, stabilizace míče na špičce jehly

Jedná se o aplikace vyžadující vysokou spolehlivost, robustnost a stabilitu řídicího systému. V mnohých případech je potřeba dosahovat vysoké frekvence vyhodnocení algoritmu (až několikrát za milisekundu) při dodržení pevně stanovené periody vykonávání řídicího programu. Na takto náročných aplikacích demonstruje řídicí systém REX svojí sílu porovnatelnou s nejdražšími produkty na trhu s řídicími systémy.

5.2 Součásti systému REX

Řídicí systém REX se skládá ze sady nástrojů, které slouží pro návrh, realizaci a diagnostiku řídicích algoritmů a dohromady tvoří komplexní řídicí systém. Strukturu řídicího systému znázorňuje obrázek 5.1.

5.2.1 RexDraw

Řídicí programy jsou sestavovány z funkčních bloků v aplikaci RexDraw. Každý řídicí program se skládá z minimálně dvou souborů. V hlavním souboru (exekutivě)

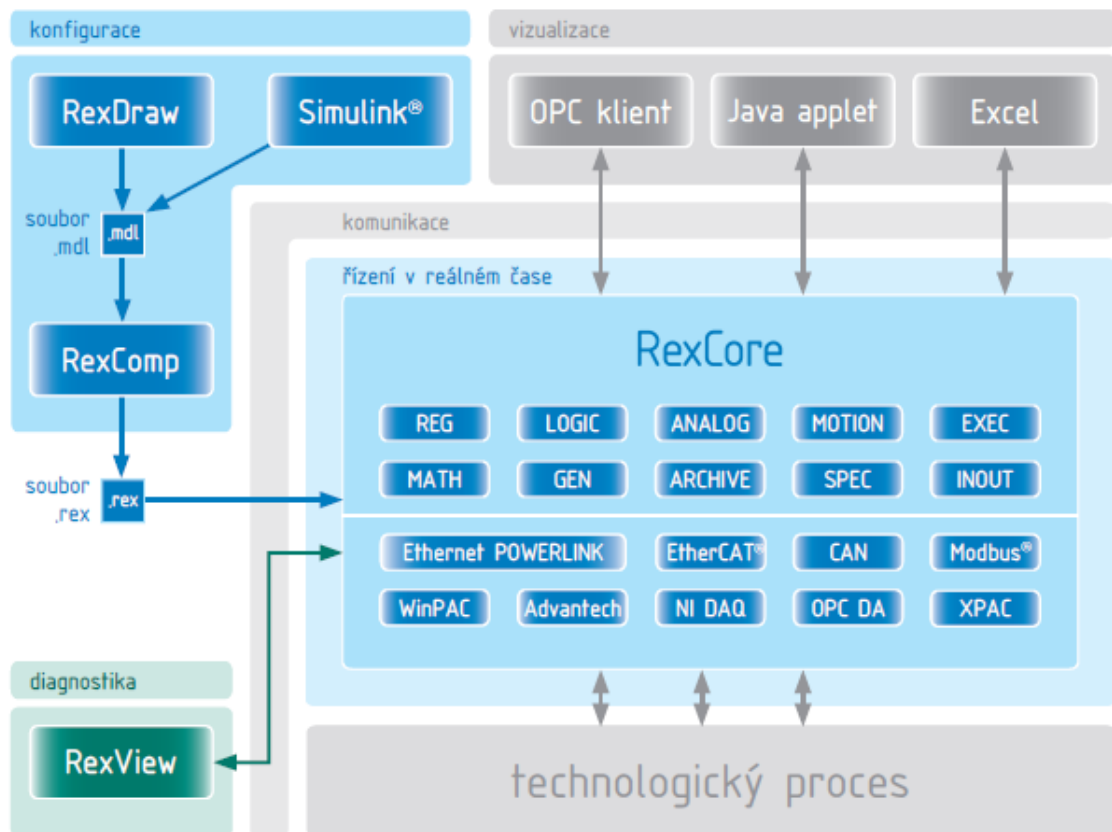
jsou nadefinovány použité moduly, ovladače, hierarchie úloh a parametry aplikace (cílový operační systém, periody vykonávání jednotlivých úrovní, priority).

V dalších souborech jsou uloženy konkrétní podoby jednotlivých úloh (task). Úlohy jsou poskládané z funkčních bloků, jejichž konkrétní výčet lze nalézt v [23]. Funkční bloky lze pro přehlednost skládat do subsystémů. Úlohy si mohou mezi sebou vyměňovat data prostřednictvím vstupně-výstupních vlajek.

Mimo to RexDraw nabízí možnost připojit se na algoritmus v cílovém zařízení a monitorovat stav vstupů, výstupů a parametrů bloků. Další zajímavou vlastností je možnost vygenerovat z navrženého algoritmu interaktivní SVG (Scalable Vector Graphics – škálovatelná vektorová grafika), které umožňuje po otevření ve webovém prohlížeči ovládat běžící řídicí program.

5.2.2 RexComp

RexComp překládá na základě hlavního souboru projektu navržený program do binární konfigurační podoby, interpretované na cílovém zařízení. Během kompilace jsou zjišťovány a vypisovány chyby a varování. V případě, že je objevena kritická chyba, překladač se ukončí a nevytvoří binární konfigurační soubor. Překlad je možné spouštět přímo při návrhu v RexDraw.



Obrázek 5.1: Struktura řídicího systému REX (www.rexcontrols.cz/rex)

5.2.3 RexCore

Program RexCore je určen pro běh na cílovém zařízení (průmyslovém PC nebo PLC). Jedná se o program realizující navržený algoritmus řízení na základě priorit v režimu preemptivního multitaskingu.

5.2.4 RexView

Běžící řídicí algoritmus lze diagnostikovat programem RexView. Program poskytuje hierarchicky uspořádané detailní informace o stavu všech bloků, úloh, ovladačů a modulů. Připojení je uskutečňováno protokolem TCP/IP, proto je možné diagnostikovat běžící jádro na lokálním počítači, v místní síti i prostřednictvím internetu.

5.2.5 Další nástroje

Kromě základních součástí se k systému REX váže řada dalších produktů. Nejzajímavější jsou:

SFC editor slouží pro návrh řídicích algoritmů pro sekvenční logické řízení. Tento nástroj implementuje další z jazyků normy IEC 61131-3, a to grafický jazyk SFC (Sequential Function Chart). Editor byl primárně navržen pro podporu bloků **ATMT** a **EATMT**, bloků pro realizaci konečného automatu. Bloky **ATMT** a **EATMT** interpretují tabulku přechodů, která je SFC editorem ze schématu generována. Navíc je tu možnost SFC schéma exportovat do grafického formátu svg nebo vytisknout.

RexHMI Inkscape je nástavba ke grafickému editoru Inkscape. Sada nástrojů umožňuje sestavovat z připravené knihovny interaktivních komponent uživatelské rozhraní, které je následně vygenerováno jako webová stránka. Po otevření ve webovém prohlížeči se rozhraní připojí k řídicímu algoritmu a umožňuje operátorovi sledovat a zasahovat do řídicího algoritmu.

5.3 Tvorba ovladačů systému REX

Aby mohl řídicí systém REX interagovat s vnějším prostředím, musí být jeho součástí příslušný ovladač, zajišťující spojení mezi jádrem RexCore a vstupně-výstupním zařízením [22]. Ovladač systému REX je tedy unifikované rozhraní zajišťující správnou komunikaci prostřednictvím jasně vymezených funkcí (zejména *Read* a *Write*).

Stejně jako systém REX rozlišuje target a host platformu, jsou i funkce ovladače rozdělené do dvou skupin podle platformy. Ve vývojové (host) části je nutné zejména nakonfigurovat ovladač a správně interpretovat jaká data si přeje uživatel číst na základě parametrů vstupně-výstupních bloků v řídicím schématu. Cílová část zajišťuje čtení a zápis dat do a z řídicího jádra, správnou inicializaci a zavírání ovladače, případně i běh vlastní úlohy ovladače (pokud je definována). Schématické zobrazení částí ovladače a jejich funkcí je na obrázku 5.2.

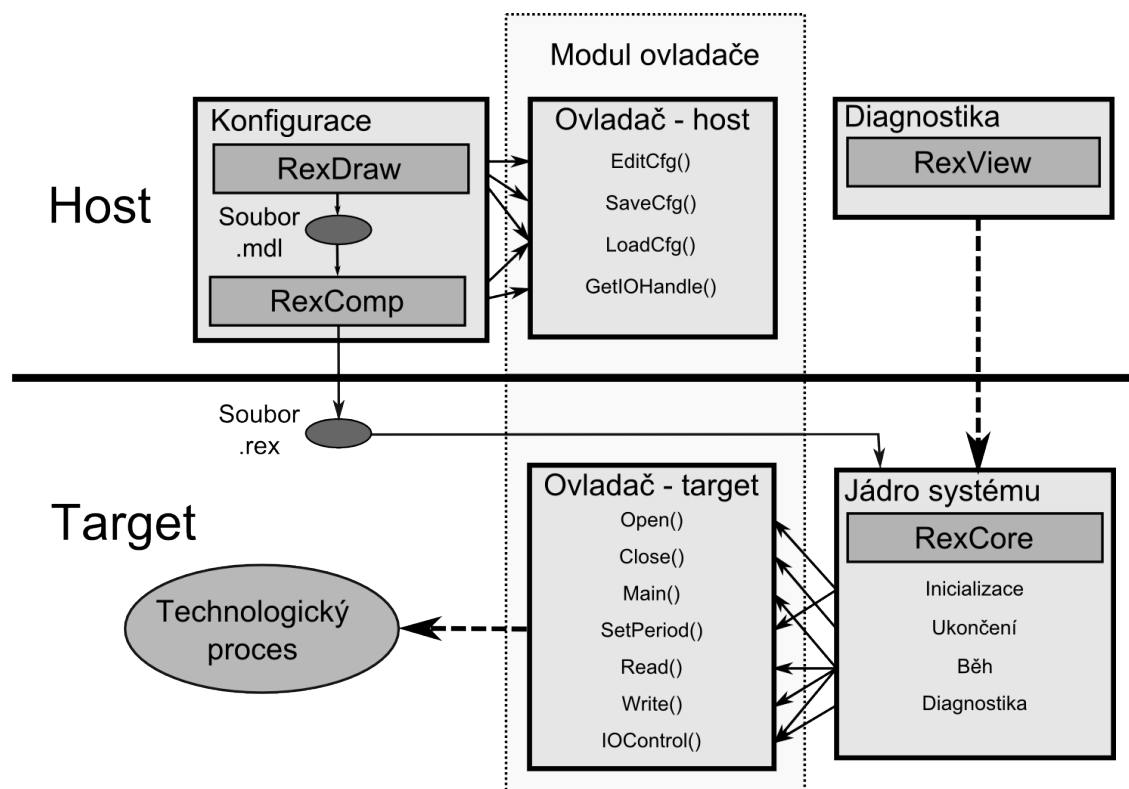
5.3.1 Rozhraní modulů systému REX

Ovladače jsou do řídicího systému REX vkládány prostřednictvím knihoven (na Windows soubory typu *dll*, pro GNU/Linux typ *so*). Tyto knihovny jsou označovány jako moduly. V každém modulu může být jeden nebo více ovladačů. Modul systému REX zveřejňuje dvě globální funkce:

- **GetModuleVersion()** – Funkce vrací v návratovém parametru verzi modulu a zároveň porovnává verzi modulu s verzí řídicího systému. Pokud nejsou verze kompatibilní, vrací chybu. Funkce je systémem volána okamžitě po zavedení modulu do paměti. V případě, že volání vrátilo chybu, je zavedený modul z paměti uvolněn a tato chyba je dále vracena jako chyba řídicího systému REX.
- **RegisterModule()** – Po úspěšném zavedení modulu a úspěšném volání funkce *GetModuleVersion()* je volána funkce *RegisterModule()*, která má za úkol zaregistrovat do řídicího systému REX všechny třídy tak, aby je mohl systém REX nadále používat. V případě modulu ovladačů je v této funkci potřeba zaregistrovat všechny ovladače daného modulu.

5.3.2 Základní typy ovladačů a implementace

Ovladač systému REX je vždy součástí nějakého modulu. Vlastní ovladač je implementován třídou (class) v jazyku C++, odvozenou od základní třídy *XIODriver* přepsáním jeho virtuálních metod. Podle požadavků na ovladač lze rozlišit tři typy



Obrázek 5.2: Schéma ovladače systému REX

ovladačů:

Jednoduchý ovladač bez vlastní úlohy operačního systému je vhodný pro přímo připojená zařízení, z nichž lze přečíst a do nichž lze nastavit data za krátký čas (mikrosekundy). Pak lze čtení a zápis vykonávat přímo při volání jednotlivých úloh, což vede k nejrychlejší "obsluze" řízeného procesu (nevzniká další zpoždění). Tento způsob lze využít pro přímo připojené (zásuvné) karty nebo pro zařízení s velice rychlou komunikací.

Ovladač s vlastní úlohou operačního systému volíme, pokud čtení vstupů nebo nastavování výstupů je časově náročnější. Pak je pro čtení vstupů a nastavování výstupů realizováno v samostatné úloze operačního systému a je asynchronní vzhledem k běhu jednotlivých úloh. Výměna dat mezi zmíněnými úlohami probíhá přes sdílenou oblast paměti (cache) s využitím synchronizačních objektů (semaforů). Tento typ se hodí pro zařízení připojená pomocí komunikace (např. sériové linky).

Ovladač spouštějící úlohy řídicího systému je nejsložitější typ ovladače vhodný pro speciální účely jako je spouštění velmi rychlých úloh od externího přerušení.

5.3.3 Metody ovladače ve vývojovém prostředí

Pro vývojovou část ovladače je nutné implementovat tyto metody:

- **EditCfg()** – slouží pro konfiguraci ovladače a je volána z konfiguračního dialogu ovladače v programu RexDraw. Nejčastěji aktivuje nějaký nástroj pro interaktivní konfiguraci parametrů připojeného zařízení, komunikačních parametrů, vstupů a výstupů ovladače. Pro jednoduché ovladače může být tato funkce prázdná.
- **GetIOHandle()** – je volána při překladu konfigurace programem RexComp pro všechny vstupně-výstupní bloky. Kromě toho, že vrací jednoznačný identifikátor daného vstupu/výstupu (handle), musí pro každý signál nastavit jeho typ, který je použit pro typovou kontrolu připojovaných bloků. Handle nesmí být ukazatel do dynamicky alokované paměti, protože bude s velkou pravděpodobností alokována na cílovém zařízení jinak. Handle však může být index do pole vstupů, pokud je zaručeno, že všechny signály budou mít shodné indexy ve vývojovém i cílovém prostředí.
- **SaveCfg()** – ukládá konfiguraci vytvořenou ve funkci **EditCfg()**. Konfigurační soubor s příponou *rio* (Rex Input-Output) je umístěn ve stejném adresáři jako celá konfigurace aplikace systému REX.
- **LoadCfg()** – znovu načte uloženou konfiguraci do konfiguračního dialogu. Pokud vrátí chybu, je uživatel dotázán na vytvoření nového konfiguračního souboru.
- **GetIODrvStatus()** – vrací textový řetězec odpovídající číselnému kódu stavu ovladače (zejména chyby). Funkce je volána z programu RexView pro výpis stavu ovladače.

5.3.4 Metody ovladače v cílovém prostředí

Pro cílovou část ovladače je nutné implementovat tyto metody:

- **Open()** – slouží pro otevření (inicializaci) ovladače. Je volána při inicializaci exekutivy ještě před inicializací řídicích úloh. Typické úlohy funkce **Open()** jsou navázání komunikace, alokace paměti a počáteční nastavení vstupů a výstupů.
- **Close()** – zavírá (ukončuje) činnost ovladače. Je volána až po ukončení řídicích úloh. Jedná se o protiklad funkce **Open()**, ukončuje komunikaci, uvolňuje alokovanou paměť.
- **Main()** – je funkce pro periodickou činnost ovladače během jeho životnosti. Je pravidelně volána exekutivou reálného času a slouží např. pro vlastní komunikaci vstupů a výstupů. Pro ovladače bez vlastní úlohy operačního systému se neimplementuje.
- **SetPeriod()** – je volána pro každý použitý vstup a výstup ovladače při inicializaci. Ovladač pomocí této funkce získá informace o periodě, se kterou je daný signál měřen/nastavován a podle toho může optimalizovat periodu čtení/nastavování signálu do vstupně-výstupního zařízení.
- **Read()** – čte vstupy z ovladače. V případě ovladače bez vlastní úlohy operačního systému musí funkce přečíst vstupy ze vstupního zařízení, v ostatních případech předává hodnoty z vyrovnávací paměti (cache).
- **Write()** – zapisuje výstupy do ovladače. V případě ovladače bez vlastní úlohy operačního systému musí funkce zapsat hodnoty do vstupního zařízení, v ostatních případech předává hodnoty jen do vyrovnávací paměti (cache).
- **IOControl()** – slouží pro speciální účely, které nelze řešit žádnou ze standardních funkcí ovladače, např. zjištění konfigurace cílového zařízení, rekonfigurace ovladače za běhu. Funkci lze volat vzdáleně z programu RexDraw. Program RexDraw nejprve zavolá funkci **EditCfg()** pro konfiguraci parametrů volání funkce, pak pošle parametry do exekutivy reálného času, kde se s nimi zavolá funkce **IOControl()**. Po dobu volání se program dotazuje, zda je už funkce **IOControl()** ukončena a pokud ano, požádá o poslání výsledků.

5.3.5 Indikace stavu ovladače

Při běhu cílové (target) verze ovladače je vhodné poskytovat vizualizační úrovní informace o stavu ovladače. Systém REX tyto stavy zobrazuje v záložce ovladače v programu RexView. Indikace stavu ovladače je dvouúrovňová a sestává se z návratového kódu systému REX a uživatelského stavového kódu, který si definuje autor. Přiřazování stavu může probíhat ve všech volaných funkcích (**Open()**, **Main()**, **Close()**, **Read()**, **Write()**). Poté je volána funkce **SetDgnStatus()** s jediným parametrem, který může nabývat libovolný z chybových kódů systému, zpravidla však:

- **XR_IODRV_WARNING** je varování, že vznikla nějaká nefatální chyba. Ovladač však může alespoň omezeně fungovat.
- **XR_IODRV_ERROR** je vážná chyba ovladače. Pokud je tato chyba vrácena funkcí **Read()** nebo **Write()**, je ukončeno vykonávání úlohy. Tato chyba je používána v situacích, kdy ovladač nemůže vůbec fungovat.
- **XR_OK** signalizuje, že je ovladač v pořádku a případně že platnost předchozího varování nebo chyby skončila.

V případě trvání varování **XR_IODRV_WARNING** je v programu RexView zobrazeno varování, po ukončení varování se indikuje bezchybný provoz. Naproti tomu v případě chyby **XR_IODRV_ERROR** zůstává v programu RexView zobrazena první chyba vzniklá v ovladači. Tuto indikaci chyby lze smazat stisknutím tlačítka *Reset*.

Kapitola 6

Ovladač systému REX pro moduly V-Mon 4000

Jedním z cílů této práce bylo vyvinout ovladač pro předávání dat ze sensorového uzlu V-Mon 4000 do řídicího systému REX. Díky tomu bude možné dodávat údaje ze sensorů do řídicího programu prostřednictvím bezdrátové komunikace. Ovladač systému REX pro práci s jednotkami V-Mon 4000 dostal označení `VMonDrv` (V-Mon 4000 driver). Postup při návrhu a implementaci i výsledný ovladač jsou popsány v této kapitole.

