

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 248

ISSN 1213-418X

Zdeněk Bradáč

**HIERARCHICKÉ
DECENTRALIZOVANÉ
SYSTEMY ŘÍZENÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav automatizace a měřicí techniky

Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.

HIERARCHICKÉ DECENTRALIZOVANÉ SYSTÉMY ŘÍZENÍ

HIERARCHICAL DECENTRALIZED CONTROL SYSTEMS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

Správa decentralizovaných systémů řízení, formální model, grafová reprezentace, lineární programování, optimální mapovací problém, optimální routovací problém, komunikační standardy, metalické sběrnice, bezdrátové sběrnice, ...

KEYWORDS

Decentralized Control System Management, Formal Model, Graph Presentation, Linear Programming, Optimal Mapping Problem, Optimal Routing Problem, communication standards, metallic buses, wireless communication, ...

HABILITAČNÍ PRÁCE JE ULOŽENA:

Ústav automatizace a měřicí techniky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Kolejní 4
612 00 Brno
Czech Republic

OBSAH

ODBORNÁ CHARAKTERISTIKA UCHAZEČE	4
1 ÚVOD	5
2 STRUKTURA HIERARCHICKÝCH DECENTRALIZOVANÝCH SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ.....	7
2.1 Hardwarová struktura řídicích systémů	7
2.2 Vysoká bezpečnost a spolehlivost řídicích systémů [BraIeeeIcit03-2] [BraElsevier03-1]	11
2.3 Formální popis hierarchických decentralizovaných systémů řízení [BraRip2002]	12
3 KOMUNIKACE V AUTOMATIZACI	14
3.1 Nonverbální komunikace	14
3.2 Verbální komunikace	14
3.3 Komunikační sběrnice a standardy	15
3.3.1 <i>Klasické průmyslové sběrnice</i>	15
3.3.2 <i>Ethernet a jeho penetrace do průmyslu</i>	15
3.3.3 <i>Bezdrátové komunikační standardy</i>	16
3.3.4 <i>Zabezpečení bezdrátových PAN sítí</i>	17
4 ZÁVĚR.....	18
SLOVNÍK ZKRATEK	20
POUŽITÁ LITERATURA	21
ABSTRAKT (CZ).....	24
ABSTRACT (EN).....	24

ODBORNÁ CHARAKTERISTIKA UCHAZEČE



Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D. se narodil 27. září 1973 v Brně. Po vystudování základní školy nastoupil ke studiu na Střední průmyslovou školu elektrotechnickou na Kounicově ulici v Brně, kde studoval obor se zaměřením na automatizační techniku a kybernetiku. Po složení maturity byl přijat na Vysoké učení technické v Brně, Fakultu elektrotechniky a informatiky, kde vystudoval magisterský studijní obor „Kybernetika, automatizace a měření“ s vyznamenáním. Po obhajobě diplomové práce byl přijat na postgraduální studium na téže fakultě, kde nastoupil do studijního oboru „Kybernetika, automatizace a měření“.

V roce 2004 obhájil doktorský titul na disertační práci na téma „Správa decentralizovaných automatizačních systémů“. Od téhož roku je zaměstnán jako odborný asistent na Ústavu automatizace a měřicí techniky, FEKT VUT v Brně.

V průběhu své pedagogické práce se účastnil výuky předmětů bakalářského i magisterského studijního programu, včetně samopláteckého studia. Vyučoval předměty jako „Programovatelné automaty“, „Automatizační prostředky“, „Prostředky průmyslové automatizace“ a „Počítače pro řízení“. Dále v rámci zaměstnaneckého poměru na FEKT VUT v Brně zavedl do výuky nové akreditované předměty jak v bakalářském, tak i navazujícím magisterském studijním programu a to konkrétně „Počítače pro řízení“ a „Embedded systems for industrial control“.

V rámci vědecké činnosti se stal řešitelem několika grantů FRVŠ a MPO Tandem a Impuls. Dále spolupracoval na řešení více než 15 dalších projektů FRVŠ a GAČR. Taktéž se účastnil čtyř výzkumných záměrů, přičemž v jednom projektu je garantem daného výzkumného záměru na UAMT. V rámci publikační činnosti se zaměřil nejen na významné národní a mezinárodní konference a sympozia, ale publikoval v několika významných zahraničních impaktovaných časopisech.

V oblasti popularizace vědy a výzkumu publikoval celou řadu prací v národních vědeckých a odborných periodikách. V současné době se nejvíce věnuje oblasti průmyslových řídicích systémů a komunikací, přičemž hlavní roli v oblasti vědy a výzkumu hrají bezdrátové komunikační technologie.

1 ÚVOD

K zásadním otázkám řídicích systémů v automatizační praxi patří otázky týkající se struktury a funkčnosti řídicích systémů. Struktura řídicích systémů, koncepce automatizačních struktur a programová vybavenost takovýchto systémů vychází nejen z inženýrské praxe mnoha odborníků, ale i z vědecko-technického pojetí zkoumání zákonitostí systémů a struktur. Využitelnost a výtěžnost znalostí souvisejících s technickou stránkou konstrukce a návrhu systémů řízení souvisí jednak s pokrokem v oblasti zavádění nových poznatků jednak z vědeckého okruhu zkoumání a jednak z technických znalostí a zkušeností inženýrů v mnoha oblastech lidské činnosti. Základním aspektem návrhu a konstrukce kvalitního řídicího systému je využití kolektivních znalostí a zkušeností z širokého spektra technických a vědeckých oborů.

Z teologicko-teoretického hlediska je možné nahlížet na návrh, projektování a tvorbu řídicího systému jako na paralelu k teologickému pohledu světa a stvoření. Teologický pohled na stvoření vychází z předpokladu existence nadřazené entity, která z vlastní inteligence tvoří daný systém podle svých požadavků, představ a záměrů. V některých náboženských směrech je možné sledovat tvořící entitu založenou na jediné entitě (což popisuje tzv. monoteismus) případně na kombinaci záměrů více entit (což v teologii popisuje tzv. polyteismus). Podobné paralely je možné v širokém kontextu nalézt v technicko-vědecké praxi při tvorbě nejen řídicích systémů, ale v obecném kontextu v pohledu na většinu lidské činnosti. Pokud odhlédneme od teologického hlediska srovnání, můžeme najít další paralely v návrhu a konstrukci systémů řízení s existencí společensko-humanitního pohledu na komunitní společnost. Vzhledem k přiblížení ekvivalence technického a sociálně-společenského zaměření systémů řízení budou v práci uvedeny paralely související s sociálně-společenskou strukturou lidské společnosti.

V obecném technickém pohledu je možné vyzorovat z historického hlediska i současného stavu, že se struktura řídicích systémů v oblasti řízení procesů a technologií vyvíjela nejdříve od samostatných tzv. stand-alone řídicích systémů komunikujících pouze s řízeným systémem/procesem případně s lidským operátorem, přes homogenní řídicí systémy, které již vykazují schopnosti vzájemné komunikace jednotlivých entit, až po heterogenní řídicí struktury s nejšířšími schopnostmi komunikace a řízení. Strukturu řídicího systému je dále možné charakterizovat ve dvou technicko-technologických směrech a to ve vertikální a horizontálním členění. V této charakteristice vertikálního nebo horizontálního popisu komplexních systémů řízení je možné obecně hovořit o systémech decentralizovaných. Nejflexibilnější variantou zahrnující vertikální i horizontální dělení je hierarchický decentralizovaný systém řízení (HDCS), který je v heterogenním pohledu nejkompaktnější.