6.1 Struktura ovladače

V sekci je popsána a rozebrána struktura ovladače. Pro lepší představu je na obr. 6.1 uvedena UML reprezentace ovladače `VMonDrv` a datové struktury pro ukládání snímaných dat `XVMON_DRV_NODE`. Vlastní implementace ovladače je rozdělena do několika souborů:

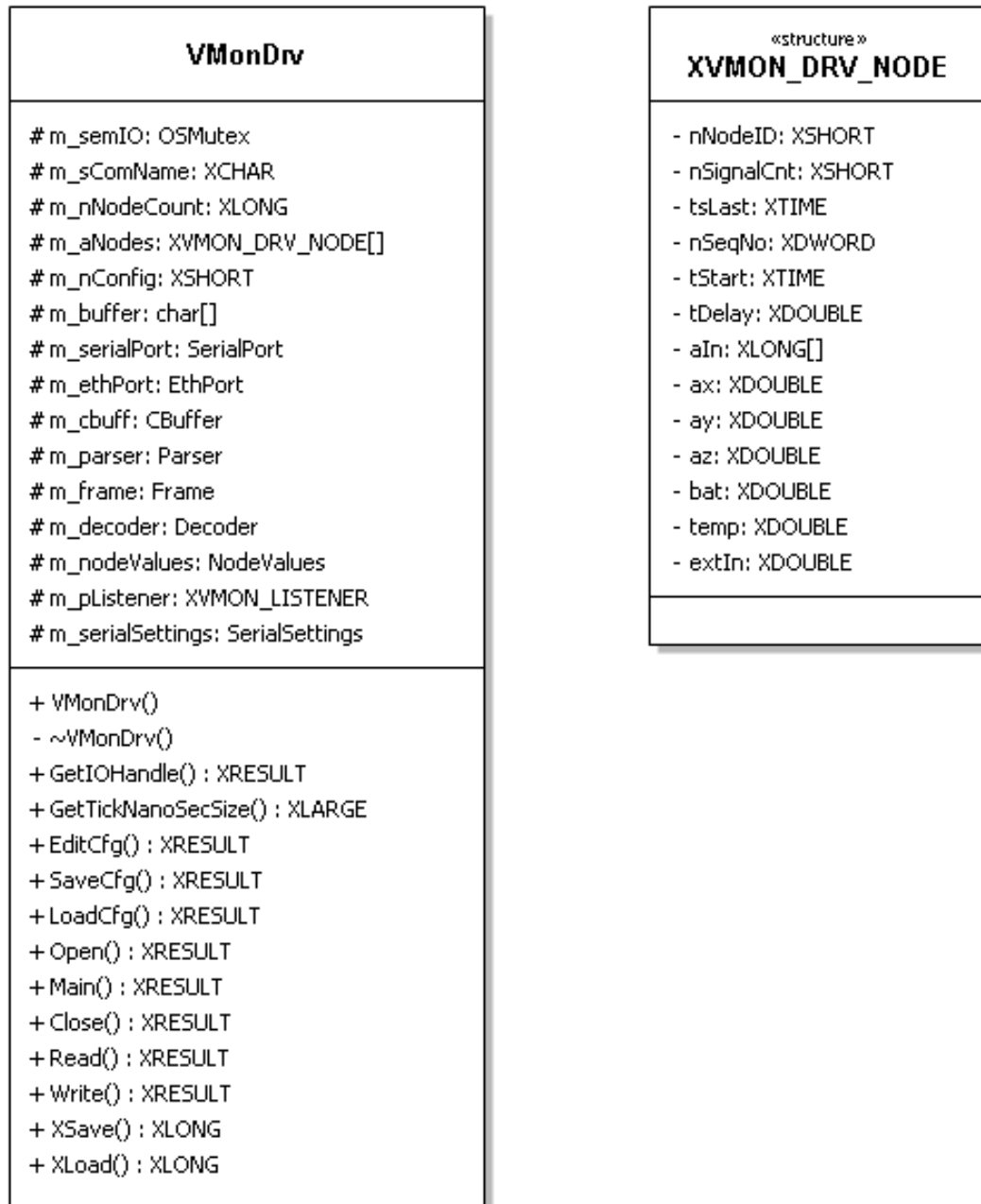
- `VMonDrv.h` – hlavička třídy ovladače, obsahuje všechny datové členy (prázdné) a prázdné virtuální metody.
- `VMonDrv.cpp` – implementace konstruktoru a metod společných pro cílový i vývojový počítač.
- `VMonDrv_T` – implementace metod pro cílový (target) počítač.
- `VMonDrv_H` – implementace metod pro vývojový (host) počítač.

6.1.1 Datové členy ovladače `VMonDrv`

Třída `VMonDrv`, definována v souboru `VMonDrv.h` obsahuje následující datové členy:

- `m_semIO` – semafor pro zamykání přístupu ke sdílené paměti během zápisu/čtení snímaných hodnot.
- `m_sComName` – jméno komunikačního portu.
- `m_nNodeCount` – počet aktivních uzlů.

- `m_aNodes` – pole datových struktur, reprezentujících uzlů. Struktura `XVMON_DRV_NODE` je popsána níže. Člen `m_aNodes` bude dále označován jako pole uzlů.
- `m_nConfig` – číslo konfigurace. Podporované konfigurace jsou popsány v sekci 6.4.
- `m_buffer` – pole znaků, slouží jako buffer pro čtení z média.
- `m_serialPort` – třída pro obsluhu sériové linky.



Obrázek 6.1: UML reprezentace ovladače VMonDrv

- `m_ethPort` – třída pro obsluhu Ethernet komunikace.
- `m_cbuff` – třída realizující cyklický buffer.
- `m_parser` – třída pro rozbor doručených paketů.
- `m_frame` – struktura pro ukládání rozebraných dat do rámců.
- `m_decoder` – třída pro dekodování rámců na naměřené hodnoty.
- `m_nodeValues` – struktura pro ukládání naměřených hodnot.
- `m_pListener` – třída pro odposlech komunikace, rozbor paketů a asynchronní volání přidružených funkcí.
- `m_serialSettings` – struktura nesoucí vlastnosti připojení po sériové lince.

Hodnoty datových členů jsou při inicializaci obecné třídy `VMonDrv` prázdné. K naplnění dojde později podle typu zařízení (`host/target`). Důležitá struktura je `XVMON_DRV_NODE` pro ukládání dat o uzlu s datovými členy:

- `nNodeID` – unikátní identifikační číslo uzlu přidělené výrobcem.
- `nSignalCnt` – počet aktivních signálů.
- `tsLast` – čas posledního přijatého vzorku.
- `nSeqNo` – číslo poslední přijaté sekvence.
- `tStart` – čas začátku komunikace (přijetí prvního paketu).
- `tDelay` – zpoždění mezi dvěma posledními pakety.
- `aIn` – pole pro ukládání hodnot měřených na analogových vstupech.
- `ax`, `ay`, `az` – hodnoty měřené interním MEMS akcelerometrem.
- `bat`, `temp`, `extIn` – stavové informace o napětí baterie, teplotě v přístroji a externím napájení.

6.1.2 Metody ovladače `VMonDrv`

Definice metod je rozdělena do více souborů podle typu zařízení, na kterém bude metoda využívána. To umožňuje překládat a kompilovat pouze ty části kódu, které jsou skutečně potřeba. Tím se snižuje množství souborů, na kterých je daná realizace ovladače závislá.

Soubor `VMonDrv.cpp` je společný pro všechny typy zařízení a jsou v něm definovány funkce pro ukládání parametrů ovladače do binárního konfiguračního souboru a jejich opětovnému načtení (`XLoad()` a `XSave()`) – metody jsou využívány při překládání schématu na vývojovém zařízení a zavádění programu do jádra na cílovém zařízení).

V souboru `VMonDrv_H.cpp` je implementována funkce `GetIOHandle()` pro získání takzvaného handle – jednoznačného identifikátoru pro přístup ke snímaným

hodnotám ze systému REX. Handle tvoří index uzlu v poli uzlů `m_aNodes` a číselný identifikátor signálu. Signály jsou popsány v sekci 6.3. Díky přítomnosti indexu uzlu v poli uzlů je umožněna rychlá obsluha čtení. Vzhledem k nízkému počtu parametrů ovladače nejsou implementovány metody pro konfiguraci (`EditCfg()`, `SaveCfg()` a `LoadCfg()`).

V souboru `VMonDrv_T.cpp` jsou implementovány funkce pro spuštění, běh a zavírání ovladače:

- `Open()` – spustí komunikaci na zvoleném kanále (sériová linka nebo Ethernet).
- `Main()` – v případě čtení příchozích dat třídou `SerialPort` nebo `EthPort` a jejich zpracování metodou popsanou v 6.2.2 jsou tyto kroky realizovány v této metodě. Při použití postupu 6.2.1 je tato metoda prázdná.
- `Close()` – zavírá komunikační port a uvolňuje jej dalším aplikacím.
- `Read()` – řeší poskytování dat řídicímu systému. Parametrem metody je takzvaný handle, na základě kterého je nalezen požadovaný signál v uzlu a hodnota signálu je předána zpět řídicímu systému REX.
- `Write()` – není implementována, neboť uzel V-Mon 4000 není opatřen žádnými výstupy. Z řídicího systému tedy není co zapisovat.

6.2 Možnosti získávání dat ze sensorových uzlů

Pro čtení a zpracování dat z výchozí brány (gateway) řídicím systémem REX lze využít dva přístupy. Prvním z nich je implementace aplikačního rozhraní, využitého v programu Inertia Studio. Toto rozhraní bylo dodáno ve formě binární knihovny *Inertia.dll* firmou Inertia Technology. Použití binární knihovny *Inertia.dll* je podmíněné přítomností knihovny Boost¹ pro jazyk C++, výhodou je ovšem snadná implementace – stačí přepsat funkci `Received()`, která je volána při doručení nového paketu.

Druhý přístup je nízkoúrovňový. Data jsou čtena přímo z ovladače hardwarového portu (USB nebo Ethernet) a ukládána do bufferu. Z bufferu jsou následně data zpracovávána podle dodaných specifikací komunikačního protokolu. Po zpracování jsou dekodované hodnoty předávány do sdílené paměti (cache). Z cache jsou dále čtena řídicím systémem REX.

6.2.1 Použití binární knihovny *Inertia.dll*

První implementace ovladače k sensorové jednotce V-Mon 4000 vycházela z připraveného aplikačního rozhraní, dodaného firmou Inertia Technology. Knihovna *Inertia.dll* zajišťuje všechny funkce pro zpracování dat v programu Inertia Studio, konkrétně:

- Obsluha sériového portu.
- Zaznamenávání dat (logging).

¹<http://www.boost.org/>

- Obsluha komunikačního protokolu.
- Práce s protokolem TCP/IP.

Obsluha komunikačního protokolu je složena z částí pro práci s:

- Konfigurací uzlů v síti a sítě samotné.
- Zabalení a posílání nasnímaných dat.
- Další příkazy pro uzly (práce s vnitřní flash pamětí, získávání stavových veličin) a synchronizaci.

Z hlediska ovladače systému REX je důležitá třída `StreamListener`. Třída umožňuje asynchronní volání metod:

- `Received()` – volána při přijetí jakéhokoliv paketu.
- `ReceivedCommand()` – volána při přijetí příkazu.
- `ReceivedConfig()` – volána při přijetí konfiguračního paketu.
- `ReceivedSample()` – volána při přijetí konfiguračního paketu.

Část ovladače `VMonDrv` pro běh na cílovém zařízení obsahuje třídu `XVMON_LISTENER`, oddělenou od třídy `StreamListener` s přepsanou metodou `Received()`.

Při spuštění ovladače `VMonDrv` na cílovém ovladači je otevřena komunikace na příslušném portu sériové linky (COM) podle nastavení ve struktuře `SerialSettings` a započne čtení dat třídou `XVMON_LISTENER`, která běží ve vlastním vláknu a je asynchronní vůči systému REX. Při přijetí vzorkovaných dat je zavolána funkce `Received()`, kde je nalezen patřičný sensorový uzel v poli uzlů `m_aNodes` podle unikátního ID a do jeho datové struktury jsou nahrány aktuální hodnoty signálů. Po celou dobu zápisu hodnot do datové struktury uzlu je čtení zakázáno semaforem `OSMutex`. Tím je sdílená část paměti ochráněna proti nepovoleným operacím.

6.2.2 Čtení z fyzického média, rozbor a zpracování podle specifikace protokolu

Pro nízkourovňový přístup ke čtení a zpracování dat ze sensorových jednotek V-Mon 4000 byla vyvinuta sada pomocných tříd, jejichž grafická reprezentace je na obrázku 6.4. Jsou to třídy:

- `SerialPort` – zajišťuje přístup, čtení a zápis dat do/ze sériového portu.
- `EthPort` – zajišťuje přístup a čtení dat z rozhraní Ethernet.
- `CBuffer` – realizace cyklického bufferu pro ukládání dat čtených ze sériové linky. Dokud není naplněna kapacita bufferu je možné do něj bez omezení vkládat a vybírat data, třída se stará o návaznost dat a správné indexování.
- `Parser` – rozebírá data z paketu a ukládá je do rámce, odpovídajícího popisu komunikačního protokolu.

- **Decoder** – dekóduje data v rámci a uloží je do struktury, reprezentující hodnoty uzlu.
- **NodeValues** – struktura pro ukládání dekódovaných dat. Datové členy proměnné odpovídají měřeným signálům, jež lze podle popisu protokolu dekódovat.

Při spuštění ovladače na cílovém zařízení je nejprve volána metoda `Open()`. V této metodě je otevřeno připojení ke komunikačnímu rozhraní (v závislosti na konfiguraci buď k sériovému portu – `SerialPort`, nebo k Ethernetu – `EthPort`) a v případě komunikace po sériové lince je vyslán inicializační paket, po kterém začne zařízení posílat data.

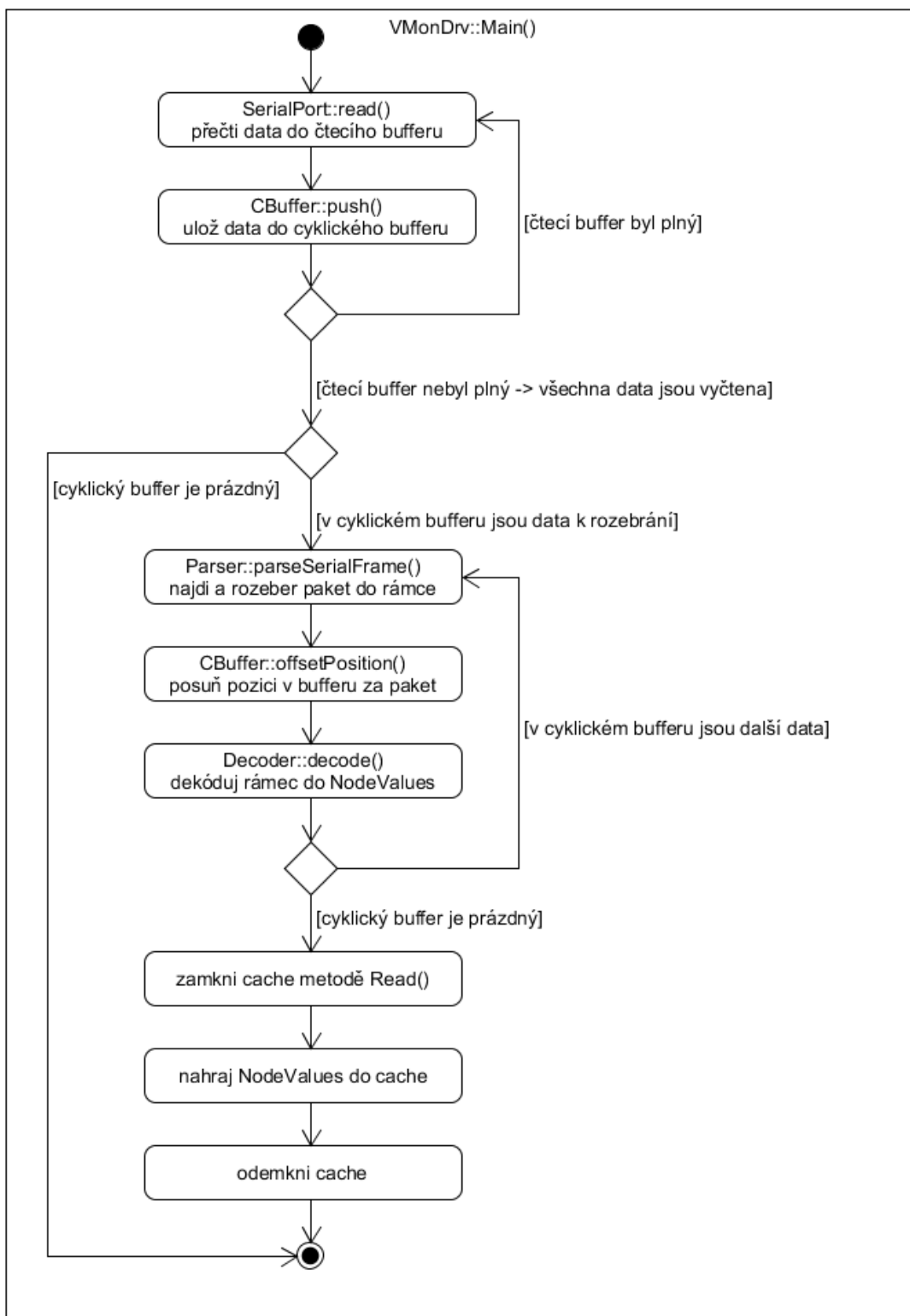
Během běhu řídicího algoritmu je pravidelně s nastavenou periodou volána metoda `Main()`. V této metodě je volen odlišný přístup pro práci se sériovou komunikací a komunikací prostřednictvím Ethernet paketů:

- Při čtení ze **sériové komunikace** třídou `SerialPort` jsou vždy předána všechna dostupná data do naplnění bufferu. Čtecí buffer je poté kopírován do cyklického bufferu s větší kapacitou. Při vyčtení všech dat (čtecí buffer není po skončení čtecí funkce zcela zaplněn) začne rozbor dat z cyklického bufferu. Třída `Parser` nalezne první úplný paket a zpracuje jej do rámce. Rámec je poté dekódován třídou `Decoder` do struktury `NodeValues`. Rozbor a dekódování dat pokračuje, dokud nejsou všechny pakety z cyklického bufferu vyčteny. Poslední hodnoty ve struktuře `NodeValues` jsou nahrány do sdílené paměti (cache) a volání metody `Main()` ovladače `VMonDrv` je ukončeno. Průběh metody je znázorněn v UML diagramu aktivit na obrázku 6.2.
- Komunikace prostřednictvím **Raw Ethernet paketů** třídou `EthPort` je jednodušší na zpracování, protože na každé volání funkce `Read()` třídy `EthPort` je vrácen jeden celý paket. Jeho zpracování do struktury `NodeValues` je pak totožné jako v případě dat ze sériové linky. Namísto vyčtení všech dostupných dat je zde zaveden časový limit na čekání na paket ve funkci `Read()` na 50 mikrosekund. Pokud paket nedorazí do limitu, jsou poslední hodnoty ze struktury `NodeValues` nahrány do sdílené paměti a volání metody `Main()` ovladače `VMonDrv` je ukončeno. Průběh metody je znázorněn v UML diagramu aktivit na obrázku 6.3.

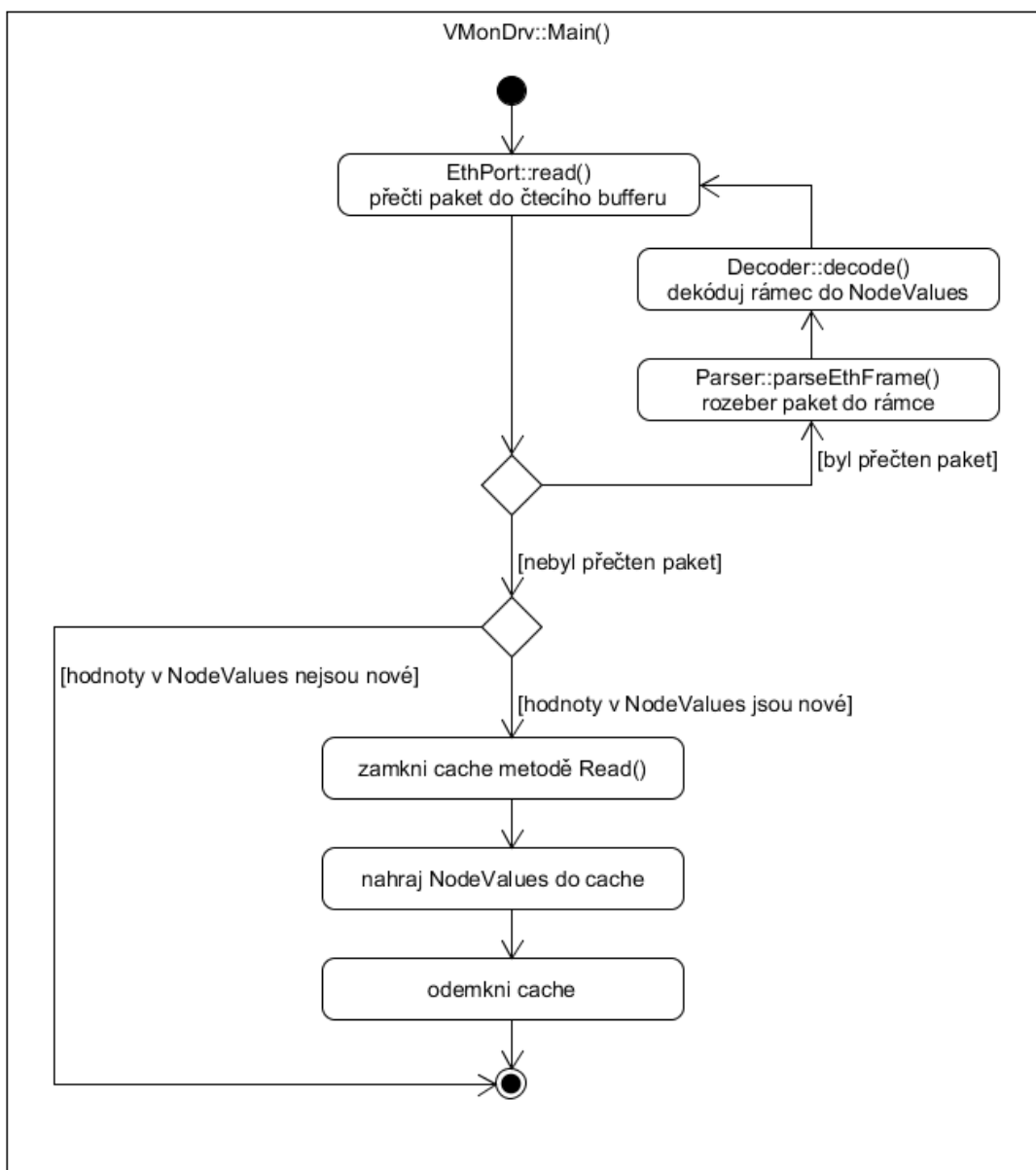
Nejdůležitější rozdíl tedy je ve struktuře dat získaných čtením z média. Při čtení ze sériové linky je vrácen požadovaný počet znaků (pokud je k dispozici více znaků než velikost čtecího bufferu), nebo všechny dostupné znaky. Čtecí funkce nerozlišuje začátky a konce zpráv, předává znaky bez ohledu na význam. Proto je nezbytný druhý zásobník, ve kterém je možné zprávy spojit, pokud by došlo k rozdělení do dvou čtecích bufferů. Vyčtení všech dat z média je indikováno přečtením menšího počtu znaků než je velikost bufferu.

Při použití ethernetové komunikace je při každém čtení vrácen jeden celý paket připravený pro rozebrání a dekódování. Po dekódování je znovu volána čtecí funkce. Vyčtení všech dat z média je indikováno čekáním delším než stanovený časový limit (50 mikrosekund).

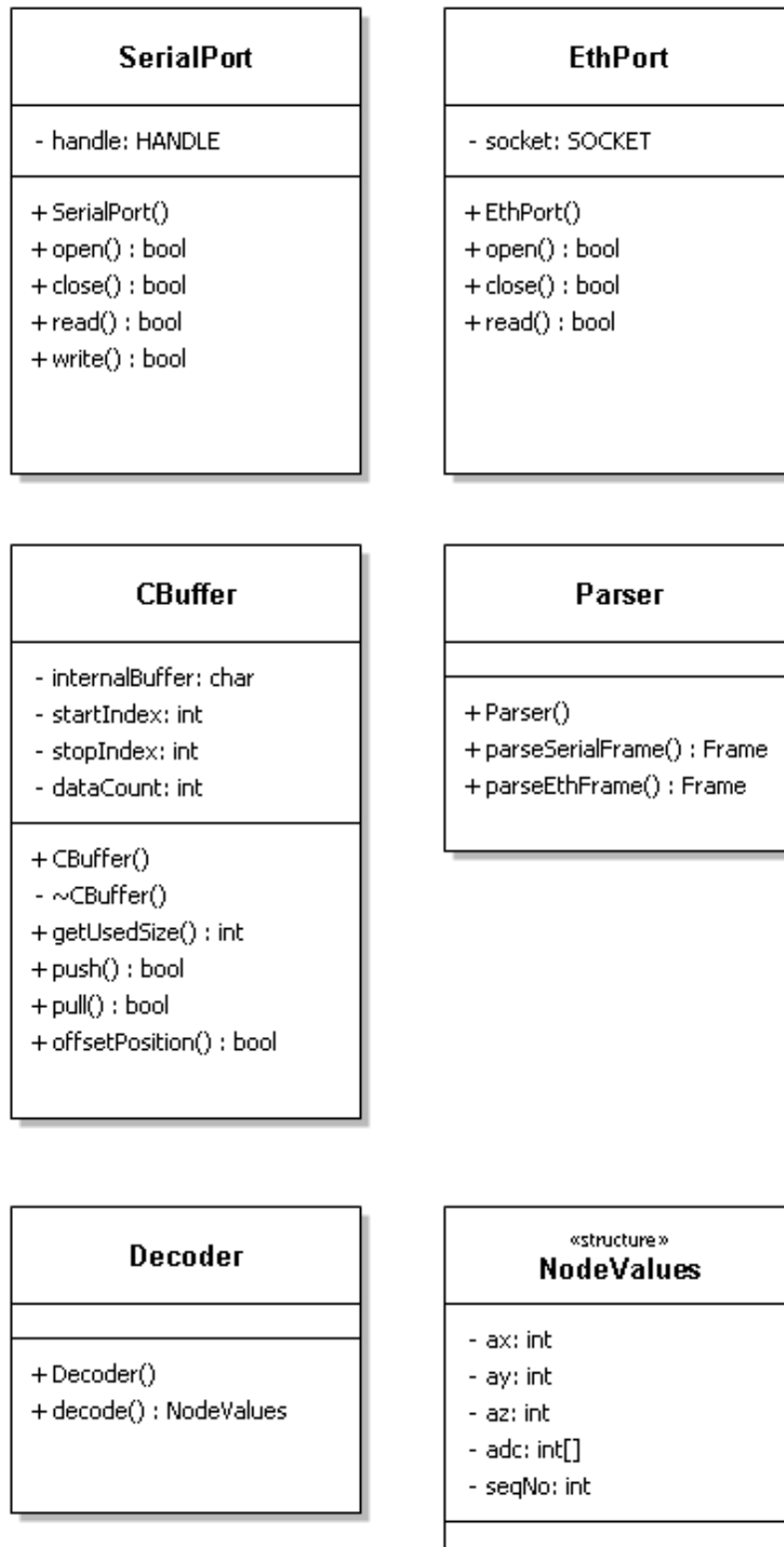
Při uzavírání funkce ovladače v metodě `Close()` jsou uvolněna komunikační rozhraní ve třídách `SerialPort` a `EthPort`.



Obrázek 6.2: UML reprezentace aktivit při čtení dat ze sériového portu



Obrázek 6.3: UML reprezentace aktivit při čtení dat z rozhraní Ethernet



Obrázek 6.4: UML reprezentace tříd pro čtení, rozbor a zpracování dat

6.3 Typy signálů předávaných ovladačem

Při použití metody získávání dat s využitím dodané knihovny 6.2.1 je možné ze senzoru získat a předat řídicímu systému tyto signály:

- Signály z vnitřního MEMS akcelerometru ax , ay , az
- Signály z vnitřního gyroskopu (pokud je přítomen) gx , gy , gz
- Signály z vnitřního kompasu (pokud je přítomen) cx , cy , cz
- Signály z AD převodníku na analogových vstupech $S1$, $S2$, $S3$, $S4$
- Vnitřní stavové informace o baterii, teplotě a externím napájení bat , $temp$, $extI$
- Informace o zpoždění mezi posledními dvěma vzorky, času přijetí posledního vzorku a čísla sekvence posledního vzorku ($tDelay$, $tsLast$, $seqNo$)

Protože metoda získávání dat čtením a rozbořem z fyzického média 6.2.2 byla založena na dodané specifikaci, která obsahovala jen částečný popis komunikačního protokolu, je možné tímto způsobem číst signály:

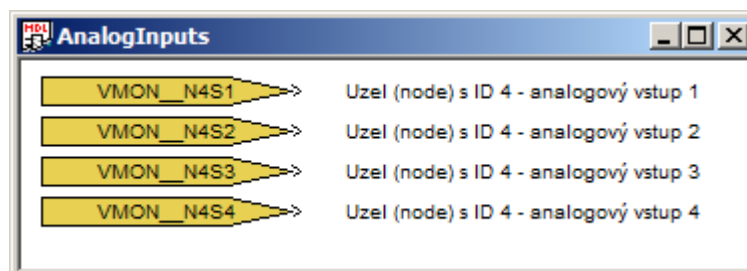
- Signály z vnitřního MEMS akcelerometru ax , ay , az
- Signály z AD převodníku na analogových vstupech $S1$, $S2$, $S3$, $S4$
- Informace o zpoždění mezi posledními dvěma vzorky, čase přijetí posledního vzorku a čísla sekvence posledního vzorku ($tDelay$, $tsLast$, $seqNo$)

6.4 Konfigurace a použití ovladače

Ovladač `VMonDrv` je navržen, aby podporoval tyto konfigurace z hlediska operačního systému (OS) a typu komunikace:

- OS GNU/Linux, komunikace přes Raw Ethernet pakety
- OS GNU/Linux, komunikace přes sériovou linku bez knihovny *Inertia.dll*
- OS Windows, komunikace přes sériovou linku bez knihovny *Inertia.dll*
- OS Windows, komunikace přes sériovou linku s využitím knihovny *Inertia.dll* a *Boost*

Pro použití ovladače je nutné zařadit modul ovladače do exekutivy reálného času a pak již stačí z knihovny funkčních bloků vložit do schématu blok typu `From` a do parametru `Goto tag` napsat předponu `VMON`, následovanou dvěma znaky `--` (podtržítka) znak `N` (jako node – uzel) a identifikační číslo uzlu a na konec symbol pro signál (zmíněné výše v sekci 6.3). Například hodnota A/D převodníku analogového vstupu číslo 1 uzlu s identifikačním číslem 4 je do řídicího systému přivedena blokem s parametrem `VMON__N4S1` (obr. 6.5).



Obrázek 6.5: Příklad připojení signálů ovladače do řídicího programu

Všechny informace o zařazení modulu ovladače do řídicího systému REX, o připojení signálů do schématu a o konfiguraci ovladač jsou popsány v uživatelské příručce k ovladači `VMonDrv` [25], která je součástí této práce.

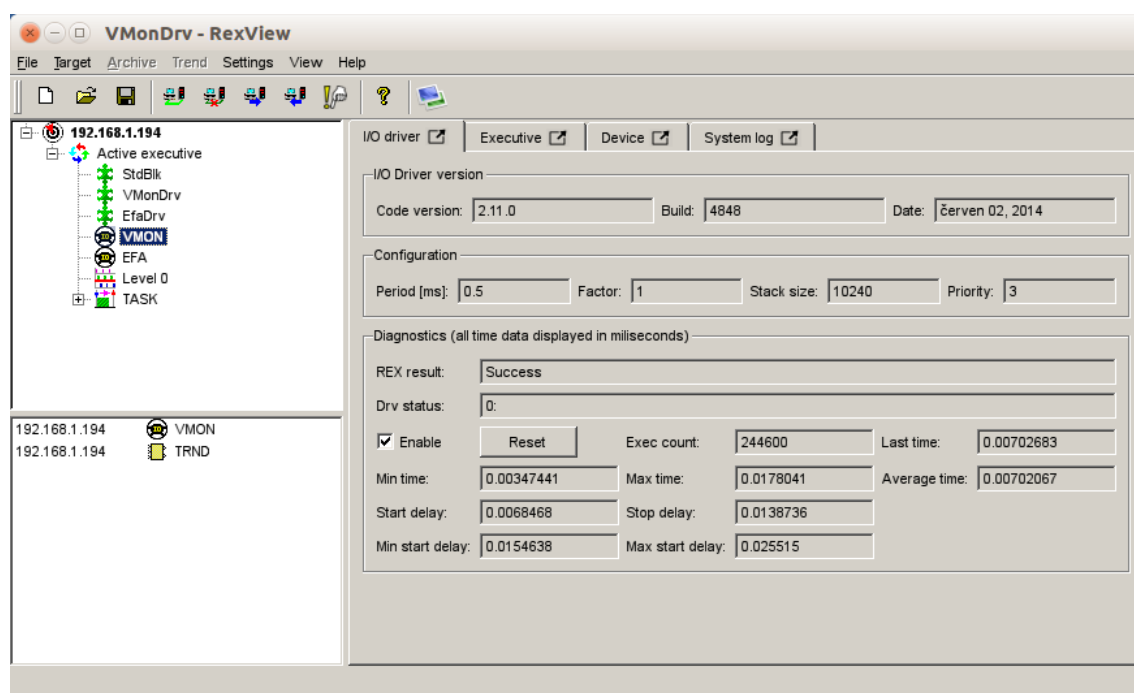
Kapitola 7

Vyhodnocení rychlosti ovladače

Kapitola se zabývá vyhodnocením rychlosti ovladače VMonDrv. Je zde popsán postup měření a dosažené výsledky.

7.1 Způsob měření

Rychlost ovladače byla měřena dvěma způsoby. První způsob spočíval v sestavení měřicího okruhu pro vyhodnocení zpoždění způsobeného komunikací a zpracováním dat řídicím systémem. Toto zpoždění bude dále popisováno jako latence. Pro druhý způsob byl využit diagnostický program RexView (obr. 7.1), který umí měřit rychlost zpracování dat v metodě Main() ovladače VMonDrv.



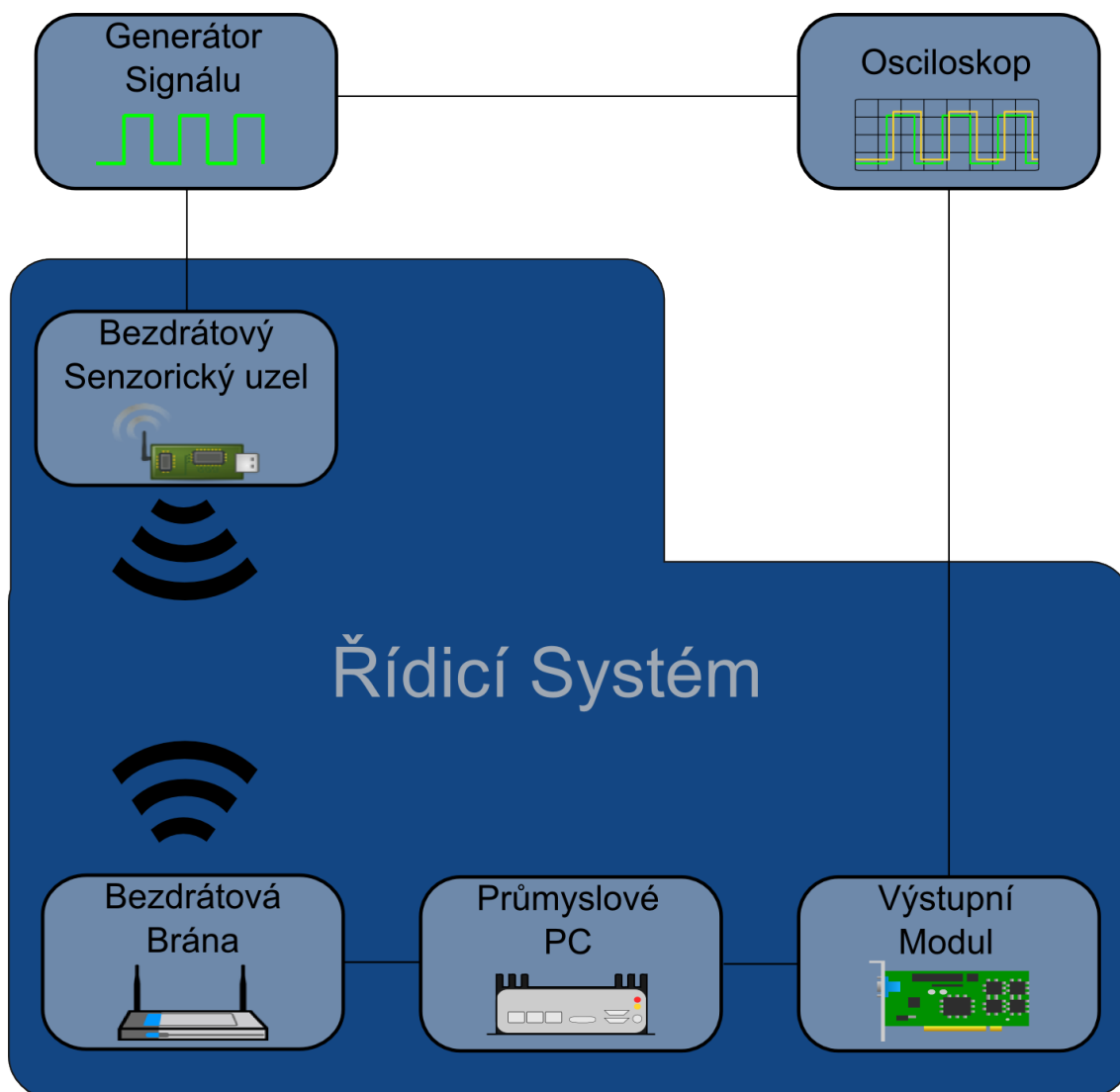
Obrázek 7.1: Diagnostické funkce programu RexView

7.1.1 Systém pro vyhodnocení odezvy řídicího systému

Platforma pro vyhodnocení odezvy řídicího systému je složena z:

- Osciloskopu s generátorem signálu (Agilent InfiniiVision MSO-X 3034A).
- Bezdrátového senzorského uzlu V-Mon 4000.
- Bezdrátové brány - gateway pro V-Mon 4000.
- Počítače pro vyhodnocení signálu (liší se podle platformy).
- Výstupního modulu (sériová linka, B&R modul nebo PCI karta podle platformy).