Předložená práce bude zaměřena na charakteristiku hierarchických decentralizovaných řídicích systémů, postavených na základě heterogenní množiny řídicích, výkonových a komunikačních subsystémů. Charakteristickou součástí hierarchických decentralizovaných systémů řízení je komunikační subsystém v horizontální a vertikální linii systému. Tento komunikační subsystém bude diskutován ve srovnání s ekvivalenty v lidské společnosti, kde je možné nalézt paralely, které se zřejmě staly modelem pro tvorbu komunikačních struktur řídicích systémů. Ekvivalenci je možné vysledovat nejen v oblasti sémantiky, ale i syntaxe komunikačních systémů. Jako další ekvivalent ve srovnání s lidským společenstvím bude uvedena vědecká aplikace nonverbální komunikace v oblasti vzájemné komunikace skupiny mobilních robotů bez možnosti přímé komunikace běžným komunikačním kanálem. Nedílnou, avšak vzhledem k rozsáhlosti a komplexnosti problému oddělenou kapitolou v teorii řídicích systémů je oblast zajištění vysoké funkčnosti a spolehlivosti distribuovaných řídicích systémů, tak zvané fault-tolerant. Tato oblast je vysoce diskutovanou problematikou zvláště vzhledem k problematice stále rostoucí komplexnosti a rozsáhlosti řídicích systémů. Je jistě možné prohlásit, že u systému bez zálohování s rostoucí komplexností a rozsahem komponent výrazně klesá spolehlivost systému jako celku. Tato teze platí nejen ve vztahu ke komplexnosti a rozsahu hardwarových komponent, ale v poslední době

i ve vztahu k programovému vybavení. Z tohoto důvodu se bude jedna z kapitol této práce zabývat formálním popisem hierarchických decentralizovaných systémů řízení jako jedné z nejkompexnějších heterogenních řídicích struktur. Možné je i rozšíření na totálně decentralizované systémy řízení, které v konečném pohledu mohou být zařazeny jako podmnožina hierarchických decentralizovaných systémů řízení. Formální metodika diskutovaná v této práci se bude zabývat matematicko-grafickým popisem hierarchického decentralizovaného systému řízení tak, aby tato reprezentace byla jednoduše pochopitelná a použitelná odborníky na úrovni technických inženýrů a úrovni jejich znalostí. Matematické metody popisu a jejich extrakce z grafického popisu jako základního jazyku pro komunikaci s uživateli jsou již na úrovni mimo běžné znalosti uživatelů a budou diskutovány na vyšší odborné úrovni. Formální popis a matematické metody popisu a řešení cílových úloh konfigurace a optimalizace hierarchického decentralizovaného systému řízení jsou zaměřeny nejen na off-line optimalizaci a konfiguraci řídicího systému na úrovni správy hierarchického decentralizovaného systému, ale i na řešení úloh on-line rekonfigurace a řešení problémů související se zajištěním vysoké spolehlivosti a funkčnosti systému na základě využití vestavěných nadbytečných zdrojů, to znamená řešení problémů fault-tolerant a fail-stop systémů.

Nedílnou součástí hierarchických systémů řízení, ale nejen jejich, je komunikační subsystém, který se obvykle skládá z různých typů komunikačních sběrnic. Tyto sběrnice vzhledem k pohnutkám svého zrodu a standardizaci vychází často z různých požadavků, které nejsou vždy definovány průmyslem a požadavků na řízení technologií a procesů. Tento handicap ovšem v mnoha případech není překážkou k rozšíření té či oné technologie do průmyslového prostředí. Bohužel původní požadavky stojící při návrhu a vzniku takového konkrétního komunikačního standardu v určitých aspektech diskriminují daná standard v oblasti řízení. Přes to je však možné v oblasti technické praxe nalézt širokou rodinu komunikačních standardů importovaných z oblasti kancelářského, osobního a domácího využití případně z IT do oblasti řízení. Z tohoto důvodu je možné v oblasti řízení a v heterogenních hierarchických decentralizovaných systémech nalézt různé komunikační sítě na bázi drátového spojení (takzvané metalické sítě), přes optické sítě až po sítě bezdrátové. V předložené práci budou tudíž uvedeny kapitoly vztahující se jednak k metalickým komunikačním standardům, tak i k rodině bezdrátových komunikačních standardů.

2 STRUKTURA HIERARCHICKÝCH DECENTRALIZOVANÝCH SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ

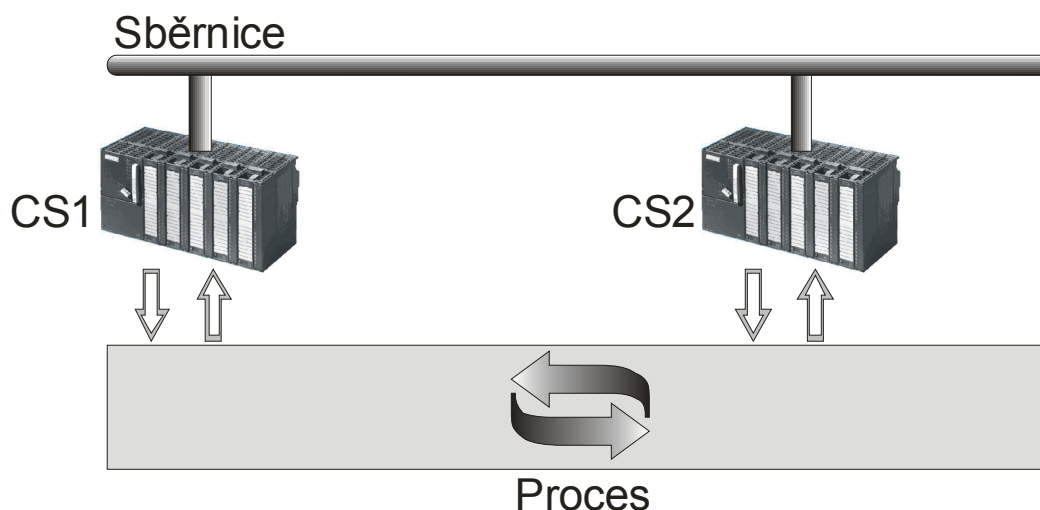
V počátcích projektování a tvorby řídicích systémů v technické praxi byly schopnosti návrhu řídicích systémů velmi omezené. Toto omezení vyplývalo z úrovně technologických znalostí a poznání. Vzhledem k rychlému rozvoji elektroniky a teorie řízení v průběhu 20. století došlo k výraznému rozvoji nejen na poli technického řešení řídicích systémů, ale i na poli implementace řídicích postupů a algoritmů. Je známo několik řídicích struktur, které se v minulosti využívaly k řízení technologií a systémů, přičemž velká část z nich nachází uplatnění i v dnešní době. Jako typické reprezentanty řídicích struktur jmenujme následující systémy:

- Stand-alone řídicí systém
- Centralizovaný řídicí systém
- Decentralizovaný řídicí systém
- Hierarchický decentralizovaný řídicí systém

Jednotlivé systémy se liší především v horizontálním a vertikálním dělení své struktury.

2.1 HARDWAROVÁ STRUKTURA ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ

V počátcích implementace řídicích systémů byly vytvářeny systémy na nejnižší úrovni, takzvané stand-alone řídicí systémy. Stand-alone řídicí systémy se vyznačovaly centralizací veškerých řídicích funkcí do jednoho řídicího systému, případně do jediného řídicího rozvaděče. Postupem času se začínají rozvíjet decentralizované systémy řízení, které se v počátcích vyznačovaly vertikální strukturou, kde několik homogenních systémů komunikovalo mezi sebou, přičemž v hierarchickém pohledu byly tyto systémy rovnocenné jak ukazuje [Obrázek 2.1](#).

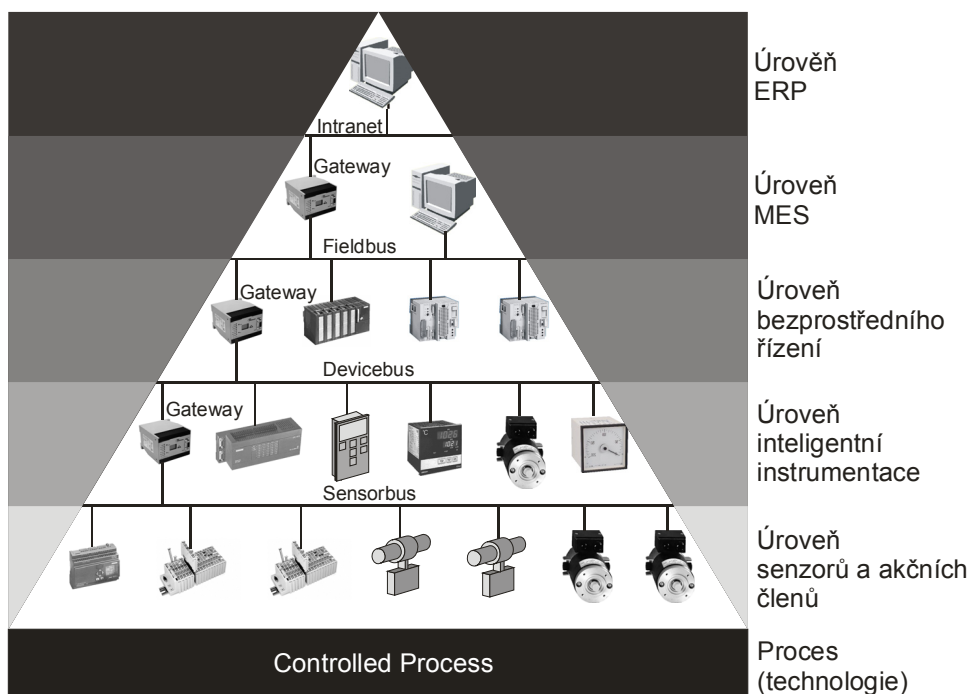


Obrázek 2.1 – Struktura decentralizovaného jednovrstvého systému řízení

Takovéto decentralizované struktury jsou vhodné na úrovni řízení malých až středních systémů a procesů. Na počátku jejich implementace se hojně využívaly především malé řídicí systémy založené na jednoúčelové logice či mikrokontrolérech. Vzhledem k rychlému vývoji se začaly objevovat specializované řídicí systémy nazvané jako programovatelné logické automaty – PLC (Programmable Logic Controller). Schopnosti těchto prvotních řídicích komponent se stále rozšiřovaly a byly do nich přidávány stále nové možnosti a to hlavně speciální funkce práce s daty a diskrétní regulace. Taktéž s vývojem v oblasti elektroniky se začaly stále častěji spojovat