Systém je ilustrován na obrázku 7.2. Procedura pro měření latence systému je ná-

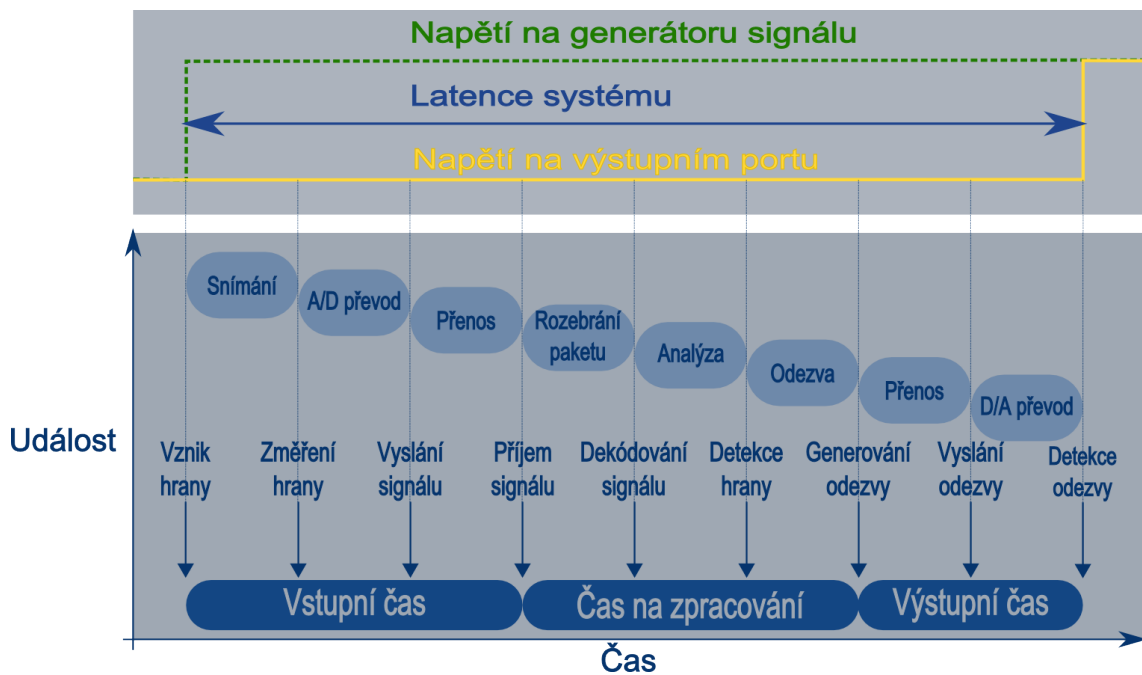


Obrázek 7.2: Platforma pro vyhodnocení latence řídicího systému s bezdrátovými prvky

sledující:

- Na generátoru signálu je vytvořena náběžná hrana, která je okamžitě zaznamenána osciloskopem a sensorovým uzlem. Tímto okamžikem začíná měření času.
- Měřený signál je bezdrátově přenesen do řídicího počítače.
- Zaznamenaná data jsou vyhodnocena v řídicím algoritmu a v případě detekce náběžné hrany je odeslána příslušná odpověď na výstupní port systému.
- Náběžná hrana na výstupním portu je zaznamenána na osciloskopu a měření času je zastaveno.

Diagram s jednotlivými událostmi je zanesen na obrázku 7.3. Latence celého sys-



Obrázek 7.3: Diagram událostí v měřeném systému

tému je tedy složena z času potřebného pro načtení dat do systému, zpracování dat a vyslání odpovědi. Latence slouží jako indikátor kvality regulační smyčky a určuje možnosti aplikace navrženého systému. Z pohledu teorie řízení je latence aditivní dopravní zpoždění zanesené do systému. Při znalosti velikosti dopravního zpoždění může být toto zpoždění přidáno do simulačního modelu pro zvýšení přesnosti simulace a pro následnou optimalizaci parametrů navrženého řízení.

7.2 Testované platformy

V této sekci jsou popsány testované platformy a zmíněny některé jejich parametry a charakteristiky.

7.2.1 Osobní stolní počítač

První měření byla provedena na stolním počítači, který zároveň sloužil jako vývojová stanice, a který není určen k budoucímu provozování řídicího systému v průmyslových aplikacích. Jako výstupní port systému byla použita sériová linka. Čtení dat do systému probíhá prostřednictvím:

- Komunikace po USB s využitím binární knihovny *Inertia.dll* (popsáno v části 6.2.1).
- Komunikace po USB se zpracováním dat podle protokolu (více v části 6.2.2).
- Komunikace prostřednictvím raw Ethernet paketů (též v části 6.2.2). Tato metoda je podpořeno pouze v OS Linux..

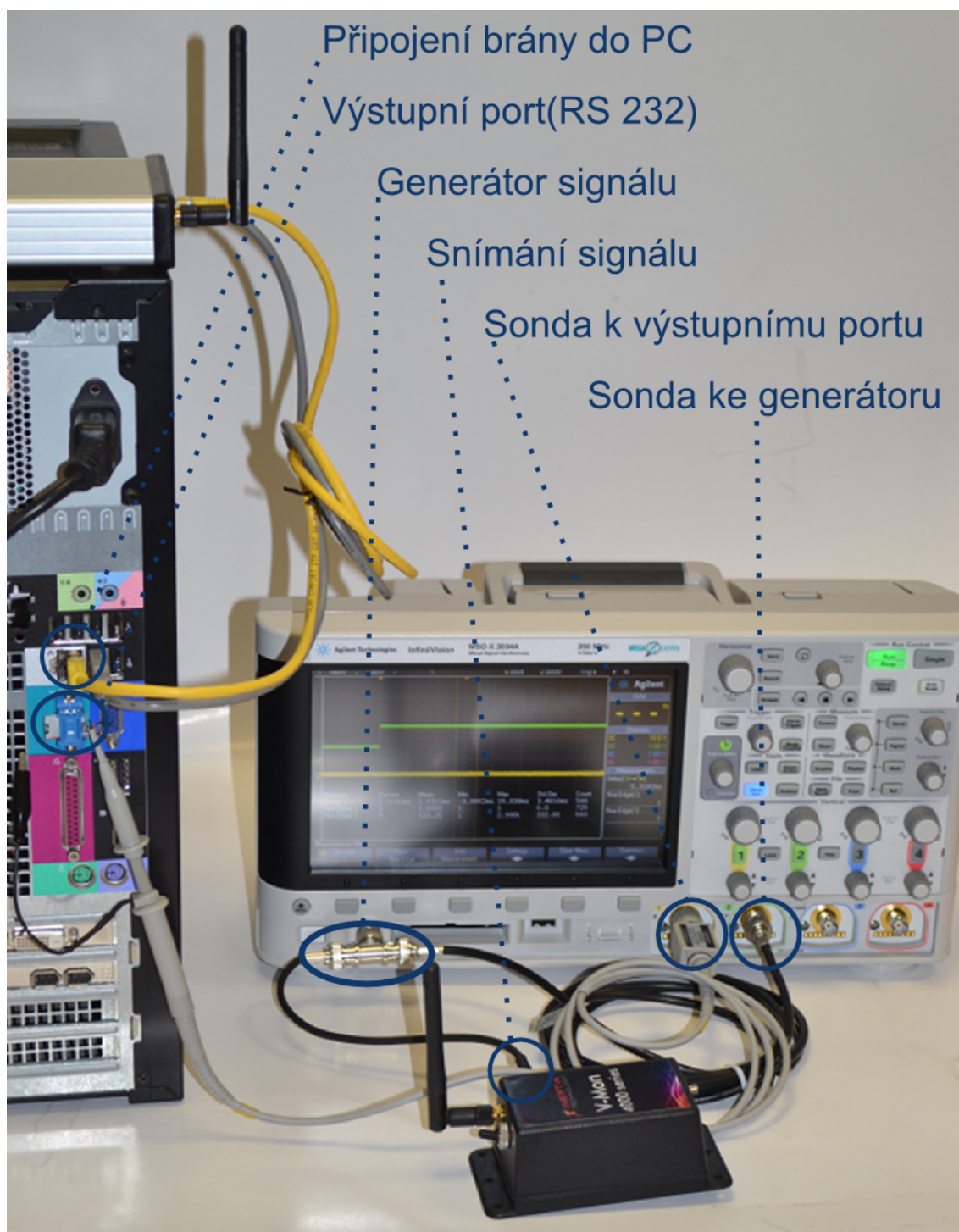
Osobní počítač umožňuje porovnat rychlost zpracování obou typů připojení výchozí brány (USB, Ethernet), rychlost zpracování dat při použití různých metod čtení dat a výkonnost řídicího systému v závislosti na operačním systému. Způsob připojení bezdrátové brány a výstupního portu je znázorněn na obrázku 7.4. Parametry platformy se stolním počítačem jsou:

- Procesor Intel Core 2 Quad Q9550 2.83 GHz.
- Paměť DDR2 o velikosti 4 GB.
- Operační systémy Windows 7 Professional x64 a Ubuntu 14.04.1 LTS.
- Výstupní port RS-232.

7.2.2 Průmyslové PC ARK 1503 s výstupním modulem B&R

Platforma složená z průmyslového PC ARK 1503 v kombinaci s analogovým výstupním modulem B&R byla sestavena jako první prototyp pro využití bezdrátových senzorických jednotek V-Mon 4000 v průmyslové aplikaci (obr. 7.5). Výchozí bezdrátová brána i výstupní modul jsou připojeny prostřednictvím Ethernetu, o chod řídicího algoritmu se stará průmyslové PC firmy Advantech. Klíčové vlastnosti řídicí jednotky jsou:

- Procesor Intel Atom D525 1.8 GHz.
- Paměť DDR3 4 GB.
- Operační systém Linux OpenWRT s nadstavbou pro podporu reálného času Xenomai.
- Výstupní modul B&R X20 AO4632.



Obrázek 7.4: Způsob zapojení měřicího okruhu na stolním počítači



Obrázek 7.5: Platforma s průmyslovým PC ARK 1503

7.2.3 Průmyslové PC NexCom s výstupní PCI kartou

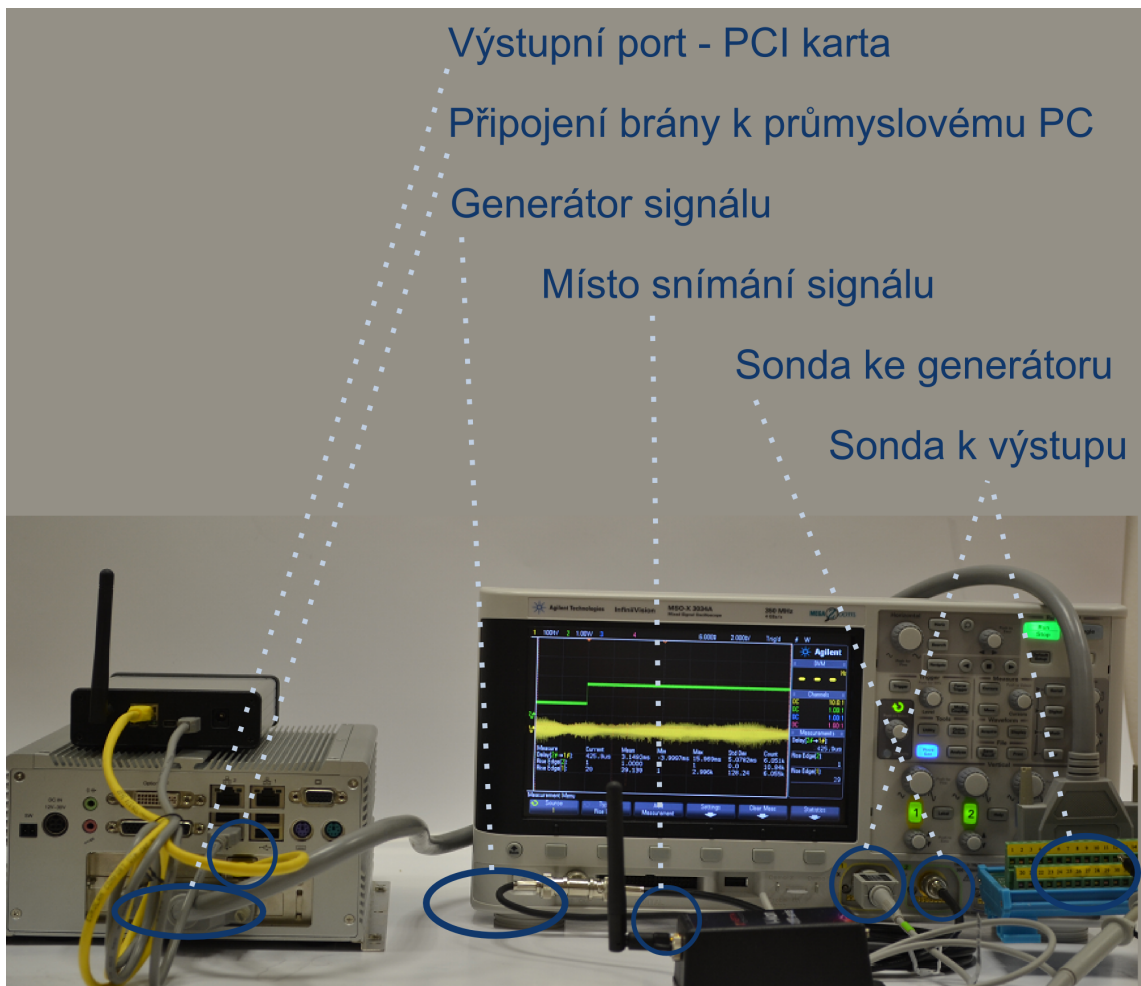
Platforma byla zařazena do srovnání po změření platformy s počítačem ARK 1503. Výsledky měření počítače ARK ukázaly aditivní dopravní zpoždění, způsobené komunikací po sběrnici Powerlink s B&R moduly. Proto byla sestavena platforma s průmyslovým PC NexCom, které lze osadit PCI kartou. Jádrem platformy tvoří počítač NexCom NISE 3110. Výstupní karta je připojena přímo do PCI slotu počítače. Způsob zapojení je ilustrován na obrázku 7.6 Specifikace platformy jsou:

- Procesor Intel Core 2 Duo T2500 2 GHz.
- Paměť DDR2 512 MB.
- Operační systém Linux OpenWRT s nadstavbou pro podporu reálného času Xenomai.
- Čtyřkanálová výstupní PCI karta Advantech PCI 1720U.

7.3 Výsledky testů

Pro testování popsaných platforem byly použity následující parametry:

- Generátor signálu:
 - Typ signálu: obdélník.
 - Amplituda: 1 V. posunutý o +1.15 V.
 - Frekvence: 20 Hz, střída 80%.
- Sensorický uzel a bezdrátová síť:
 - Vzorkovací frekvence: 1000 Hz.



Obrázek 7.6: Platforma s průmyslovým NexCom NISE 3110

- Maximální vysílací frekvence: 2000 Hz.
- Počet vzorků ve zprávě: 1.
- Maximální počet uzlů: 1.
- Vzdálenost uzlu od brány: 1 m (přímá viditelnost).
- Měření na osciloskopu:
 - Detekce náběžných hran z generátoru a výstupního portu měřené platformy.
 - Měření zpoždění náběžných hran s průměrováním, výpočtem směrodatné odchylky (Std Dev) a záznamem minimálních a maximálních hodnot.
 - Čítače náběžných hran.

7.3.1 Osobní stolní počítač

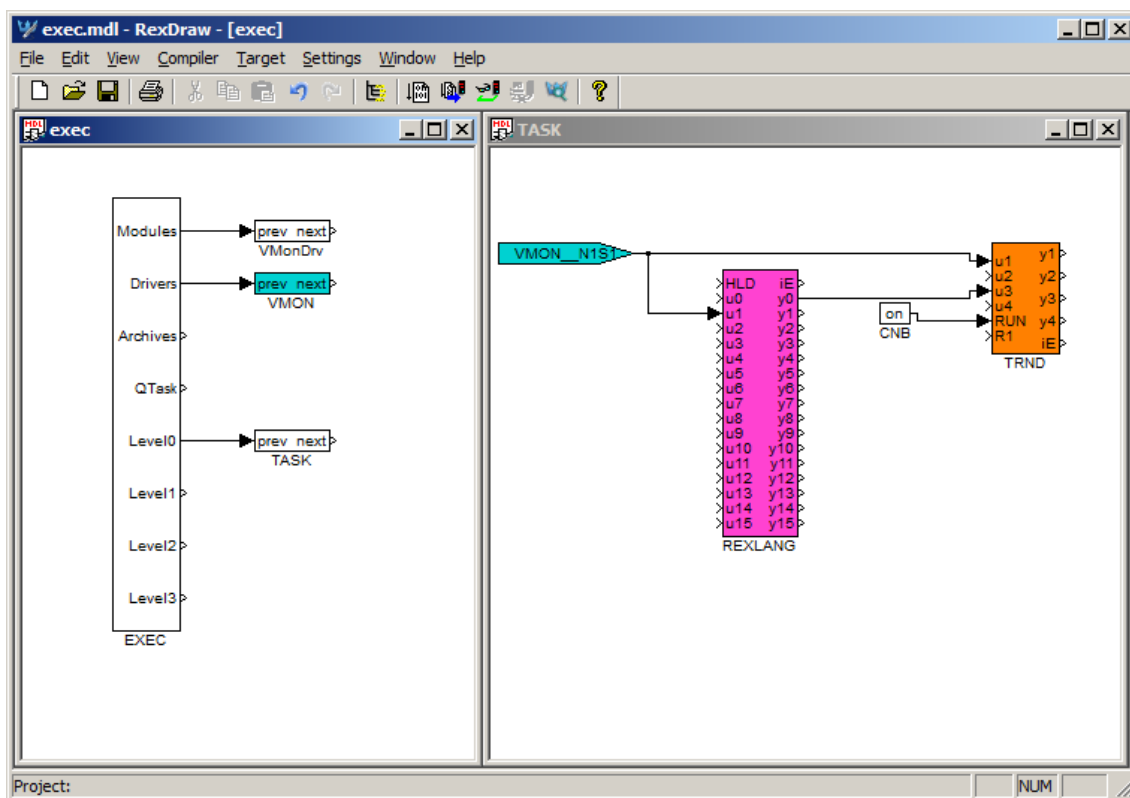
Na osobním počítači byly měřeny tyto konfigurace:

- OS Windows, brána připojena přes USB s *Inertia.dll*, perioda algoritmu 1 ms (D-Win-Ine).
- OS Windows, brána připojena přes USB bez *Inertia.dll*, perioda algoritmu 1 ms (D-Win-USB).
- OS Linux, brána připojena přes USB s *Inertia.dll*, perioda algoritmu 0.5 ms (D-Linux-Ine).
- OS Linux, brána připojena přes USB bez *Inertia.dll*, perioda algoritmu 0.5 ms (D-Linux-USB).
- OS Linux, brána připojena přes Ethernet bez *Inertia.dll*, perioda algoritmu 0.5 ms (D-Linux-Eth).