heterogenní systémy, což se však neobešlo bez problémů. Většina implementátorů řídicích systémů byli vlastně konstruktéři, kteří vytvářeli uzavřené portfolio řídicích systémů propojovaných vlastními proprietárními sběrnicemi. Tento intenzivní přístup výrazně omezoval schopnosti spolupráce komponent různých výrobců, kteří výrazně preferovali vlastní výrobní portfolia.

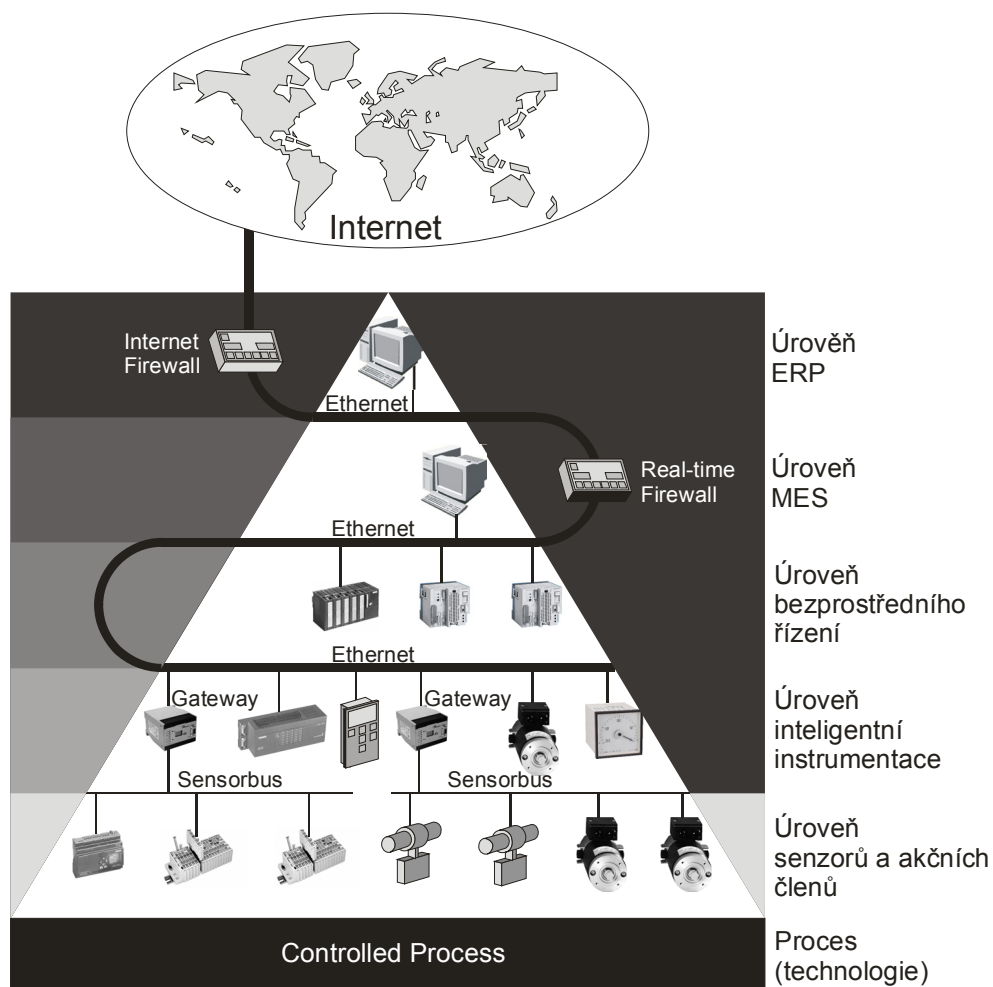
Vlivem rychlého rozvoje mikroelektroniky a rozvoje komunikačních technologií byly stále častěji realizovány decentralizované struktury, které obvykle zahrnovaly komponenty různých výrobců. K této filozofické změně vedly nadnárodní aktivity směřující k ustavení mezinárodních standardů a taktéž k průniku různých standardů z oblasti IT do průmyslového prostředí. Příklon ke standardizaci komponent a jejich rozhraní do oblasti průmyslu byl přejat především z oblasti IT, kde bylo ustanoveno jen několik málo standardů jako standard PC, Ethernet IEEE 802.3, WiFi IEEE 802.11 a podobně. Obdobný přístup se postupně začal projevovat i v oblasti procesního řízení, kde jednotliví výrobci upravují své systémy tak, aby byly schopné kooperace a koexistence se systémy jiných výrobců. Výsledkem je možnost tvorby vícevrstvého decentralizovaného systému řízení, který zavádí i horizontální členění řídicí struktury viz. [Obrázek 2.2](#).



Obrázek 2.2 – Struktura vícevrstvého decentralizovaného systému řízení

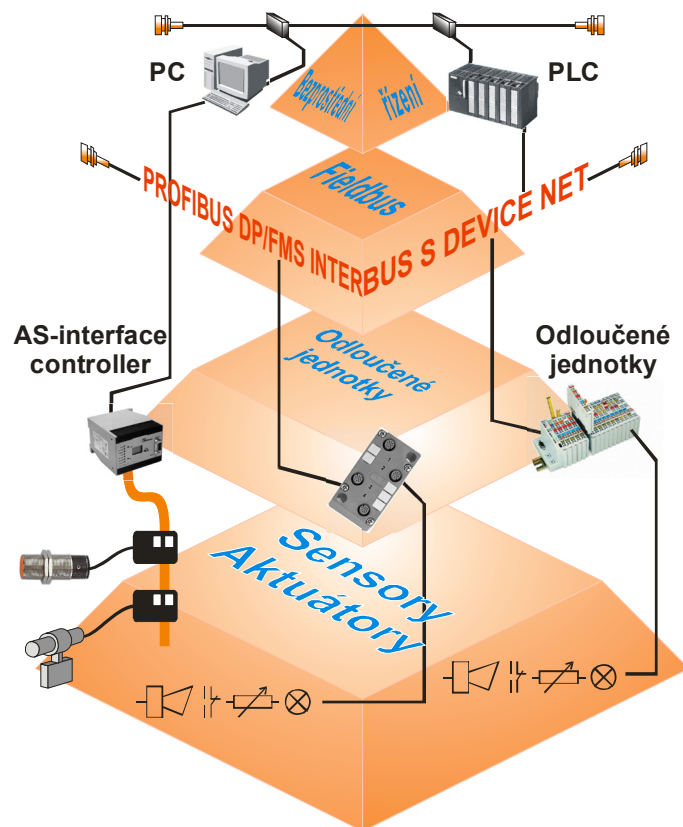
Masivní penetraci standardů z oblasti IT do oblasti průmyslového řízení je možné demonstrovat implementací standardu Ethernet do oblasti průmyslové komunikace. V současné době existuje několik rozdílných implementací standardu Ethernet a jeho přizpůsobení pro průmyslové využití. Je možné přijmout výklad, že prakticky každý významný výrobce automatizační techniky má ve svém portfoliu nějaký komunikační standard založený na původním standardu IEEE 802.3 Ethernet. Obdobně je možné uvést další standardy typu Bluetooth, WiFi, USB, FireWire a další, které postupem času našly uplatnění v průmyslové sféře.

Díky tomuto extenzivnímu vývoji byla oblast procesního řízení obohacena tak, že bylo možno definovat strukturu hierarchických decentralizovaných systémů řízení založených na heterogenních produktech.



Obrázek 2.3 – Struktura hierarchického decentralizovaného systému řízení

Z pohledu teoretického řízení se tato struktura přibližuje totálně decentralizovanému řízení s plnou koordinací jednotlivých systémů. Strukturu hierarchického decentralizovaného řídicího systému můžeme charakterizovat popisem viz. [Obrázek 2.3](#), který zahrnuje heterogenní strukturu vícevrstvého decentralizovaného řídicího systému se standardními prvky, kde příkladem je interní síť Ethernet.



Obrázek 2.4 – Degenerovaná struktura hierarchického decentralizovaného systému řízení

Z obecného pohledu je možné charakterizovat hierarchický decentralizovaný systém tak, že je složen z vertikálního pohledu z několika vrstev, přičemž vyšší vrstvy jsou v rámci řízení hierarchicky nadřazeny vrstvám nižším. Každá vrstva v rámci horizontálního členění je složena z kooperujících entit, které jsou v rámci hierarchického členění na stejné funkční úrovni. Velké množství řízených procesů a technologií však nevyžaduje implementaci této úplné hierarchické decentralizované struktury. Z tohoto důvodu se mnohdy implementuje pouze degenerovaná struktura, která je však z funkčního hlediska dostatečná pro daný proces/technologie. Takovou degenerovanou strukturu popisuje třeba následující [Obrázek 2.4](#). Je evidentní, že tato degenerovaná struktura je schopná plnit definované řídicí funkce při existenci jenom několika vrstev, přičemž ve vztahu ke struktuře viz. [Obrázek 2.2](#) (potažmo [Obrázek 2.3](#)) je úroveň inteligentní instrumentace charakterizována odloučenými jednotkami a vrstva bezprostředního řízení je charakterizována úrovněmi „Fieldbus“ a „Bezprostřední řízení“.

Součástí hierarchického decentralizovaného systému řízení, který je nadmnožinou všech ostatních degenerovaných řídicích struktur, jsou i komunikační struktury. Jedná se o široké spektrum proprietárních komunikačních standardů doplněných množstvím mezinárodních standardů, jenž jsou široce přijímány a podporovány, případně odmítány. Komunikační subsystém hierarchického systému řízení je jeho nedílným a základním stavebním kamenem. Jelikož existuje nepřehledné množství standardů a komunikačních technologií, není nezbytné je zde jmenovat. Důležité je však dělení komunikačních struktur z pozice konstrukce a možností [*ZezMono04*]:

Komunikační sběrnice

- komunikační svazek
 - paralelní sběrnice (GPIB, ...)
 - sériová sběrnice (Profibus DP, AS-i, ...)
- médium
 - metalické (Ethernet, ...)
 - optické (FDDI, ...)
 - bezdrátové (WiFi, IEEE 802.15.4, ...)
- struktura komunikačního média
 - jednosvazková (Ethernet, AS-i, ...)
 - vícesvazková (CDDI, FDDI, ...)

Jak je z výše uvedených popisů vidět, základní řídicí struktury se skládají z hardwarových komponent, a to buď programovatelných, konfigurovatelných, parametrizovatelných nebo jen jednoúčelových a dále pak z komunikačního podsystému, tvořeného jednou nebo více komunikačními sběrnicemi s různými parametry.

2.2 VYSOKÁ BEZPEČNOST A SPOLEHLIVOST ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ [BRAIEEEICIT03-2] [BRAELSEVIER03-1]

Z předchozího úvodu do struktury hierarchických decentralizovaných systémů řízení je vidět, že komplexnost takového systému může být u různých implementací rozdílná. Naneštěstí komplexnost systémů neustále rychle narůstá. Z matematické teorie spolehlivosti vyplývá, že u systémů bez zálohování při rostoucí komplexnosti systému (množství komponent) významně vzrůstá pravděpodobnost poruchy a tudíž analogicky klesá spolehlivost celého systému.

Základní problematikou spolehlivosti a bezpečnosti řídicích systémů se zabývají publikované články autora viz [BraIeeeIcit03-2] a [BraElsevier03-1]. Tyto články prezentované na renomované IEEE konferenci a dále v knize vydané nakladatelstvím IFAC Elsevier jsou přiloženy v této práci v plném znění. Zabývají se problematikou spolehlivosti a bezpečnosti řídicích systémů a možných následků při vzniku poruchy u různých řídicích struktur. Jelikož porucha vzniklá v řídicím systému může z obecného hlediska vést až ke katastrofě či zranění nebo smrti mnoha osob je nezbytné této problematice věnovat více než rozsáhlou pozornost.

Článek [BraIeeeIcit03-2] se zabývá problematikou zajištění spolehlivého řízení vlakového systému, kde právě jakákoliv porucha řídicího systému může způsobit neštěstí. V článku je uveden příklad popisu komunikačního subsystému ve VHDL semi-formálním jazyce a dále ukázka zálohování funkčnosti řídicího systému systémem záložním.

Ve druhém článku [BraElsevier03-1] je následně prezentován úvod do analýzy rizik ve vztahu k definici rizik, úrovní škod a ohrožení člověka či skupiny lidí. Článek charakterizuje přístupy mezinárodních norem zabývajících se bezpečností a spolehlivostí a vysvětluje vztah těchto norem k technickým prostředkům řízení. V poslední části je popsán postup zálohování u speciálních typů bezpečných programovatelných automatů (Safety PLC), kde jsou uváděny postupy zálohování vnitřních částí řídicího systému, jeho vstupů a výstupů tak, aby byla v obecném pohledu zajištěna vysoká spolehlivost a bezpečnost takového řídicího systému.

V pohledu na zajištění spolehlivosti a bezpečnosti řídicího systému je nutné definovat kritérium, podle kterého se má řídicí systém zachovat v případě vzniku chyby. Je zde několik možností, které definují reakci systému na chybu:

- chovat se tak, jako by žádná chyba nenastala (maskování chyby)
- rekonfigurovat systém tak, aby mohl bez omezení pokračovat v činnosti (rekonfigurace)
- pokračovat v omezené činnosti tak, aby řízený systém byl v bezpečném stavu (degradace systému)

- řízené odstavení řídicího systému tak, aby nedošlo k nebezpečné situaci (fail-stop systémy)

2.3 FORMÁLNÍ POPIS HIERARCHICKÝCH DECENTRALIZOVANÝCH SYSTÉMŮ ŘÍZENÍ [BRARIP2002]

Jak již předchozí kapitoly nastínily, hierarchický decentralizovaný systém řízení může nabývat co do komplexnosti různých úrovní, a to od těch nejjednodušších degenerovaných struktur až po rozsáhle komplexní heterogenní systémy. Jelikož se může jednat o velice komplexní celek, je nezbytné najít matematický aparát na formální popis takového hierarchického decentralizovaného systému řízení v celé jeho škále. Je však nezbytné zahrnout do formálního popisu i faktor, který formálně charakterizuje programové vybavení, jež je nedílnou součástí dnešních programovatelných řídicích struktur. Formální popis programového vybavení zahrnuje charakteristiku blokově řešeného programového vybavení, které je řešeno jako jednotlivé funkční bloky vzájemně komunikující mezi sebou. Tomuto stylu programování v oblastech IT je přiřazen termín objektové programování, které se však v oblasti průmyslových automatizačních systémů při zachování schopností objektového programování neprosazuje. Avšak pro formální popis programového vybavení s přihlédnutím k využití formálního popisu HW i SW úrovně řídicího systému řešení úloh fault-tolerant (zajištění vysoké funkčnosti, vysoké spolehlivosti, bezpečného odstavení atd.) je nezbytné definovat striktně blokovou strukturu programového vybavení.

Nastíněný formální popis hierarchického decentralizovaného systému umožňuje:

- formální grafický popis
 - hardwarové a komunikační struktury HDCS (tzv. zdrojů)
 - blokově orientovaného programového vybavení
- formální matematický popis
 - hardwarové a komunikační struktury HDCS (tzv. zdrojů)
 - kapacita paměti dočasné paměti
 - kapacita operační paměti
 - kapacita permanentní paměti
 - výpočetní výkon – logické operace
 - výpočetní výkon – matematické operace
 - výpočetní výkon – obecné instrukce
 - rychlost komunikační sběrnice
 - přístupová rychlost komunikační sběrnice
 - deterministický versus nedeterministický přístup ke sběrnici
 - atd.
 - blokově orientovaného programového vybavení
 - požadavky programových bloků na jednotlivé zdroje poskytované HW
 - formální popis optimalizačních kritérií (omezující podmínky)
 - vyvážené využití komunikačních sítí
 - vyvážené využití výpočetních zdrojů
 - maximalizace souvislých volných pamětí
 - lokálně maximalizované využití zdrojů
 - atd.