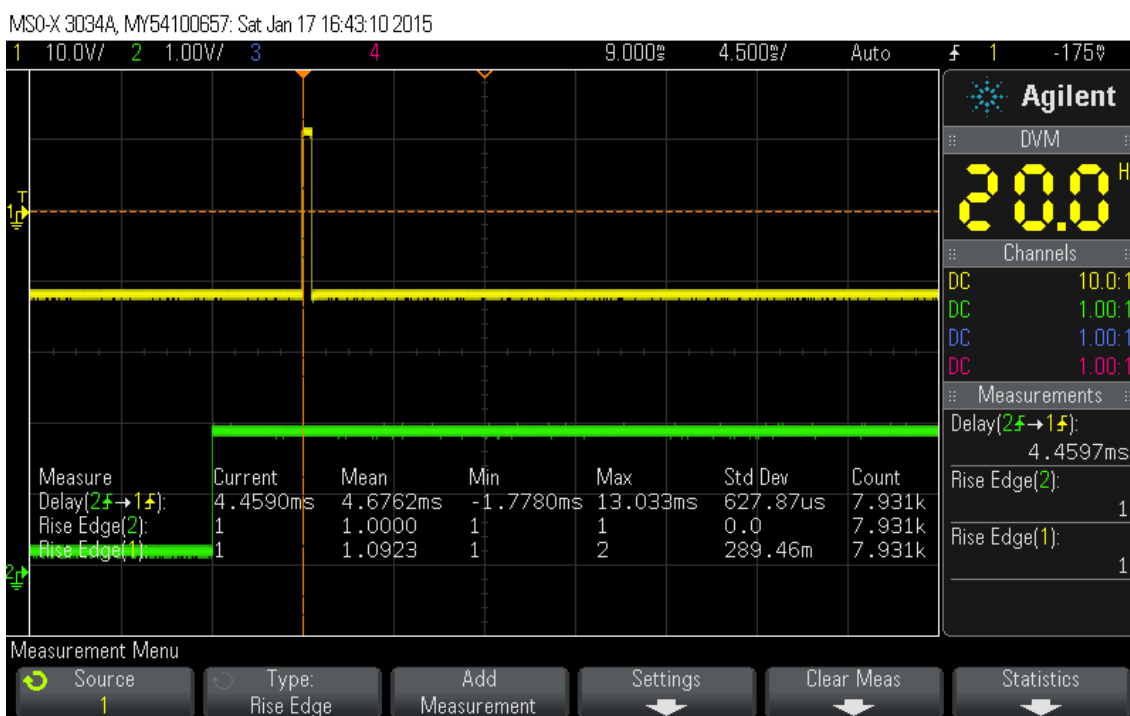
Algoritmus pro testování (na obr. 7.7) byl sestaven v řídicím systému REX. Data jsou čtena vstupním blokem z bezdrátové brány (vlajka *VMON_N1S1*) a příchozí hodnota je porovnávána s předchozí hodnotou v bloku *REXLANG*. V případě detekce náběžné hrany je vyslána krátká zpráva na sériovou linku. První bit vyslané zprávy je zachycen na osciloskopu a jeho zpoždění oproti náběžné hraně z generátoru signálu je považováno za latenci systému. Do schématu byl ještě přidán blok *TRND* pro diagnostické účely. Schéma je navrženo tak, aby bylo výpočetně jednoduché a nepřidávalo do systému výpočetní zpoždění.

Po dosažení alespoň 5000 cyklů pro zaručení věrohodnosti testu byla na osciloskopu vygenerována zpráva s průměrnou dobou zpoždění, směrodatnou odchylkou času (Std Dev), minimálním a maximálním zpožděním. Například na obrázku 7.8 je záznam z měření na platformě s OS Linux a USB bránou. Výsledky všech měření na stolním počítači jsou zanesené v tabulce 7.1.

Stolní počítač umožňuje rychle porovnat výkonnost operačního systému a komunikačních portů. OS Windows je pomalejší v přístupu k USB zařízení i sériovému portu. Použití knihovny na operačním systému Linux *Inertia.dll* zkrátí dobu průměrnou latence o 0.5 milisekundy a konzumuje o 30% více paměti RAM. Přechod



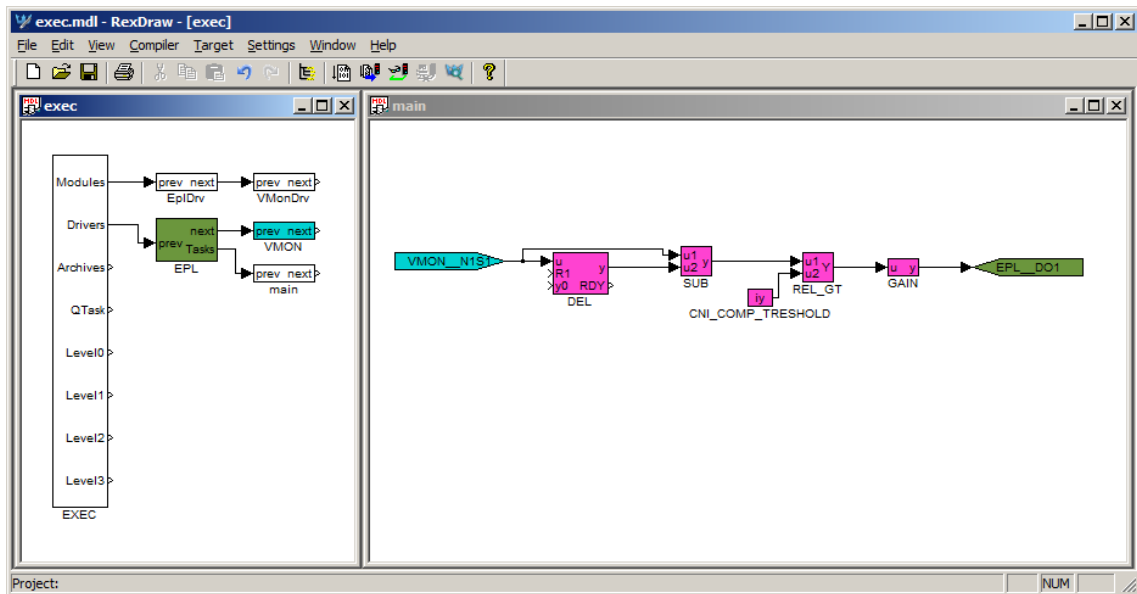
Obrázek 7.7: Algoritmus pro vyhodnocení rychlosti u stolního počítače



Obrázek 7.8: Záznam z měření rychlosti na osobním počítači

Konfigurace	Průměrný čas [ms]	Std Dev [ms]	Min [ms]	Max [ms]
D-Win-Ine	7.718	1.443	3.409	11.435
D-Win-USB	7.720	1.426	3.801	11.254
D-Linux-Ine	4.693	0.634	2.78	13.033
D-Linux-USB	5.252	1.017	3.23	11.023
D-Linux-Eth	2.177	0.435	1.11	3.875

Tabulka 7.1: Srovnání měřených konfigurací na stolním počítači



Obrázek 7.9: Algoritmus pro vyhodnocení rychlosti u počítače ARK 1503

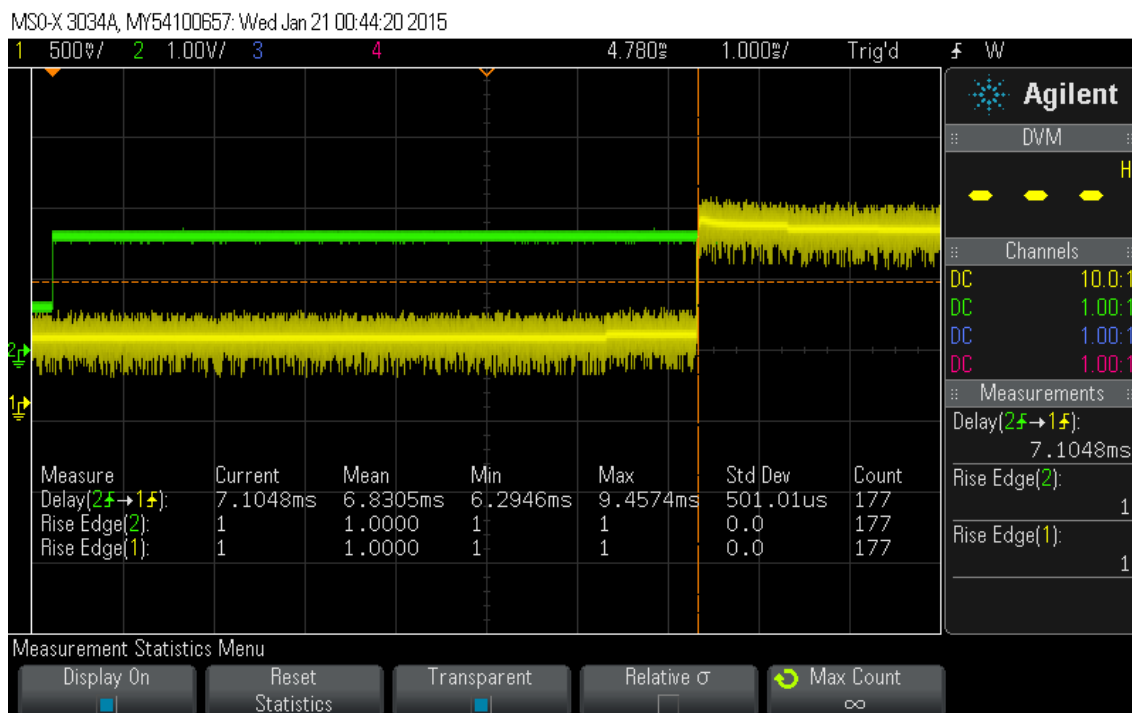
ke komunikaci po Ethernetu významně zkrátí latenci systému. Z tohoto důvodu je Ethernet upřednostňovanou formou komunikace pro všechny druhy aplikací.

7.3.2 Průmyslové PC ARK 1503 s výstupním modulem B&R

Ačkoli byl i pro průmyslové PC ARK 1503 vyvinut ovladač pro komunikaci s výchozí bránou prostřednictvím USB, po výsledcích předchozího měření nebyl použit. Testovací konfigurace běžela s tiskem 300 mikrosekund, standardní ovladač Ethernetu byl nahrazen alternativou kompatibilní s rozšířením reálného času Xenomai pro dosažení vyšší přesnosti při komunikaci s B&R moduly a bezdrátovou branou.

V řídicím algoritmu (obr. 7.9) byl blok REXLANG nahrazen skupinou bloků s funkcemi:

- DEL - ukládá poslední naměřenou hodnotu.
- SUB - odčítá od aktuální hodnoty hodnotu uloženou v DEL.
- REL_GT - porovnává rozdíl hodnot s prahem v CNI_COMP_TRESHOLD. Na výstupu se může objevit 1 (rozdíl po sobě jdoucích hodnot je větší než práh) a 0.



Obrázek 7.10: Průběh měření rychlosti u počítače ARK 1503

- GAIN - násobí signál z bloku REL_GT hodnotou určenou k zápisu na výstup systému.
- EPL__D01 - zapíše hodnotu do digitálního výstupu 1 prostřednictvím ovladače pro Ethernet Powerlink.

Průběh měření je zaznamenán na obrázku 7.10, při měření byl vzhledem k malému počtu konfigurací zaznamenán větší počet cyklů (přes 10000). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.2.

Konfigurace	Průměrný čas [ms]	Std Dev [ms]	Min [ms]	Max [ms]
ARK 1503 Ethernet	6.798	0.550	5.545	11.551

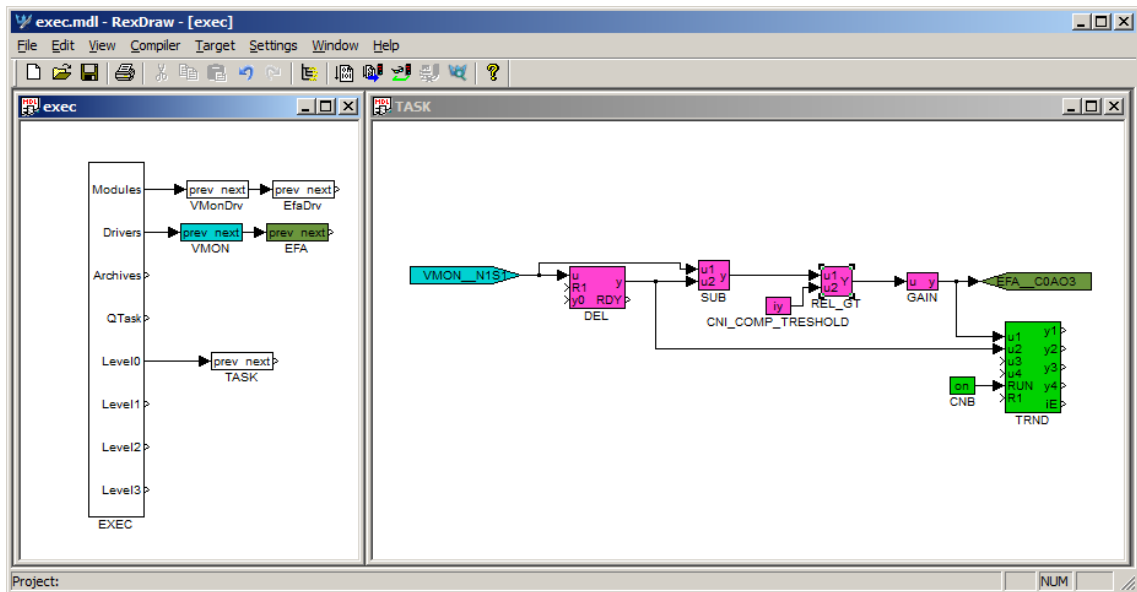
Tabulka 7.2: Výsledky měření počítače ARK 1503

Naměřené výsledky ukázaly dopravní zpoždění, způsobené komunikací s výstupními moduly B&R prostřednictvím Ethernet Powerlinku.

7.3.3 Průmyslové PC NexCom s výstupní PCI kartou

Testy platformy s počítačem NexCom nabízí díky totožnému operačnímu systému (OpenWRT s rozšířením Xenomai) možnost vyhodnotit zpoždění způsobené komunikací Ethernet Powerlink u platformy s ARK 1503. Na platformě NexCom byly testovány tři způsoby přístupu ke komunikaci s bezdrátovou bránou:

- Standardní ovladač rozhraní Ethernet (NexCom-Eth).



Obrázek 7.11: Algoritmus pro vyhodnocení rychlosti u počítače NexCom

- Ovladač rozhraní Ethernet s podporou rozšíření Xenomai (NexCom-Eth-Xeno).
- Komunikace prostřednictvím USB (NexCom-USB).

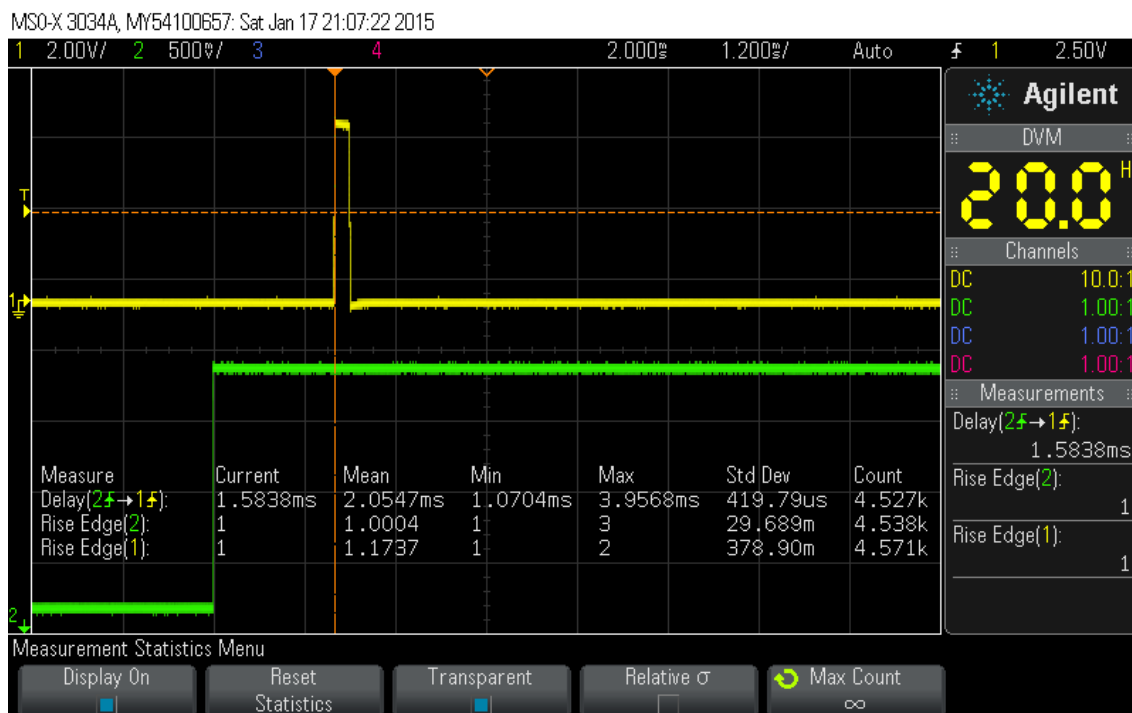
Platforma navíc nabízí možnost porovnat rychlost výstupu přes PCI kartu a přes sériový port. Předpoklad zní, že PCI karta je nejrychlejší možný výstupní port, protože požadovaná hodnota je zapisována přímo do registrů PCI karty, zatímco použití sériové linky vyžaduje podporu operačního systému a přídatnou vrstvu software.

Řídicí algoritmus běžel s periodou 300 mikrosekund, schéma (obr. 7.11) bylo odvozeno od schématu pro ARK 1503. Blok EPL__D01 byl nahrazen blokem EFA__C0A03 pro zápis do výstupního portu PCI karty Advantech. Pro diagnostické účely byl navíc přidán blok TRND. Průběh měření je ilustrován na obrázku 7.12. Výsledky měření jsou zaneseny do tabulky 7.3. S využitím programu RexView byla navíc měřena rychlost zpracování funkce Main() ovladače VMonDrv.

Konfigurace	Průměrný čas [ms]	Std Dev [ms]	Min [ms]	Max [ms]	Main() [ms]
NexCom-Eth	2.330	0.381	1.360	3.309	0.04
NexCom-Eth-Xeno	2.055	0.419	1.070	3.957	0.008
NexCom-USB	5.675	1.017	3.470	13.023	0.013

Tabulka 7.3: Výsledky měření počítače NexCom

Výsledky měření na platformě s počítačem NexCom naznačují, jak mohou vypadat nejlepší dosažitelné výsledky při použití průmyslového PC. Latence systému je vyšší než u stolního počítače. Tento fakt lze vysvětlit rozdílem ve výkonu. Průmyslové počítače jsou vyráběny s ohledem na robustnost a spolehlivost, a proto neobsahují mechanické části jako pevné disky či větráčky. Aby bylo možné průmyslové počítače provozovat bez aktivního chlazení, jsou osazovány méně výkonnými procesory, což se může projevit vyšší latencí při zpracování dat.