Jako grafický formální popis hardwarové struktury byl autorem vyvinut formalismus založený na grafové reprezentaci zdrojů, jejich schopností distribuce po technologii/procesu nazvaný jako „**neplanární multipartitní orientovaný ohodnocený multigraf bez smyček**“ prezentovaný v [BraRip2002]. Ve stejné publikaci, která je v plném znění přiložena, je taktéž prezentován

grafický formalismus využitelný na grafický popis programového blokově orientovaného vybavení, které je popsáno ekvivalentně grafovou reprezentací charakterizovanou jako „**neplanární orientovaný ohodnocený graf bez smyček**“.

Vzhledem k neustále rostoucí komplexnosti decentralizovaných systémů řízení je nezbytné uvažovat o možnosti vzniku chyby či poruchy v systému. Takováto chyba může v obecném pohledu způsobit nebezpečný stav systému vedoucí až k ohrožení životů. Problematikou bezpečnosti a spolehlivosti z pohledu norem a technické praxe se zabývala předchozí kapitola. Jelikož v obecném kontextu definice hierarchického decentralizovaného systému řízení může taktéž dojít k poruše, autor navrhnul matematickou metodiku definování kritériálních funkcí, která umožňuje na základě známého a prezentovaného formálního popisu HW a SW struktury a metod MILP (mixed integer linear programming) řešit optimalizační úlohy vedoucí k off-line a on-line konfiguraci a případně rekonfiguraci řídicího systému. Tyto optimalizační postupy dokáží do značné míry zvýšit na základě on-line rekonfigurace spolehlivost řídicího systému, přičemž apriorní podmínkou pro správnou funkci rekonfigurace jsou zabudované nadbytečné zdroje tak, jak byly definovány dříve. Rozsáhle autor o této problematice pojednal v časopise AT&P Journal v několika navazujících článcích viz [BraATP03-1], [BraATP03-2], [BraATP03-3], [BraATP03-4], [BraATP03-5], které však zde nejsou uvedeny v plném znění.

3 KOMUNIKACE V AUTOMATIZACI

Základní lidskou vlastností, která stojí za sociálním rozvojem lidské společnosti, je komunikace. Základní principy komunikace je možné indikovat i u jiných živočišných druhů. Výraznou měrou se podílí komunikace v organizaci společenských druhů hmyzu, za jejichž příklad můžeme jmenovat včely, termity a mravence.

V obvyklé teorii komunikace dělíme komunikaci na:

- nonverbální
- verbální

3.1 NONVERBÁLNÍ KOMUNIKACE

Nonverbální komunikace je jedním ze základních komunikačních principů. Většina živočišných společenstev využívá právě tento druh komunikace. I v lidské společnosti se výraznou měrou na komunikaci podílí právě komunikace nonverbální, a to ať již ji využíváme vědomě či nevědomě.

Nonverbální komunikace v lidské společnosti může být v obecném pohledu popsána výrokem sociologa Ervina Goffmana [SocKom06] jako: „*způsob chování lidí a způsob jejich působení na druhé lidi při jejich bezprostředním styku i prostřednictvím tohoto styku či pouhou jejich přítomností v blízkosti druhých lidí*“.

K základním činnostem navázaným na nonverbální komunikaci [SocKom06] můžeme přiřadit třeba následující aktivity:

- pohyby těla a končetin, gesta, postoj těla
- mimika a výrazy tváře
- oční kontakt a pohledy do očí
- volba pozice v prostoru a vymezení vzdálenosti ke komunikačnímu partnerovi
- tělesným kontaktem, podáním ruky
- neverbálními aspekty lidské řeči a tónem hlasu
- atd.

Z výše jmenovaných aspektů nonverbální komunikace je vidět, že některé výrazové prostředky je možné využít i ke komunikaci mezi stroji a zařízeními na úrovni nonverbální komunikace. Je proto evidentní, že člověk jako tvůrce řídicích a jiných systémů implementuje do těchto systémů své znalosti a zkušenosti získané ze svého okolí. Není proto náhodou, že existují pokusy a praktické realizace nonverbální komunikace v technické oblasti. Jeden z pokusů o implementaci nonverbální komunikace, přesněji řečeno komunikace skupiny mobilních robotů za využití změn vlastností svého okolí, byl realizován a publikován v prestižním časopise - International Journal of Adaptive Control and Signal Processing viz. plné znění článku [BraWileyAcsp07].

3.2 VERBÁLNÍ KOMUNIKACE

Druhým významným typem komunikace je takzvaná verbální komunikace. Verbální komunikace je základním druhem lidské komunikace. Tento druh komunikace je z časového hlediska rozšířením či nástupcem komunikace nonverbální, která je vlastní i dalším živočišným druhům.

Základní charakteristikou verbální komunikace je, že využívá syntaxi a sémantiku ke vzájemnému předávání informací a sociální interakce mezi příslušníky skupiny. Za základní typ verbální komunikace chápeme jazyk.

Na základě teorie syntaxe a sémantiky byly v rámci požadavků na implementaci komunikace v oblasti technické praxe sestaveny teorie jazyků a teorie informací. Obecné studium verbální komunikace umožnilo vytvoření verbální komunikace mezi stroji. Jako povedené řešení je možné

charakterizovat počítačové komunikační sítě. Tyto komunikační sítě a jejich protokoly je tedy možné označit za verbální komunikaci mezi stroji.

V oblasti řízení technologických procesů a systémů bylo vyvinuto nepřehledné množství komunikačních standardů, založených na metalických vedeních, optických vedeních a případně bezdrátových. Je proto nasnadě, že se autor intenzivně zabýval a zabývá komunikačními řešeními v oblasti průmyslové automatizace.

3.3 KOMUNIKAČNÍ SBĚRNICE A STANDARDY

V oblasti řízení procesů a technologií se v současné době nejvíce prosazují decentralizované řídicí struktury. Tyto řídicí struktury je možné zobecnit v takzvaném hierarchickém decentralizovaném systému řízení. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, nedílnou součástí decentralizovaných systémů řízení jsou komunikační sběrnice.

Vzhledem k vývoji v oblasti průmyslových řídicích systémů vznikaly nejdříve proprietární komunikační standardy, nebo také firemní standardy, které měly za úkol popularizovat produkci výrobce a znemožnit využití komponent jiných výrobců. Jednalo se ve své podstatě ve většině případů o uzavřené protokoly a komunikační řešení. Prakticky každý významný výrobce automatizační techniky má ve svém portfoliu nějaký vlastní uzavřený komunikační standard.

Postupem času byly stále častěji vyvíjeny aktivity na ustanovení mezinárodních komunikačních standardů, což si v mnoha ohledech vynucovalo tvorbu heterogenních komunikačních systémů. Tyto aktivity byly také podpořeny obdobnými standardizačními postupy v oblasti IT, kde je naprostá většina komunikačních sběrnic nějakým způsobem standardizována. Jmenujme v oblasti IT alespoň ty nejznámější, které v průběhu času pronikaly i do oblasti průmyslové automatizace:

- Ethernet – mezinárodní standard IEEE 802.3
- WiFi – mezinárodní standard IEEE 802.11
- FireWire – mezinárodní standard IEEE 1394
- RS232 – mezinárodní standard EIA232
- Bluetooth – mezinárodní standard IEEE 802.15.3

V oblasti průmyslové automatizace se dále využívá celá skupina protokolů a sběrnic, které byly poskytnuty výrobcí či propagátory dané technologie jako otevřený standard pro všeobecné využití.

Je tedy vidět, že v oblasti průmyslové automatizace koexistují různé komunikační sběrnice, a to nejen na bázi proprietárních standardů, ale i otevřených standardů a standardů přejatých z dalších technických oblastí, jako je IT či mobilní komunikace. Vývoj v této oblasti ale nestagnuje, a proto se zavádí a tvoří nové komunikační technologie.

Veškeré uvedené sběrnice pokrývají veškeré vrstvy a úrovně decentralizovaných systémů řízení, takže spadají do kontextu HDCS.

3.3.1 Klasické průmyslové sběrnice

V článku [Braleeelcit03-2] uvedeném v plném znění v této práci je demonstrována tvorba decentralizovaného řídicího systému jako palubního řízení mobilního robota, přičemž pro komunikaci je využíván komunikační standard CAN, který je jako vysoce flexibilní a ověřený standard nedílnou součástí průmyslových řídicích systémů.

3.3.2 Ethernet a jeho penetrace do průmyslu

Standard Ethernet byl primárně vyvinut pro přenos informací v oblasti IT. V této oblasti bylo implementováno bezpočet variant a možností, přičemž i v současné době dochází k dalšímu rozvoji a vývoji tohoto standardu. Vzhledem k masivnímu nasazení a otestování komunikačního standardu Ethernet v IT oblasti, kde je začleněn v každém současném počítači, tento protokol

penetroval masivně i oblast průmyslových systémů řízení. V současné době již existuje skupina různých implementací této technologie v průmyslových řídicích systémech. V samém počátku průniku komunikační technologie Ethernet do průmyslové oblasti byly prováděny výzkumné a vývojové práce i na tomto standardu. Byly testovány protokolové a přenosové schopnosti uvedeného standardu a byly vyvíjeny technické průmyslové platformy, které umožnily začlenit tuto sériovou komunikační linku do průmyslového řízení. V článku [BraWseasJour03] jsou uvedeny výzkumné a vývojové práce související s implementací protokolového stacku a dále s HW implementací rozhraní v oblasti průmyslové automatizace. Následující výzkumné a vývojové práce umožnily společně se získanými zkušenostmi úspěšně implementovat komunikační standard Ethernet do inteligentního senzoru tlaku, který je v současné době vyráběn a prodáván a byl vystavován na několika mezinárodních výstavách v České republice a v zahraničí. Vývoj takového produktu a výzkumné postupy vedoucí k implementaci standardu Ethernet do senzoru tlaku v plném znění popisuje příložený článek [BraIfacCsd03-2] .

3.3.3 Bezdrátové komunikační standardy

Příkladem průniku komunikačního standardu Bluetooth může být výzkum v oblasti transferu a implementace komunikačních protokolů tohoto standardu do vestavěného osmibitového mikrokontroléru v oblasti inteligentní sensoriky. Byly implementovány některé z nejnižších úrovní protokolového stacku do mikrokontroléru, který je základním elektronickým vybavením inteligentního senzoru pro měření tlaku. Tento výzkumný a vývojový počín byl prezentován na mezinárodní konferenci IEEE ICECS 2003, jak demonstruje příložený článek v plném znění viz. [BraIeeIcecs03]. Obdobnou tematikou, avšak v jiném ohledu, vedoucí dále k integraci funkcí komunikačního standardu Bluetooth se zabývají články [BraIfacCsd03-2] a [BraElsevier03-2]. Implementace protokolů standardu Bluetooth je složitá, jelikož se jedná o standard primárně vyvinutý pro oblast PAN sítí a IT a nebylo počítáno s implementací do málo výkonných mikrokontrolérů s výrazně omezenými paměťovými kapacitami. Z tohoto důvodu byla dalším výzkumem a vývojem prověřena nová cesta, která v zásadě umožnila přímou a úplnou implementaci bezdrátového komunikačního rozhraní Bluetooth do embedded elektroniky v oblasti řízení. Tento výzkumný počín je dokumentován v příloženém článku [BraIeeIscsp06], který dokumentuje vývoj komerčního produktu tlakového senzoru se zabudovaným bezdrátovým rozhraním Bluetooth.

Odlišným přístupem, než převzetí komunikačních standardů z IT, je přímý výzkum a vývoj nových komunikačních technologií přímo pro průmyslovou oblast a nasazení. Jedním z takto vzniklých standardů je možné jmenovat bezdrátový standard ZigBee, který se v současnosti nachází stále ve vývojovém a standardizačním stádiu. V průběhu výzkumných prací nemohl být tento standard opomenut, a proto byl kladen silný důraz na vědecko-výzkumné a vývojové práce na tomto standardu. Byly navázány kontakty přímo s výrobcem nejen radiových rozhraní pro tento standard, ale i se softwarovými partnery, kteří vyvíjí základní komunikační knihovny. Na základě úzké spolupráce s partnery z USA, Ruska a dalších zemí byl prováděn vývoj radiového rozhraní včetně anténních systémů komunikačního testovacího modulu vyvinutého na ÚAMT FEKT VUT, jak to demonstruje článek v plném znění [BraIeeIcn06].

Na základě výzkumných prací v oblasti HW a SW bylo navrženo radiové rozhraní a anténní systém pro standard ZigBee a byly implementovány komunikační podprogramy a funkce. Následně byly prováděny výzkumné práce na zjištění chování tohoto komunikačního standardu, potažmo jeho bezdrátového komunikačního rozhraní v typických prostředích, kam je tento standard určen. Byla prováděna měření a testy související s šířením bezdrátového signálu a komunikačních dosahů, tato měření popisuje článek [BraIeeIscsp06]. Následně byly prováděny testy a měření nové technologie pro nasazení v oblasti řízení budov. Byly vyhodnocovány konkrétně radiové, komunikační a přenosové parametry v železobetonových

objektech, kde jako typický vzor bylo využity panelákové byty. Výsledky a vyhodnocení těchto experimentů a vyvození závěrů o použitelnosti technologie v oblasti řízení budov jsou publikovány v příloženém článku [BraEuzdc07], který byl publikován na mezinárodní konferenci zabývající se právě technologií ZigBee.

3.3.4 Zabezpečení bezdrátových PAN sítí

Jak již předchozí kapitoly naznačily, dochází k průniku bezdrátových komunikačních standardů do průmyslové oblasti. Jelikož se tyto standardy v průmyslovém prostředí často využívají pro přenos citlivých informací, jako jsou měřené veličiny a řídicí zásahy přímo související s procesem/technologii, jakékoliv narušení či odposlechnutí takovýchto privátních informací může vést ke značným ekonomickým či jiným škodám. Neautorizovaný přístup do průmyslové komunikační sítě je z globálního pohledu do určité míry přímo omezen izolací systému od veřejného okolí. Z tohoto důvodu napadení drátových komunikačních struktur v rámci uzavřené technologie/procesu je méně obvyklé, ne však nemožné. Vyšší míru rizika napadení však přináší využití bezdrátových komunikačních standardů, jejichž místní působnost se dá jen těžko omezit. Je proto nutné věnovat velkou pozornost zabezpečení takovýchto bezdrátových průmyslových sítí, a to nejen průmyslových sítí ale všech sítí obecně. Vzhledem k výzkumným a vývojovým pracím, které byly realizovány s bezdrátovými sítěmi typu ZigBee a Bluetooth a jejich implementaci v průmyslovém prostředí, byla věnována také pozornost jejich zabezpečení. Porovnání zabezpečení a technická řešení bezpečnostních politik, autentifikace a autorizace byly diskutovány v mezinárodním časopise *Lecture Notes in Computer Science* vydávaném nakladatelstvím Springer. Tento článek je přiložen v plném znění viz. [BraSpringer06].

4 ZÁVĚR

Tato habilitační práce se věnuje problematice teorie a praxe řídicích systémů v oblasti průmyslové automatizace. Rychlý technologický rozvoj umožňuje projektování stále komplexnějších řídicích systémů, které sestávají z rozdílných struktur kombinujících komunikační sítě s celou řadou procesní instrumentace od nejjednodušší polní instrumentace, až po vysoce sofistikované elektronické systémy. Tyto komplexní struktury vyžadují již specifický přístup nejen k projekční činnosti, ale i k programování a zajištění vysoké spolehlivosti a bezpečnosti tohoto komplexu.