Obrázek 7.12: Průběh měření rychlosti u počítače NexCom

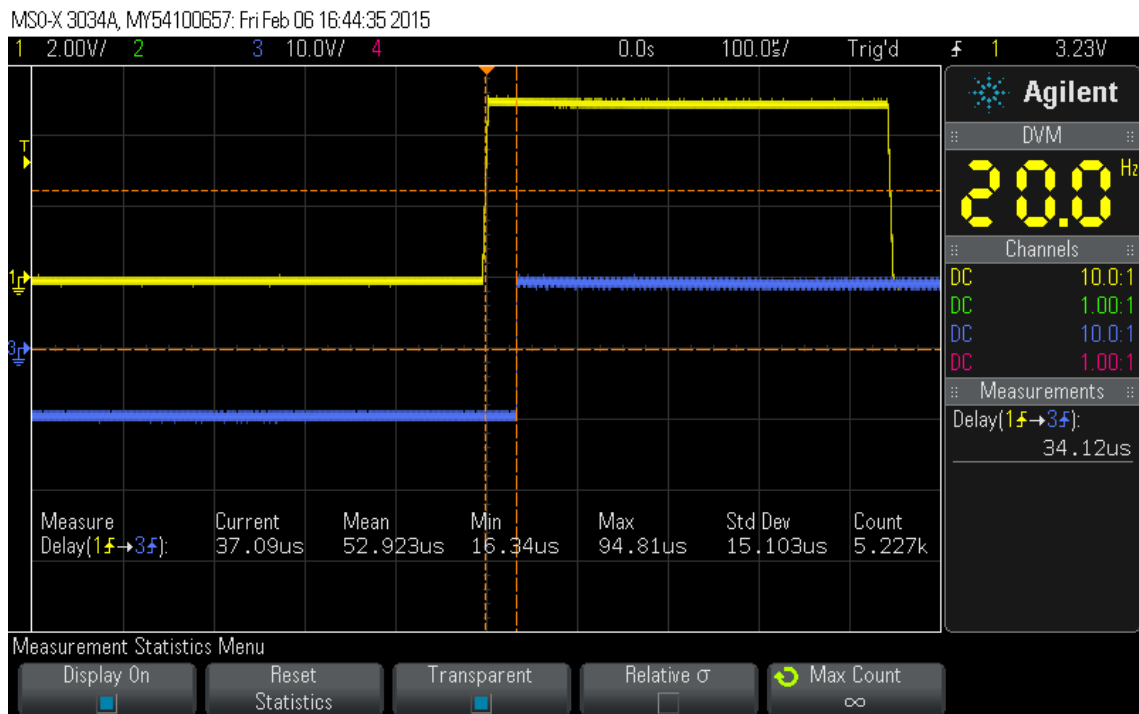
Rozdíl mezi ovladači Ethernetové přípojky se nejvíce projevuje v rychlosti provedení funkce `Main()`, ve které je přistupováno k médiu. Čtení a zpracování dat při použití ovladače pro jádro Xenomai trvá přibližně pětkrát kratší dobu než u standardního ovladače.

Při použití komunikace po USB bylo naměřeno zpoždění srovnatelné se stolním počítačem. Rychlejší zpracování funkce `Main()` (v tabulce 7.3 sloupec `Main()`) u konfigurace NexCom-USB ve srovnání s NexCom-Eth) je způsobené rychlejším přístupem operačního systému k USB komunikaci než k Ethernetu přes standardní ovladač. Použití ovladače optimalizovaného pro jádro Xenomai zpoždění v přístupu k médiu odstraní.

Protože počítač NexCom je osazen sériovým portem i PCI kartou, umožňuje srovnání obou výstupů. V řídicím systému byl na oba porty periodicky zapisován obdélníkový signál. Výsledky měření jsou na obrázku 7.13. Výstupní port PCI karty je obarven žlutě, sériová linka je modrá. Průměrné zpoždění sériové linky za PCI kartou je 52 mikrosekund. U stolního počítače lze předpokládat obdobné hodnoty. Při pohledu na nejrychlejší konfiguraci se stolním počítačem – brána připojená po Ethernetu na OS Linux – zjistíme, že při latenci 2.177 milisekund tvoří zpoždění způsobené sériovou linkou (52 mikrosekund) méně než 3% celkové latence. Proto mohou být výsledky měření s platformou NexCom srovnávány s výsledky měření na stolním počítači, ačkoli byly použité jiné výstupní moduly.

7.3.4 Závěry z měření

Výsledky prvotních měření na stolním počítači ukázaly nepoužitelnost operačního systému Windows pro praktické aplikace. Z porovnání USB a Ethernet komunikace



Obrázek 7.13: Průběh měření rychlosti PCI karty a sériové linky

s bezdrátovou bránou dopadlo lépe Ethernetové připojení, které je více než dvakrát rychlejší, a proto by mělo být vždy upřednostňováno před USB komunikací.

Výsledky měření platformy s počítačem ARK 1503 prozradily přítomnost aditivního zpoždění způsobeného komunikací prostřednictvím protokolu Ethernet Powerlink s výstupními moduly B&R. Průměrná latence dosahovala 6.8 milisekundy. Platforma je proto použitelná při řízení pomalejších procesů.

Rychlejší aplikace mohou být řízeny platformou s počítačem NexCom NISE 3110. Výstupní modul B&R je zde nahrazen PCI výstupní kartou, což má za následek zhruba třikrát nižší latenci. Toto řešení je možné nasadit v aplikacích vyžadujících rychlejší odezvu. Nevýhodou je ovšem významné omezení na celkový počet výstupů, které je dáno počtem PCI slotů na desce počítače.

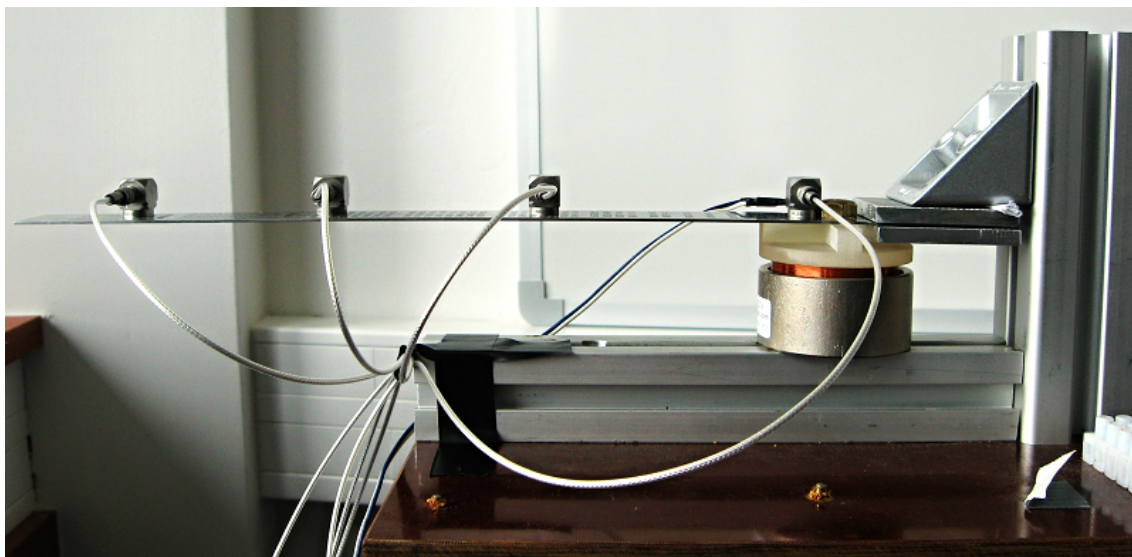
Kapitola 8

Příklad použití bezdrátových jednotek v řídicím systému

Kapitola popisuje příklad použití bezdrátových jednotek v kombinaci s řídicím systémem REX na laboratorním modelu pro demonstraci algoritmů aktivního tlumení vibrací.

8.1 Popis soustavy

Laboratorní model (obr. 8.1) se skládá z kmitavého nosníku opatřeného čtyřmi piezoelektrickými akcelerometry pro měření kmitů a akčního členu určeného pro aktivní tlumení vibrací.



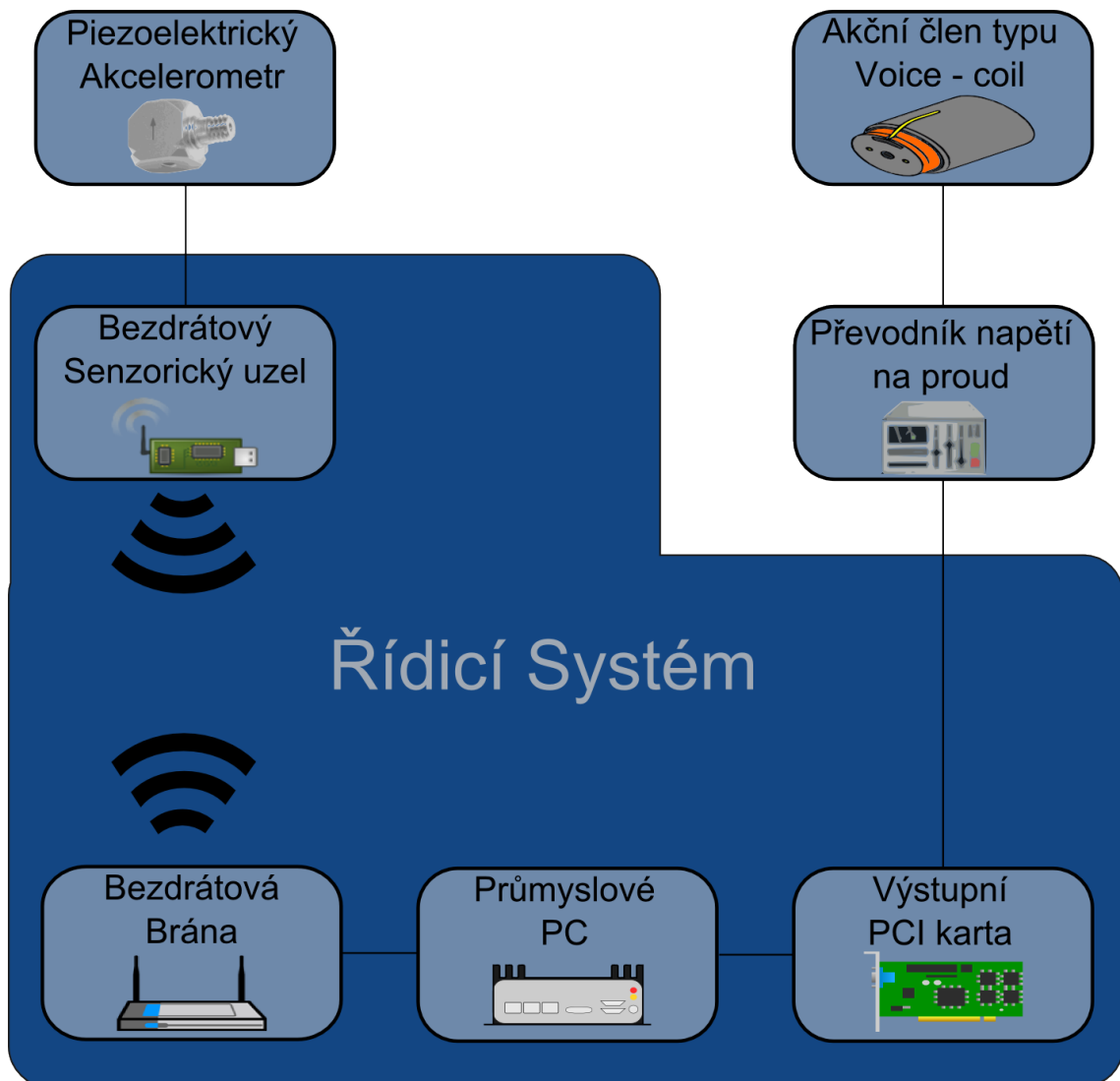
Obrázek 8.1: Model kmitavého nosníku

Řídicí systém (schéma je na obrázku 8.2) se skládá z bezdrátového uzlu V-Mon 4000, který snímá vibrace nosníku a předává je prostřednictvím bezdrátové sítě výchozí bráně, umístěné u průmyslového PC. Data z brány jsou přeposílána ve formě raw ethernet paketů do řídicího systému. Komunikace dat probíhá jednou za

milisekundu. Z předchozí kapitoly je známá doba latence 2 milisekundy s odchylkou 0.4 milisekundy.

Regulační algoritmus vyhodnotí přijatá data a vypočte odezvu akčního členu. Požadovaný akční zásah je prostřednictvím výstupní karty vyslán jako elektrický napěťový signál do převodníku napětí na proud. Proud z převodníku je dále přiveden na akční člen typu voice-coil.

Akční člen typu voice-coil připomíná funkčním principem reproduktor. Skládá se z cívky a permanentního magnetu. Při průchodu elektrického proudu cívkou vzniká magnetické pole, které způsobí lineární pohyb cívky podél osy magnetu. Cívka je připevněna k nosníku, díky čemuž je možné změnou proudu na cívce převést elektrický signál na lineární pohyb nosníku.



Obrázek 8.2: Schéma řídicího systému modelu

8.2 Popis tlumicího algoritmu

Tlumicí algoritmus je založen na metodě přiřazení Jordanovy formy stavovou zpětnou vazbou. Metoda byla v [14] upravena do podoby, která pro přiřazení zpětné vazby využívá namísto stavu jeho derivaci. Zmíněná modifikace standardního algoritmu pro přiřazení Jordanovy formy umožňuje využít informace z akcelerometru bez nutnosti využívat dva integrační filtry pro získání odhadu polohy nosníku (nederivovaného stavu).

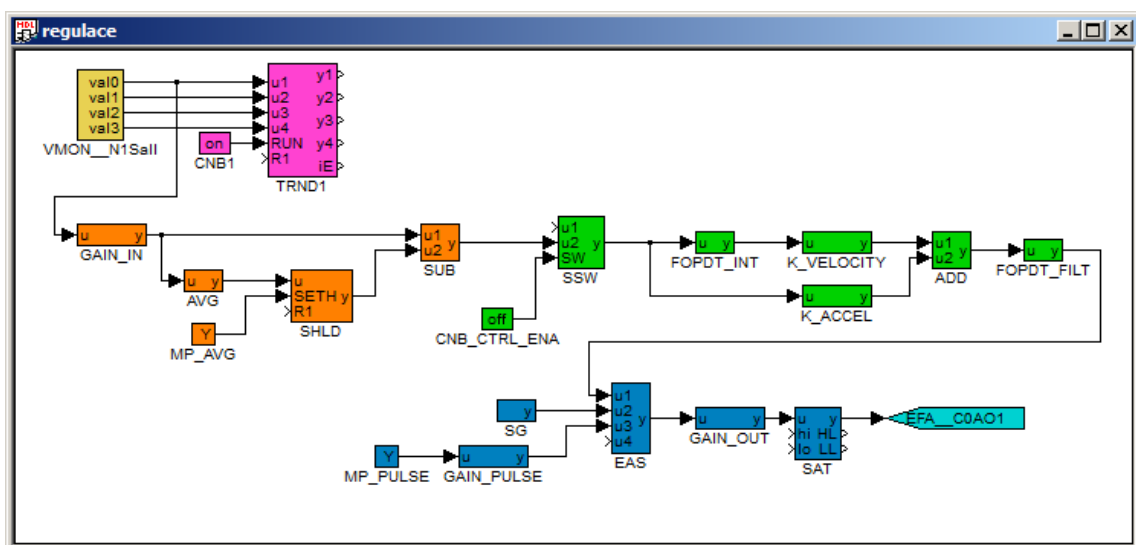
V použité verzi (na obrázku 8.3) algoritmu byla využita pouze informace z akcelerometru, jež se nachází nejbližší místa upnutí kmitavého nosníku, a tedy nejbližší akčnímu členu. Data z akcelerometrů jsou předávána blokem VMON_N1Sa11. Růžové bloky jsou určeny pro vizualizaci signálů v grafu. Přechtený signál prochází oranžovou částí pro úpravu signálu, kde je přepočten na napěťový signál a zbaven stejnosměrné složky napětí.

Zelená část zajišťuje vlastní regulaci. Konstanta CNB_CTRL_ENA spouští regulaci. Akční zásah je vygenerován z hodnoty zrychlení a filtrované rychlosti pohybu nosníku v umístění prvního akcelerometru. Chování regulátoru ovlivňuje nastavení parametrů: K_VELOCITY a K_ACCEL. Po výpočtu akčního zásahu je řízení ještě filtrováno dolní propustí.

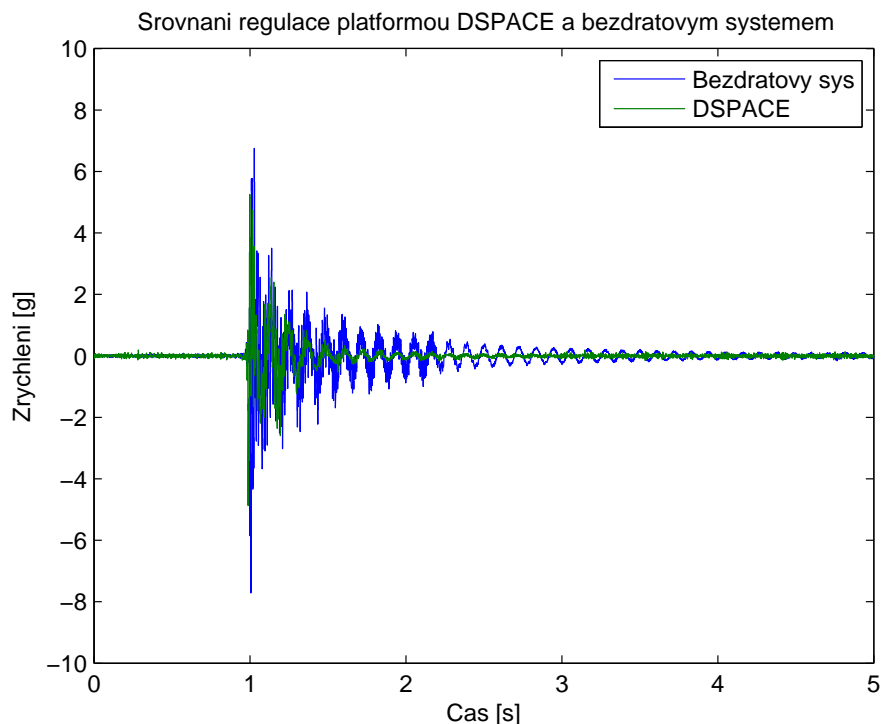
Řídicí signál je přiveden do modré části, která slouží k úpravě akčního zásahu přičtením pulsu nebo periodického signálu a saturací na hodnoty podporované převodníkem napětí na proud.

Ladění parametrů proběhlo metodou pokus – omyl na základě vypočtených optimálních hodnot parametrů z linearizovaného modelu nosníku.

Perioda výpočtu algoritmu je 500 mikrosekund. Zvolená rychlost je dvakrát vyšší než frekvence příchodu nových dat a byla zvolena kvůli asynchronnímu chování bezdrátové komunikace vůči řídicímu systému tak, aby bylo dosaženo co nejmenšího zpoždění mezi přijetím dat bezdrátovou bránou a jejich přechtením řídicím systémem při zachování správného časování řídicího systému (pokud by byla zvolena kratší perioda vykonávání algoritmu, docházelo by k nepřesnostem v časování).



Obrázek 8.3: Algoritmus pro tlumení vibrací v systému REX



Obrázek 8.4: Srovnání regulace bezdrátovým systémem a platformou DSPACE

8.3 Výsledky regulace

Pro porovnání kvality regulace bylo nejprve provedeno měření doby odeznění pulzu na kmitajícím nosníku bez regulace.

Aktivní tlumení vibrací bylo nejprve řešeno se vstupně-výstupním modulem DSPACE a realizací algoritmu v prostředí MATLAB/Simulink. Perioda vykonávání algoritmu byla nastavena na 100 mikrosekund. Získané výsledky z regulace touto platformou byly použity pro porovnání výsledků regulace s bezdrátovými moduly.

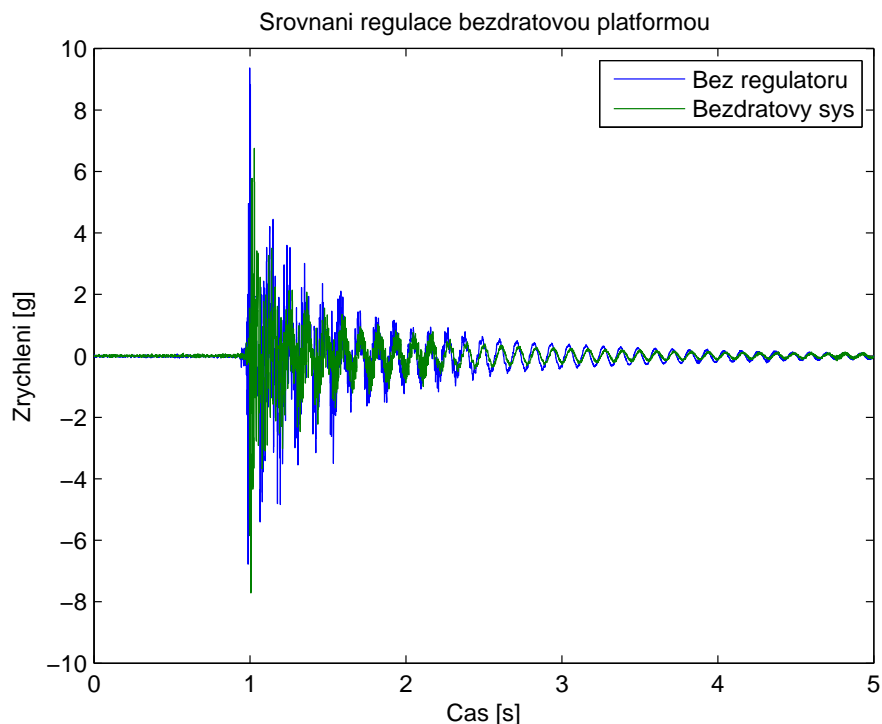
Podle očekávání způsobil přechod k platformě s bezdrátovými moduly nestabilitu regulační smyčky. Regulátor nezpůsobil útlum kmitů pravítka, naopak jej více rozkmitával. Parametry regulátoru byly upraveny na méně agresivní regulaci snížením koeficientů $K_{VELOCITY}$ a K_{ACCEL} . Hodnoty parametrů regulátoru jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Průběh regulace kmitů nosníku s naladěným regulátorem při použití bezdrátových sensorových jednotek je na obrázku 8.5 srovnán s odezvou na puls bez regulace. Na obrázku 8.4 je porovnána bezdrátová regulace s odezvou na impuls při regulaci platformou s DSPACE moduly.

Platforma	$K_{VELOCITY}$	K_{ACCEL}
DSPACE + MATLAB/Simulink	8000	25
V-Mon 4000 + REX	1550	0.8

Tabulka 8.1: Porovnání parametrů regulátorů

Při porovnání průběhu regulace na platformě DSPACE je znatelné rychlejší odeznění amplitudy kmitů (ustálení po 1 sekundě) oproti platformě s bezdrátovou sítí



Obrázek 8.5: Srovnání regulace bezdrátovým systémem s neregulovaným nosníkem

(ustálení po 2 sekundách). Delší doba regulace u platformy s bezdrátovou sítí je způsobena nižšími hodnotami koeficientů pro násobení aktuální rychlosti a zrychlení. Konfigurace regulátoru má za následek nižší hodnoty akčního zásahu, regulátor obecně lze hodnotit jako opatrnější. Méně agresivní chování bylo zvoleno jako důsledek hrozících výpadků dat a absence aktuálních hodnot v některých iteracích generování akční veličiny.

Při porovnání průběhu regulace s neregulovaným nosníkem je zřejmý prvotní útlum velkých amplitud kmitů během první vteřiny. Po utlumení amplitudy zrychlení pod 0.25 g již regulátor negeneruje zřejmý akční zásah a průběh je srovnatelný s neregulovaným nosníkem.

Vlastní funkce ovladače byla hodnocena zvlášť. V průběhu regulace nedocházelo ke ztrátám dat při zpracování ovladačem a ovladač nezpůsobil významné zpoždění dat. Funkce ovladače je tedy vyhovující, výkon platformy je limitován zejména schopnostmi hardwaru a síťové infrastruktury.

Cílem budoucího vývoje platformy s bezdrátovými jednotkami a řídicím systémem REX tedy bude odstranění zpoždění při komunikaci dat (například častějším odesíláním aktuálních hodnot) a rozptýlení doby trvání zpoždění (časovou synchronizací komunikační sítě a řídicího systému). Průběh regulace v dokončeném stavu by se měl co nejvíce přibližovat průběhu regulace s platformou DSPACE.

Kapitola 9

Závěr

Mezi cíli práce bylo seznámit autora i čtenáře s bezdrátovými komunikacemi, zejména pak bezdrátovými sensorovými sítěmi. K tomu byl využit prostor v prvních dvou kapitolách, kde je stručně popsán historický vývoj bezdrátové technologie, jsou popisovány některé typy bezdrátových služeb a požadavky kladené na služby při vývoji a nasazování do praxe. Pro přehlednost a snazší orientaci bylo doplněno tabulkové srovnání bezdrátových a drátových komunikačních kanálů. K sensorovým sítím byly dále podrobněji doplněny oblasti aplikace, nejrozšířenější protokoly a specifika problematiky návrhu.

Část prostoru byla věnována bezdrátovým jednotkám V-Mon 4000 a řídicímu systému REX jakožto prostředkům pro realizaci hlavního cíle práce, využití bezdrátových technologií v řídicích systémech. V kapitole o jednotkách V-Mon 4000 byly vyjmenovány jejich hlavní přednosti, popsány podporované typy sensorů a uvedeny technické specifikace. Ve vlastní kapitole byly představeny knihovny funkčních bloků, architektura, a nejzajímavější aplikace řídicího systému REX. Vyšší důraz byl kladen na nástroje pro tvorbu vstupně-výstupních ovladačů systému.

Hlavním cílem této práce bylo vyvinout ovladač, který by umožnil začlenit bezdrátové sensorické jednotky V-Mon 4000 do řídicího systému REX. Výsledkem je ovladač umožňující číst naměřená data z analogových vstupů i vestavěného akcelerometru do řídicího systému. Navíc je podpořeno čtení stavových veličin jednotky V-Mon 4000 (napětí baterie, teplota). Byly podpořeny různé způsoby čtení dat ze sensorických jednotek nebo z bezdrátové brány, která signály z jednotek shromažďuje. Uživatel si tak může zvolit, jestli jednotky či bránu k řídicímu počítači připojí prostřednictvím USB nebo Ethernetu. Omezení nejsou kladena ani na operační systém, podpořeny byly: Windows, Ubuntu Linux a OpenWRT včetně rozšíření reálného času Xenomai.

Na příkladech řídicích platforem založených na stolním počítači a průmyslových počítačích ARK a NexCom v kombinaci s bezdrátovými jednotkami byla vyhodnocena rychlost ovladače pro různé technologie i rychlost celé řídicí platformy. Na základě těchto měření lze zvolit nejvhodnější platformu podle typu aplikace.

Ovladač byl dále otestován na modelu pro aktivní tlumení vibrací vetknutého nosníku. Úloha je specifická požadavky na co nejkratší zpoždění při přenosu dat, minimální toleranci ke ztrátě dat a vysokou frekvenci spouštění regulačního algoritmu. Výsledky byly porovnávány s platformou DSPACE a poukázaly na největší příležitosti ke zlepšení výkonu celé platformy, zejména potřebu synchronizovat řídicí

a komunikační úlohy a zrychlit frekvenci odesílání naměřených dat. Vlastní ovladač byl vyhodnocen jako vyhovující.

Všechny základní požadavky na ovladač byly splněny a vzhledem k objektové struktuře může být ovladač v budoucnu snadno rozšířen o další funkce i například podporu dalšího hardware. Vyvinutý ovladač je připraven k nasazení na pilotních aplikacích, které by odhalily možné slabiny a příležitosti ke zlepšení či doplnění stávající funkcionality.

Literatura

- [1] D. Belson. The akamai state of the internet report. *Akamai's State of the Internet*, 2014.
- [2] Chiara Buratti, Andrea Conti, Davide Dardari, and Roberto Verdone. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors*, 2009.
- [3] T. Casey, D. Denieffe, and G.-M. Muntean. Influence of mobile user velocity on data transfer in a multi-network wireless environment. In *Mobile Wireless Communications Networks*, 2007.
- [4] F. Chollet and HB. Liu. *A (not so) short Introduction to Micro Electromechanical Systems*. <http://memscyclopedia.org/>, 2015.
- [5] Oxford Dictionaries. "communication". Online. Zobrazeno 15.2.2015.
- [6] Ericsson Company. Ericsson mobility report. *Mobile World Congress Edition*, 2015.
- [7] D. Farber. Jobs: Today apple is going to reinvent the phone. *Between the Lines*, 2007.
- [8] T. Farley and M. van der Hoek. Gsm history. *Privateline*, 2006.
- [9] N. Graychase. 'Wireless Fidelity' Debunked. *Wi-Fi Planet*, 2007.
- [10] Peter Harrop and Raghu Das. *Wireless Sensor Networks (WSN) 2014-2024: Forecasts, Technologies, Players*. IDTechEx, 2014.
- [11] Paul J. M. Havinga. Wibrate. *Wibrate Factsheet*, 2011.
- [12] Inertia Technology. *V-Mon 4000 Product Datasheet*, 2014.
- [13] Kas Kalba. *Telecom in the Time of Crash*. IKALBA, 2002.
- [14] Jana Königsmarková and Miloš Schlegel. Parametric jordan form assignment by state-derivative feedback. 2015.
- [15] M. A. Martin and M. M. Islam. *Overview of Wireless Sensor Networks*. InTech, 2012.
- [16] Avijit Mathur and Thomas Newe. Comparison and overview of wireless sensor network systems for medical applications. *Proceedings of the 8th International Conference on Sensing Technology*, 2014.

- [17] A.F. Molisch. *Wireless Communications*. Wiley - IEEE. Wiley, 2010.
- [18] M. Niazi and A. Hussain. Agent-based tools for modeling and simulation of self-organization in peer-to-peer, ad hoc, and other complex networks. *Communications Magazine, IEEE*, 2009.
- [19] Mark Nixon. A Comparison of WirelessHART and ISA100.11a. *Control Global*, 2012.
- [20] E. Ove, A. Molisch, and Tufvesson F. *Wireless communications*. Univerzitní přednášky, 2014.
- [21] Lynnette Reese. *Industrial wireless sensor networks*. Mouser Electronics, 2012.
- [22] REX Controls s.r.o. *Rozhraní ovladačů systému REX – Referenční příručka*, 2005.
- [23] REX Controls s.r.o. *Funkční bloky systému REX – Referenční příručka*, 2013.
- [24] REX Controls s.r.o. *Začínáme se systémem REX na platformě Raspberry Pi*, 2013.
- [25] REX Controls s.r.o. *Ovladač VMonDrv systému REX pro V-Mon 4000 – Uživatelská příručka*, 2015.
- [26] REX Controls s.r.o. *Řídicí systém rex pro pokročilé řízení strojů a procesů*. Online, 2015. Produktový leták.
- [27] Diego Emilio Serrano. Design and analysis of mems accelerometers. *IEEE Sensors 2013*, 2013.
- [28] Kazem Sohraby, Daniel Minoli, and Taieb Znati. *Wireless Sensor Networks*. Wiley-Interscience, 2007.
- [29] Terra X (Produkce), Axel Engstfeld (Režie). *Marconiho neviditelná síť*. Televizní dokument, 2010. Vysíláno na Prima ZOOM 4.11.2014.
- [30] Jan Magne Tjensvold. Comparison of the iee 802.11, 802.15.1, 802.15.4 and 802.15.6 wireless standards. 2007.
- [31] Jan Čížmár. *Současnost a budoucnost inerciálních MEMS senzorů*. 2011.
- [32] ZigBee Alliance. *Zigbee overview*. 2009.

Seznam obrázků

2.1	Marconiho vysílací stanice v Poldhu	7
2.2	Srovnání generací mobilních sítí	10
2.3	Rozmístění vysílačů mobilní sítě	12
2.4	Síť typu ad hoc	15
2.5	Srovnání rozsahu místních sítí s příklady	17
2.6	Datový tok vs dosah bezdrátových systémů	17
2.7	Datový tok vs pohyblivost bezdrátových systémů	19
3.1	Bezdrátová sensorová síť	23
3.2	Topologie typu Star	26
3.3	Topologie typu Mesh	26
3.4	Hybridní topologie Star-Mesh	27
4.1	Bezdrátová sensorová jednotka V-Mon 4000	34
4.2	Princip a struktura MEMS akcelerometru	35
4.3	Piezoelektrický akcelerometr	36
4.4	Schéma připojení jednotky V-Mon 4000 a IEPE akcelerometru	37
5.1	Struktura systému REX	42
5.2	Schéma ovladače systému REX	44
6.1	UML reprezentace ovladače VMonDrv	49
6.2	UML reprezentace aktivit při čtení dat ze sériového portu	54
6.3	UML reprezentace aktivit při čtení dat z rozhraní Ethernet	55
6.4	UML reprezentace tříd pro čtení, rozbor a zpracování dat	56
6.5	Příklad připojení signálů ovladače do řídicího programu	58
7.1	Diagnostické funkce programu RexView	59
7.2	Platforma pro vyhodnocení řídicího systému	60
7.3	Diagram událostí v měřeném systému	61
7.4	Způsob zapojení měřicího okruhu na stolním počítači	63
7.5	Platforma s průmyslovým PC ARK 1503	64
7.6	Platforma s průmyslovým NexCom NISE 3110	65
7.7	Algoritmus pro vyhodnocení rychlosti u stolního počítače	67
7.8	Záznam z měření rychlosti na osobním počítači	67
7.9	Algoritmus pro vyhodnocení rychlosti u počítače ARK 1503	68
7.10	Průběh měření rychlosti u počítače ARK 1503	69
7.11	Algoritmus pro vyhodnocení rychlosti u počítače NexCom	70
7.12	Průběh měření rychlosti u počítače NexCom	71

7.13	Průběh měření rychlosti PCI karty a sériové linky	72
8.1	Model kmitajícího nosníku	73
8.2	Schéma řídicího systému modelu	74
8.3	Algoritmus pro tlumení vibrací v systému REX	75
8.4	Srovnání regulace bezdrátovým systémem a platformou DSPACE . .	76
8.5	Srovnání regulace bezdrátovým systémem s neregulovaným nosníkem	77

Seznam tabulek

2.1	Přehled standardů IEEE 802.11	13
2.2	Srovnání bezdrátových a drátových systémů	22
3.1	Srovnání IEEE standardů pro bezdrátové sítě	28
3.2	Srovnání protokolů pro bezdrátové sensorové sítě	31
4.1	Technické údaje jednotky V-Mon 4000	38
7.1	Srovnání měřených konfigurací na stolním počítači	68
7.2	Výsledky měření počítače ARK 1503	69
7.3	Výsledky měření počítače NexCom	70
8.1	Porovnání parametrů regulátorů	76

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv



www.rexcontrols.cz
www.contlab.eu
www.pidlab.com

Ovladač systému REX pro V-Mon 4000
(modul VMonDrv)

Uživatelská příručka

REX Controls s.r.o.

Verze 2.11
Plzeň
19.4.2015

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,

Obsah

1	Ovladač VMonDrv a systém REX	2
1.1	Úvod	2
1.2	Požadavky na systém	2
1.3	Instalace ovladače na vývojovém počítači	2
1.4	Instalace ovladače na cílovém počítači se systémem Windows	3
1.5	Instalace ovladače na cílovém počítači se systémem GNU/Linux	3
2	Zařazení ovladače do projektu aplikace	4
2.1	Přidání ovladače VMonDrv do projektu	4
2.2	Připojení vstupů a výstupů do řídicího algoritmu	5
2.3	Vstupy jednotky V-Mon 4000	5
3	Konfigurace ovladače	8
4	Konfigurace senzorů a sítě	10
5	Co dělat při problémech	13
	Literatura	14

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,

Kapitola 1

Ovladač VMonDrv a systém REX

1.1 Úvod

V této příručce je popsáno používání ovladače VMonDrv pro komunikaci s bezdrátovými senzorickými moduly V-Mon 4000 [1] v řídicím systému REX. Na všech operačních systémech jsou podpořeny výstupy z interního akcelerometru, analogových vstupů a informace o přijatých sekvencích s časy jejich dekodování. Ovladač také může předávat informace o teplotě, baterii a externím napájení. Ovladač byl vyvinut firmou REX Controls.

1.2 Požadavky na systém

Ovladač VMonDrv lze provozovat na počítačích s operačním systémem Windows a Linux. Při používání ovladače ve variantě komunikace přes USB je vyžadován na cílovém zařízení volný USB port, ve verzi komunikace po sběrnici Ethernet je vyžadována ethernetová karta (podpořeno pouze na systémech Linux).

Aby bylo možno ovladač využívat, musí být na vývojovém a cílovém zařízení nainstalováno programové vybavení:

Vývojový počítač

Operační systém

Vývojové prostředí systému REX

jeden ze systémů: Windows Vista, 7 nebo 8

verze pro operační systém Windows

Cílové zařízení

Runtime jádro systému REX

Ovladač IO

verze pro příslušný operační systém

verze pro příslušný operační systém

1.3 Instalace ovladače na vývojovém počítači

Ovladač VMonDrv se instaluje jako balíček řídicího systému REX. Je obsažen v instalátoru vývojových nástrojů systému REX, pro jeho nainstalování je pouze nutné ho v instalačním programu systému REX zaškrtnout. Po typické instalaci se řídicí systém REX nainstaluje

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,

do cílového adresáře

C:\Program Files\REX Controls\REX_<version>, kde <version> označuje verzi systému REX.

Po úspěšné instalaci se do cílového adresáře zkopírují soubory:

bin\VMonDrv_H.dll – Konfigurační část ovladače VMonDrv.

DOC\VMonDrv_CZ.pdf – Tato uživatelská příručka.

1.4 Instalace ovladače na cílovém počítači se systémem Windows

V případě provozování ovladače VMonDrv na operačním systému Windows (Vista, 7, 8) je cílová část ovladače součástí standardní instalace. Po dokončení instalace je v cílovém adresáři přítomen soubor:

bin\VMonDrv_T.dll – Výkonná část ovladače VMonDrv.

1.5 Instalace ovladače na cílovém počítači se systémem GNU/Linux

Pokud nemáte na cílovém zařízení nainstalovaný aktuální runtime modul RexCore řídicího systému REX, nainstalujte jej podle příslušné příručky [Začínáme s řídicím systémem REX \[2\]](#).

Pro připojení senzorkého uzlu V-Mon 4000 či bezdrátové brány nainstalujte ovladač systému REX pro V-Mon 4000, což lze provést z příkazové řádky zadáním příkazu:

Debian:

```
sudo apt-get install rex-vmondrv
```

OpenWrt:

```
opkg install rex-vmondrv
```

OpenWrt s rozšířením Xenomai:

```
opkg install rex-vmondrv-xeno
```

,

Kapitola 2

Zařazení ovladače do projektu aplikace

Zařazení ovladače do projektu aplikace spočívá v přidání ovladače do hlavního souboru projektu a připojení vstupních signálů v řídicích algoritmech.

2.1 Přidání ovladače VMonDrv do projektu

Přidání ovladače VMonDrv do hlavního souboru projektu je znázorněno na obr. 2.1. Pro zařazení ovladače do projektu slouží dva bloky. Nejprve je na výstup `Modules` bloku exekutivy `EXEC` připojen blok typu `MODULE` s názvem `VMonDrv`, který nemá žádné další parametry.

Druhý blok `VMON` typu `IODRV`, připojený na výstup exekutivy `Drivers` má tři nejdůležitější parametry:

`module` – jméno modulu, ke kterému se ovladač váže, v tomto případě `VMonDrv` – POZOR, jméno rozlišuje velká a malá písmena!