Autor se v průběhu několika posledních roků zabýval progresivně se rozvíjejícími oblastmi, které pokrývají některé specifické problémy z této oblasti. Velká část práce je věnována problematice projektování a popisu decentralizovaných řídicích systémů v širokém spektru jejich struktury a zaměření. Autor na základě dlouhodobého studia řídicích struktur navrhnul zobecněnou strukturu charakterizovanou modelem hierarchického decentralizovaného řídicího systému. Na základě této zobecněné řídicí struktury byla studována problematika off-line konfigurace a správy hierarchického decentralizovaného systému řízení. Pro vývoj těchto funkcí byl navržen formální grafický prostředek pro popis a formální specifikaci jednotlivých hardwarových komponent decentralizovaného systému řízení, včetně postihnání parametrů jednotlivých technických zdrojů komponent. Mezi technické zdroje byly zařazeny primárně charakteristiky postihující funkčnost jednotlivých komponent řídicího systému, jako je výpočetní kapacita v celočíselné aritmetice, plovoucí řádové čárce a logických operacích, obecný výkon procesoru, kapacity pevných a dočasných pamětí, komunikační schopnost, počet digitálních vstupů a výstupů, analogových vstupů a výstupů, specifických vyhrazených zdrojů a podobně. Byly dále vytvořeny formální modely komunikačních sběrnic v různých topologiích, které postihují nejen jejich přenosové schopnosti, jako je přenosová rychlost a zpoždění, ale i schopnosti zajistit zvýšenou spolehlivost a bezpečnost, jako je redundantní médium a podobně. Další součástí řídicího systému je programové vybavení, pro které byly definovány požadavky na striktní blokovou strukturu. Při dodržení této blokové struktury byl definován grafický formální model programového vybavení celého decentralizovaného řídicího systému, včetně popisu požadavků jednotlivých programových bloků na specifické zdroje poskytované hardwarem řídicího systému. Grafický formální model hardwarové struktury i programového vybavení je založen na grafové prezentaci.

Vzhledem k možné komplexnosti decentralizovaných řídicích systémů byly navrženy matematické metody řešící různé problémy technické praxe. Příkladem uveďme problematiku off-line konfigurace, správy decentralizovaného systému, on-line rekonfigurace, konfigurace za účelem maximalizace propustnosti komunikačních sítí, minimalizace komunikačních přenosů v decentralizovaném řídicím systému, maximalizace volných zdrojů, vyvážené využívání zdrojů a podobně. Pro řešení takovýchto problémů byl vyvozen formální matematický popis hardwarové struktury i programového vybavení. Byly do něj začleněny specifické omezující podmínky definující vztahy mezi fyzikální realizací a formálním grafickým a potažmo matematickým formálním popisem. Specifický problém je vždy definován víceparametrovým funkcionálem, přičemž v jednodušších případech vázané proměnné formálního modelu jsou číselné, a to reálné nebo binární. Za předpokladu číselných proměnných je možné provádět řešení takovýchto úloh matematickými metodami. Avšak obecně je možné definovat proměnné na libovolném oboru, včetně symbolických výčtů, avšak v tomto případě musí být pro řešení implementovány jiné metody, jako heuristické metody či jiné metody z oblasti umělé inteligence. Formální matematický model s číselnými proměnnými byl popsán metodou MILP.

K této oblasti je možno zahrnout i problematiku zajištění vysoké bezpečnosti a spolehlivosti, a to především z důvodu rostoucí komplexnosti systémů. Tato problematika je velice důležitá, protože bez implementace metod fault-tolerant nebo fail-safe do takto komplexně narůstajících systémů zákonitě klesá jejich spolehlivost v závislosti na vzrůstající složitosti. I proto je zde tato

oblast diskutována a rozváděna. Formální matematický i grafický popis decentralizovaných systémů, prezentovaný v této práci, je tvořen tak, aby umožňoval také řešit úlohy zvýšení spolehlivosti na základě zálohování při využití nadbytečných vestavěných zdrojů systému. Pro srovnání je zde uvedeno využití semi-formálního jazyka VHDL pro popis standardních průmyslových řídicích systémů se zálohováním.

Další zajímavá oblast, popsaná v této práci, souvisí s širokým spektrem komunikačních sběrnic a standardů, využívaných v oblasti řízení. Jsou zde charakterizovány práce související se zavedenými komunikačními standardy v oblasti automatizace, přičemž příkladem jmenujme sběrnici CAN, která se využívá v celé řadě aplikací. Sběrnice CAN je využívána nejen v oblasti průmyslového řízení, ale především v oblasti palubních komunikačních sítí v automobilech a ve specifických aplikacích leteckého průmyslu. V automobilovém průmyslu se využívají na sběrnici CAN především proprietární protokoly jednotlivých automobilek, v leteckém průmyslu se využívá hlavně protokol CAN-Aerospace a v oblasti průmyslového řízení je příkladem DeviceNet či CanOPEN. V práci je však zařazena i oblast týkající se rychlého průniku komunikačního standardu Ethernet z oblasti IT do oblasti průmyslového řízení. Autor se v souvislosti s touto problematikou věnoval vývoji prvního samostatného senzoru se zabudovaným plnohodnotným rozhraním Ethernet. Na základě spolupráce s průmyslem byl vyvinut nejen průmyslový datový koncentrátor s rozhraním Ethernet, ale i samostatný senzor tlaku s tímto rozhraním. Vyvinuté produkty byly vystavovány na národních a mezinárodních výstavách a jsou prodávány nejen v EU ale i mimo její území.

Neméně zajímavou oblastí je oblast bezdrátových komunikačních standardů v průmyslu. Je zde prezentována problematika průniku bezdrátového rozhraní Bluetooth z oblasti IT PAN sítí do průmyslového sektoru. Byly testovány možnosti implementace bezdrátového protokolu Bluetooth do malých jednočipových mikrokontrolérů. Jedná se o velmi širokou problematiku, vzhledem k tomu, že protokolové struktury Bluetooth nebyly nikdy navrhovány s ohledem na co nejmenší paměťové nároky a výpočetní výkon. I přes tato úskalí bylo realizováno komerční čidlo tlaku a teploty vybavené tímto bezdrátovým komunikačním rozhraním, které je v současnosti ve výrobě a prodeji. Do oblasti bezdrátových komunikačních řešení spadá také bezdrátový komunikační standard ZigBee, který je ale od začátku vývoje navrhován s ohledem na využití v malých mikroprocesorech a mikrořadičích. Tento standard je však vyvíjen v posledních letech a jeho vývoj není stále ukončen. Autor se zabýval jeho implementací do širokého spektra zařízení průmyslové praxe, a to především se zaměřením na řízení budov a měření tlaku. Vývojové práce probíhaly za úzké spolupráce s vedoucími firmami v tomto oboru a to na úrovni vzájemné kooperace. Díky této spolupráci byly již vyvinuty funkční vzorky zařízení, které se v testují v reálných poloprovozních podmínkách a plánuje se jejich transfer na trh.

S bezdrátovými komunikačními technologiemi, ale nejen s nimi, se spojuje zabezpečení komunikačního kanálu. I tato problematika je v této práci diskutována. Jsou zde uvedena srovnání mezi bezpečnostními technikami využívanými ve standardech Bluetooth a ZigBee.

Poslední kapitola se okrajově zabývá problematikou nonverbální komunikace mezi stroji. Byl modelován systém komunikace mezi mobilními roboty, které mezi sebou komunikují na základě prostředí, tj. bez přímého komunikačního kanálu. Několik robotů má za úkol na základě této komunikace shromáždit v prostředí rozmístěné objekty do jednoho místa. Na rozdíl od přímé komunikace realizované komunikační sběrnici a protokolem, což je možno považovat za verbální komunikaci mezi stroji, je zde pokus o implementaci pravidel nonverbální komunikace.

SLOVNÍK ZKRATEK

CAN	Controller Area Network, komunikační standard
HDCS	Hierarchical Decentralized Control System, hierarchický decentralizovaný řídicí systém
PLC	Programmable Logic Controller, programovatelný logický automat
IT	Information Technology, informační technologie
PC	Personal Computer, personální počítač
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, mezinárodní standardizační organizace
WIFI	Wireless Fidelity, označení bezdrátových sítí
ERP	Enterprise Resource Planning, systémy řízení podniku
MES	Manufacturing Execution System, systémy řízení výroby
USB	Universal Serial Bus, sériová komunikační sběrnice
DP	Distributed Peripherals, komunikační standard Profibus DP
FMS	Fieldbus Message Specification, komunikační standard Profibus FMS
AS-i	Actuator Sensor Interface, komunikační standard
GPIB	General Purpose Interface Bus, komunikační standard IEEE488
FDDI	Fiber Distributed Data Interface, komunikační standard
CDDI	Copper Distributed Data Interface, komunikační standard
IFAC	International Federation of Automatic Kontrol, mezinárodní sdružení
HW	Hardware
SW	Software
MILP	Mixed Integer Linear Programming, matematická metoda
PAN	Personal Area Network, označení skupiny komunikačních sítí