`classname` – jméno třídy ovladače, které je pro tento ovladač `VMonDrv` – POZOR, jméno rozlišuje velká a malá písmena!

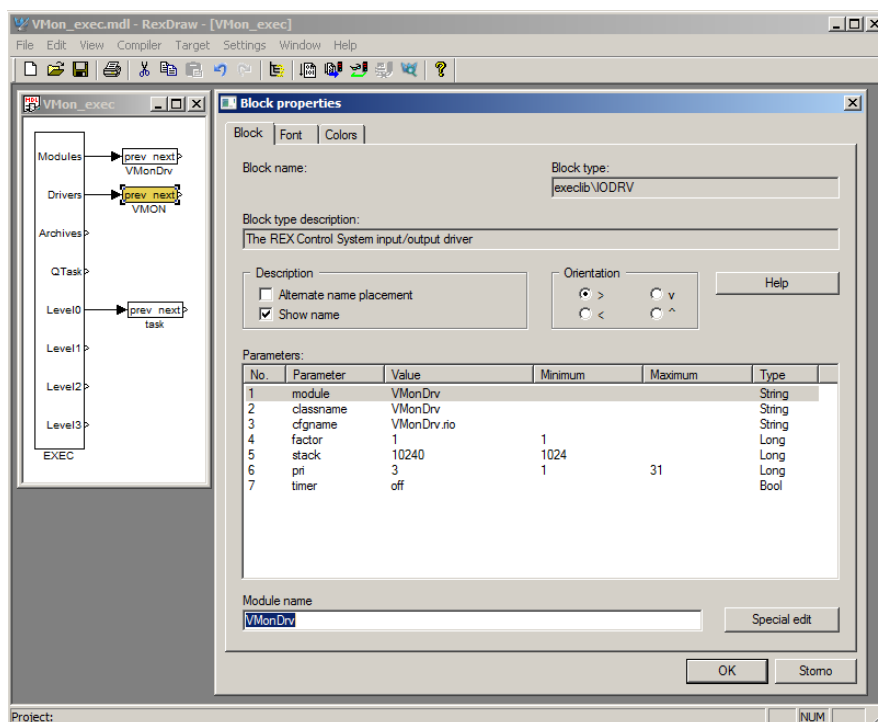
`cfgname` – jméno konfiguračního souboru ovladače, doporučeno je volit ve formátu `<jméno_třídy>.rio`, kde přípona `.rio` (Rex Input Output) byla zavedena pro tento účel. Postup vytváření konfiguračního souboru je popsán v kapitole 3.

Jménem tohoto bloku, na obr. 2.1 zadaným jako `VMON`, začínají názvy všech vstupních a výstupních signálů poskytovaných tímto ovladačem.

Právě popsané parametry bloku `IODRV` se konfiguruje v programu `RexDraw` v dialogovém okně, které je rovněž ukázáno na obrázku 2.1.

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,



Obrázek 2.1: Příklad zařazení ovladače VMonDrv do projektu aplikace

2.2 Připojení vstupů a výstupů do řídicího algoritmu

Vstupy a výstupy z ovladače se umísťují do jednotlivých úloh projektu (souborů s příponou .mdl). Na tyto úlohy vedou z hlavního souboru projektu odkazy ve formě bloků typu TASK nebo QTask připojovaných na výstupy QTask, Level0, ..., Level13 hlavního konfiguračního bloku exekutivy (blok EXEC).

2.3 Vstupy jednotky V-Mon 4000

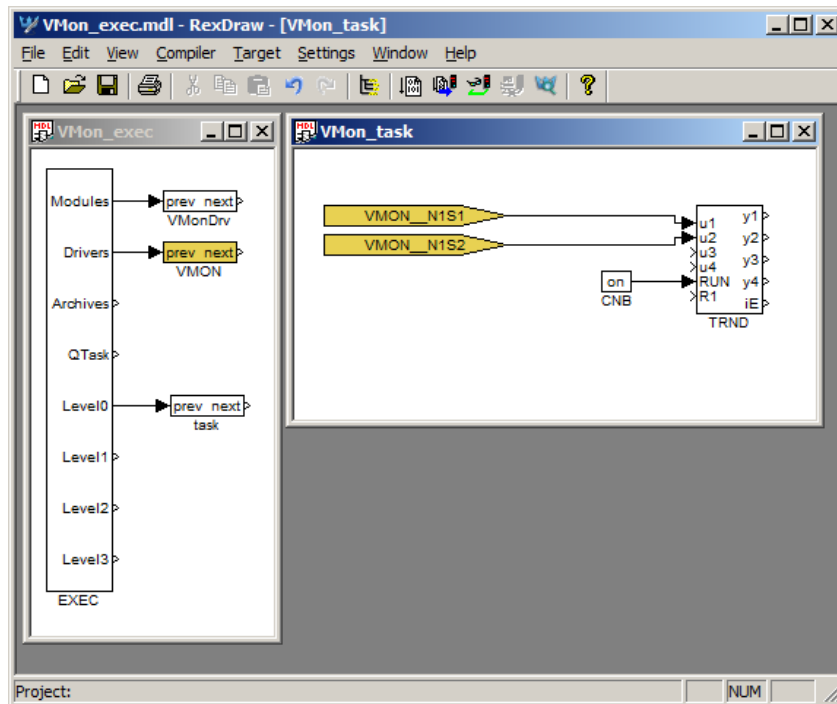
Pro práci se vstupně-výstupními signály ovladače VMonDrv v řídicích algoritmech systému REX lze použít bloky, znázorněné na obr. 2.2.

Jeden blok typu From sloužící pro připojení jednoho vstupu má parametr Goto tag roven VMON__N1S1, druhý VMON__N1S2. Číslo ve vlajce u písmena N odpovídá identifikačnímu číslu uzlu (node) – více v kapitole 3. Číslo za písmenem S je pořadové číslo signálu. U některých typů signálů lze použít místo kombinace S s číslem zástupný symbol (kompletní seznam je v tabulce 2.1). Bloky mají vždy přímo na začátku svého jména prefix VMON následovaný dvěma znaky _ (podtržítka).

Napojení na signál se tedy skládá ze jména driveru VMON, dvou podtržítka __, písmene

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,



Obrázek 2.2: Příklady použití vstupních bloků s ovladačem VMonDrv

(N) a identifikačního čísla uzlu, písmene (S) a pořadového čísla signálu (nebo zástupného symbolu).

Protože signály lze rozdělit do logických skupin (analogové vstupy, akcelerometr, stavové informace), je možné v algoritmu použít bloky čtyřnásobných vstupů (INQUAD). Výhodou takového užití je zvýšení rychlosti a částečně i přehlednosti algoritmů. Pojmenování bloků pro čtyřnásobné vstupy jsou v tabulce 2.2. Podrobný popis bloků vícenásobných vstupů lze nalézt v příručce Funkční bloky systému REX [3].

Všechny podporované vstupní bloky jsou součástí příkladu v instalačním adresáři v podsložce

`\EXAMPLES\IODRV\VMON_Example`

Stavové informace (signály S18 - S21) jsou dostupné pouze při použití verze pro Windows v kombinaci s knihovnou Boost (hardwarová konfigurace 4 v kapitole 3).

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,

Číslo signálu	Význam	Zástupný symbol
S1	Analogový vstup 1	–
S2	Analogový vstup 2	–
S3	Analogový vstup 3	–
S4	Analogový vstup 4	–
S6	Akcelerometr složka x	ax
S7	Akcelerometr složka y	ay
S8	Akcelerometr složka z	az
S10	Kompas složka x	cx
S11	Kompas složka y	cy
S12	Kompas složka z	cz
S14	Gyroskop složka x	gx
S15	Gyroskop složka y	gy
S16	Gyroskop složka z	gz
S18	Baterie	bat
S19	Teplota	temp
S20	Externí napájení	extI
S22	Čas mezi posledními dvěma vzorky	tDelay
S23	Časová značka posledního vzorku	tsLast
S24	Číslo poslední přijaté sekvence	seqNo

Tabulka 2.1: Seznam vstupních signálů

Číslo signálu	Význam	Zástupný symbol
S5	Všechny analogové signály	S
S9	Všechny signály akcelerometru	A
S13	Všechny signály kompasu	C
S17	Všechny signály gyroskopu	G
S21	Stavové signály	stat

Tabulka 2.2: Seznam čtyřnásobných vstupů

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,

Kapitola 3

Konfigurace ovladače

Konfigurace ovladače je definována v souboru *.rio, uvedeném v příslušném bloku typu IODRV (více v sekci 2.1). Soubor typu *.rio je možné upravovat v textovém editoru. Základní struktura je následující:

```
VMonDrv {  
  Config 4  
  ComName "COM6"  
  Node {  
    NodeID 1  
    SignalCount 4  
  }  
  Node {  
    NodeID 4  
    SignalCount 2  
  }  
}
```

Jednotlivé řádky mají tento význam:

VMonDrv – Vymezuje sekci, týkající se ovladače VMonDrv

Config – Číselné označení konfigurace z tabulky 3.1

ComName – Název připojovacího portu (možnosti jsou vyjmenovány v tabulce 3.1)

Node – Vymezuje sekci, definující uzel

NodeID – ID uzlu, lze nalézt v sériovém čísle uzlu či přes konfigurační nástroj Inertia Studio

SignalCount – Počet aktivních analogových vstupů uzlu

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,

Číslo konfigurace	Význam	Připojovací porty [x značí číslo portu]
1	OS Linux, připojení přes Ethernet	"edevx"nebo "ethx"
2	OS Linux, připojení přes USB	"/dev/ttyACMx"
3	OS Windows	"COMx"
4	OS Windows s využitím knihovny Boost	"COMx"

Tabulka 3.1: Seznam přípustných konfigurací ovladače a příslušných připojovacích portů

Identifikační číslo uzlu lze zjistit při pohledu na štítek zařízení, poslední čtyři číslice odpovídají unikátnímu ID (obr. 3.1). Druhou možností je použití programu Inertia Studio, kde je identifikační číslo uvedeno v pravém spodním rohu spolu se stavovými informacemi o uzlu (na obr. 4.1).



Obrázek 3.1: Identifikační číslo uzlu na štítku

Při připojování signálů na základě výše uvedené konfigurace bude první analogový vstup z uzlu s ID 1 na vlajce VMON__N1S1. První analogový vstup z uzlu s ID 4 lze číst vlajkou VMON__N4S1.

,

Kapitola 4

Konfigurace senzorů a sítě

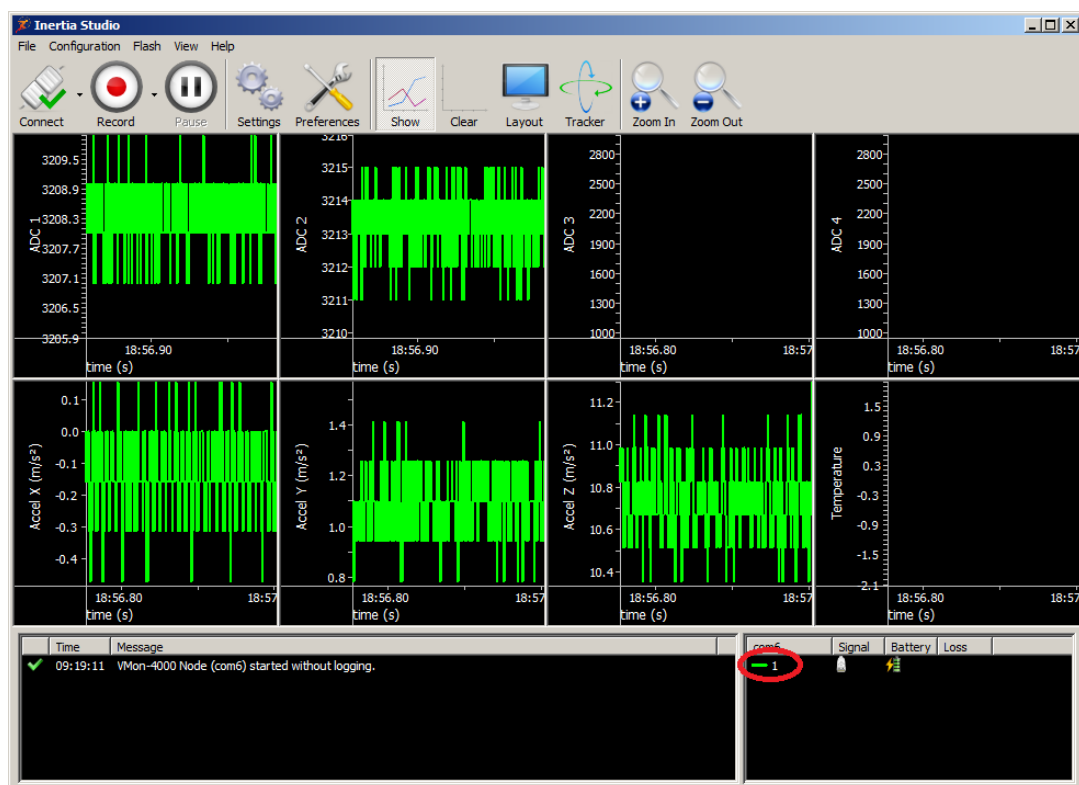
Pro konfiguraci sítě a jednotlivých uzlů použijte nástroj Inertia Studio (na obrázku 4.1). Program také poskytuje informace o aktivních uzlech, jejich ID, stav baterie a sílu signálu. Při konfiguraci věnujte zvýšenou pozornost nastavení globální vzorkovací frekvence (obr. 4.2) a vzorkovací frekvence jednotlivých snímačů (obr. 4.3). Pro správnou funkci ovladače musí být všechny zmíněné frekvence stejné.

Pro dosažení maximální rychlosti zpracování a přenosu dat doporučujeme nastavit rychlost na 1000 Hz. Při této vzorkovací frekvenci je v každém přenášeném paketu jeden vzorek. Při vyšší vzorkovací frekvenci jsou snímané hodnoty seskupovány do paketů, pakety jsou ale stále odesílány s frekvencí 1000 Hz. Ovladač předává na vlajku do řídicího algoritmu vždy poslední (nejnovější) hodnotu. Ostatní hodnoty v paketu jsou nevyužity.

Pro více informací o nastavení bezdrátové sítě a sensorických jednotek, typech podporovaných senzorů a parametrech jednotky V-Mon 4000 doporučujeme přečíst Uživatelský manuál k systému V-Mon 4000 [4].

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

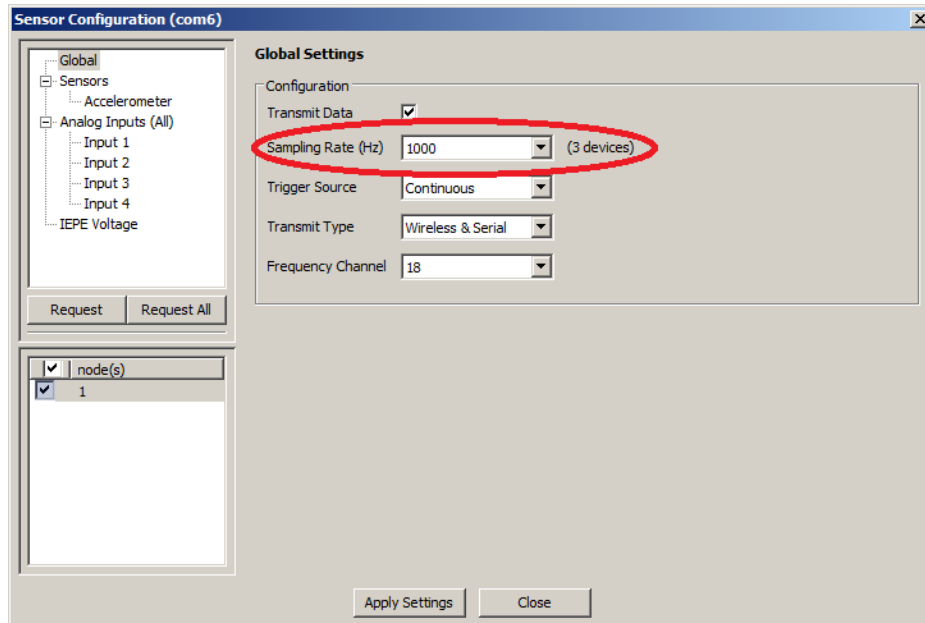
1



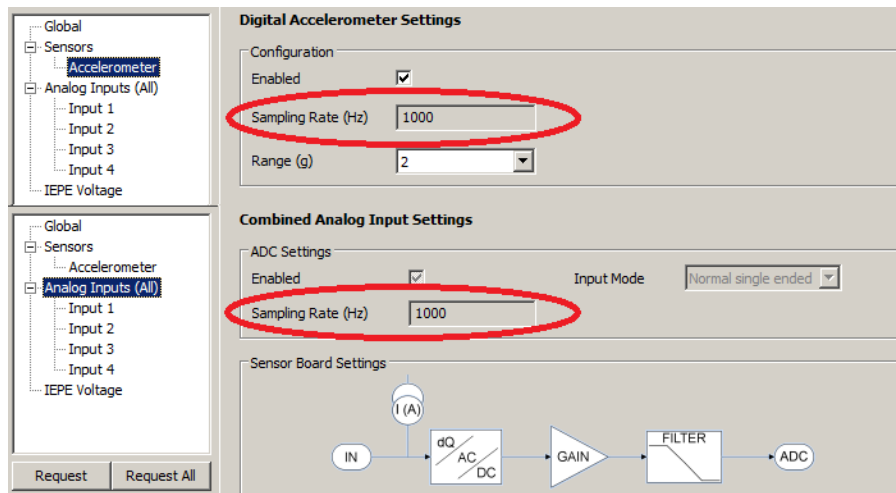
Obrázek 4.1: Hlavní obrazovka programu Inertia Studio a zvýrazněné ID uzlu

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

9



Obrázek 4.2: Globální nastavení sítě



Obrázek 4.3: Nastavení senzorů jednotky V-Mon 4000

,

Kapitola 5

Co dělat při problémech

V případě, že v diagnostických prostředcích systému REX, např. v programu RexView jsou neočekávané nebo nesprávné hodnoty vstupů, je vhodné nejdříve ověřit jejich funkci nezávisle na systému REX. Dále je nutné přezkontrolovat konfiguraci. Nejčastější chyby jsou:

Chyba v hardware - špatné zapojení

Použitý (nakonfigurovaný) port je využíván jiným programem

ID uzlu v bloku **From** není uvedeno v **.rio** souboru (Invalid context)

Zástupný symbol v bloku **From** je neplatný (Invalid input mask)

Pro vícenásobný vstup byl použit blok **From** (Range check error)

V případě, že daný vstup či výstup funguje pomocí jiných softwarových nástrojů správně a při shodném zapojení v systému REX nefunguje, prosíme o zaslání informace o problému emailem na adresu podpora@rexcontrols.cz. Pro co nejrychlejší vyřešení problému by informace by měla obsahovat:

- Identifikační údaje Vaší instalace vyexportované pomocí programu RexView (Target → Licence → Export).
- Stručný a výstižný popis problému.
- Co možná nejvíce zjednodušenou konfiguraci řídicího systému REX, ve které se problém vyskytuje (ve formátu souboru s příponou **.mdl**).

Příloha 1 - Uživatelská příručka k ovladači VMonDrv

,

Literatura

- [1] Inertia Technology. V-Mon 4000. <http://inertia-technology.com/v-mon-4000-series>, 2014.
- [2] REX Controls s.r.o.. *Začínáme se systémem REX na platformě Raspberry Pi*, 2013.
- [3] REX Controls s.r.o.. *Funkční bloky systému REX – Referenční příručka*, 2013.
- [4] Inertia Technology. V-Mon 4000 user manual.