POUŽITÁ LITERATURA

- [BraRip2002] BRADÁČ, Z., ZEŽULKA, F. *Mathematical model of packet routing problem* In Proc. of the 5th International Scientific - Technical Conference, Process Control 2002. Process Control RIP 2002. Pardubice: University of Pardubice, 2002, s. 1 - 5, ISBN 80-7149-452-1
- [BraIeeeIcecs03] BRADÁČ, Z., VRBA, R., FIEDLER, P., CACH, P. *Wireless Communication in Automation* In Proceedings on 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems. 10th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (IEEE ICECS 03). Sharjah, U.A.E.: SuviSoft Oy Ltd, Tampere, Finland, 2003, s. 659 - 1 320, ISBN 0-7803-8164-5
- [BraIeeeIcit03-1] BRADÁČ, Z., BLECHA, R. *Distributed Control System for Robotic Manipulators* In IEEE ICIT 2003 Proceedings. IEEE International Conference on Industrial Technology. Maribor, Slovenia: TU Maribor, 2003, s. 169 - 172, ISBN 0-7803-7853-9
- [BraIeeeIcit03-2] BRADÁČ, Z., KUČERA, P., ZEŽULKA, F. *Formal Methods for Higher Reliability of the Industrial Automation* In IEEE ICIT 2003 Proceedings. IEEE International Conference on Industrial Technology. Maribor, Slovenia: TU Maribor, 2003, s. 891 - 895, ISBN 0-7803-7853-9
- [BraIfacCsd03-1] BRADÁČ, Z., CACH, P., FIEDLER, P., REJDA, Z., PROKOP, M. *Bringing Ethernet to the sensor level* In Control Systems Design 03. 2nd IFAC Conference Control Systems Design CSD'03. Bratislava, Slovensko: IFAC, 2003, s. 1 - 3
- [BraIfacCsd03-2] BRADÁČ, Z., BRADÁČ, F., FIEDLER, P., CACH, P., REJDA, Z., PROKOP, M. *Wireless communication standards for process automation* In Control systems design. 2nd IFAC Conference Control Systems Design CSD'03. Bratislava, Slovensko: IFAC, 2003, s. 1 - 6
- [BraElsevier03-1] BRADÁČ, Z., ZEŽULKA, F. *Development in safety and reliability of programmable devices and systems*. Programmable devices and systems, Pergamon IFAC Elsevier, ISSN 1474-6670, 2003, roč. 2003, č. 1, s. 303 - 306
- [BraElsevier03-2] BRADÁČ, Z., ZEŽULKA, F., BRADÁČ, F. *Short range radio data transfer for process automation*. Programmable devices and systems, Pergamon IFAC Elsevier, ISSN 1474-6670, 2003, roč. 2003, č. 1, s. 315 - 318
- [BraWseasJour03] BRADÁČ, Z., FIEDLER, P., BRADÁČ, F., PROKOP, M., WAGNER, M. *Further Evolution of Fieldbuses*. WSEAS Transactions on Computers, ISSN 1109-2750, 2003, roč. 2 (2003), č. 2, s. 477 - 480

- [BraIeeeIsie05] BRADÁČ, Z., FIEDLER, P., VRBA, R. *Smart Pressure Sensors with Next Generation Communication Interfaces* In IEEE ISIE 2005 proceedings Volume I - IV. IEEE ISIE 2005. Zagreb, Croatia: ISIE 2005, University of Zagreb, Croatia, 2005, s. 1405 - 1408, ISBN 0-7803-8739-2
- [BraWileyAcsp07] BRADÁČ, Z., ZEZULKA, F., TSANKOVA, D., GEORGIEVA, V. *Immune network control for stigmergy based foraging behavior of autonomous mobile robot*. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, ISSN 0890-6327, 2007, roč. 21, č. 2-3, s. 265 - 285. [IF: 0.580]
- [BraIeeeIcn06] BRADÁČ, Z., SAJDL, O., FIEDLER, P., HYNČICA, O. *ZigBee Technology and Device Design* In International Conference on Networking. ICN'06 International Conference on Networking. Mauritius: IEEE, 2006, s. 66 - 141, ISBN 0-7695-2552-0
- [BraIeeeIscsp06] BRADÁČ, Z., HYNČICA, O., KACZ, P., FIEDLER, P., KUČERA, P., VRBA, R. *The ZigBee Experience* In Proceedings ISCCSP 2006. The Second International IEEE Symposium on Communications, Control, and Signal Processing-ISCCSP'06. Marrakech, Marocco: ISCCSP, 2006, s. 0 - 3, ISBN 2-908849-17-8
- [BraSpringer06] BRADÁČ, Z., FIEDLER, P., KUČERA, P., HYNČICA, O., KACZ, P., VRBA, R. *Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation*. Kapitola: *On Security of PAN Wireless Systems*. Berlin / Heidelberg, SRN: Springer Berlin / Heidelberg, 2006. s. 178 - 185. ISBN 3-540-36410-2 [IF: 0.402]
- [BraEuZdc07] BRADÁČ, Z., HYNČICA, O., FIEDLER, P., KUČERA, P., KACZ, P., KAŇA, Z. *Evaluation of Performance of IEEE 802.15.4 Radios in Indoor Applications* In 1st EUZDC Proceedings. 1st European ZigBee Developer's Conference. : , 2007, s. 1 - 10
- [ZezMono04] ZEZULKA, F. *Prostředky průmyslové automatizace*. Brno: VUTIUM, 2004. 176 s. ISBN: 80-214-2610-1.
- [BraATP03-1] BRADÁČ, Z., JIRSÍK, V. *Optimalizační úlohy v hierarchických decentralizovaných řídicích systémech (1)*. AT&P Journal, ISSN 1335-2237, 2003, roč. 2003, č. 7, s. 9 - 9.
- [BraATP03-2] BRADÁČ, Z., JIRSÍK, V. *Optimalizační úlohy v hierarchických decentralizovaných řídicích systémech (2)*. AT&P Journal, ISSN 1335-2237, 2003, roč. 2003, č. 8, s. 68 - 69.
- [BraATP03-3] BRADÁČ, Z., JIRSÍK, V. *Optimalizační úlohy v hierarchických decentralizovaných řídicích systémech (3)*. AT&P Journal, ISSN 1335-2237, 2003, roč. 2003, č. 9, s. 95 - 96.

- [BraATP03-4] BRADÁČ, Z., JIRSÍK, V. Optimalizační úlohy v hierarchických decentralizovaných řídicích systémech (4). AT&P Journal, ISSN 1335-2237, 2003, roč. 2003, č. 10, s. 89 - 89.
- [BraATP03-5] BRADÁČ, Z., JIRSÍK, V. Optimalizační úlohy v hierarchických decentralizovaných řídicích systémech (5). AT&P Journal, ISSN 1335-2237, 2003, roč. 2003, č. 11, s. 88 - 89.
- [SocKom06] Nonverbální komunikace : Sociální komunikace 2006 [online]. 2004. Praha : Ústav informačních studií a knihovnictví, c2004 [cit. 2007-10-10]. Dostupný z WWW:
<http://uisk.ff.cuni.cz/dwn/1003/2040cs_CZ_neverbalni_komunikace.ppt>.

ABSTRAKT (CZ)

Podstatou habilitační práce je prezentace výsledků získaných při vědecko-výzkumné a výukové činnosti na UAMT FEKT Vysokého učení technického v Brně. Práce zahrnuje plné znění článků a publikací autora věnující se aktuálním tématům průmyslové automatizace. Jsou zde uvedeny výsledky týkající se formálního popisu a modelování hierarchických decentralizovaných systémů řízení s návazností na zajištění vysoké bezpečnosti a spolehlivosti decentralizovaných systémů se zabudovanou redundancí. Další diskutovaná témata se zaměřují především na komunikační standardy v oblasti automatizace, a to nejen drátové či optické, ale především bezdrátové komunikace. Jsou zde uvedeny zkušenosti s komunikačními standardy CAN, Ethernet, Bluetooth a ZigBee. V poslední řadě je zde diskutována problematika zabezpečení bezdrátových komunikačních standardů v oblasti průmyslu.

ABSTRACT (EN)

Main goal of this inaugural dissertation is to present scientific, research and teaching results gained at Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Control and Instrumentation. Full article's copies published in several international scientific journals and conferences are included in this inaugural dissertation. Results focused to formal description and modeling of hierarchically decentralized control systems are presented here. Introduced formal methods have been developed to achieve fault-tolerance by utilization of embedded system redundancy in frame of decentralized control structures. Industrial communication systems are also widely presented; included are metallic, optical and wireless standards. Enclosed papers include experience with CAN, Ethernet, Bluetooth and ZigBee communication standards in technical praxes. Security of wireless communication for automation is also discussed.