

Řízení a monitorování technologických procesů s FOX Board embedded Linux systémem

Proces Control and Monitoring Using FOX Board
with Embedded Linux System

Bc. Radim Jelínek



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radim Jelínek**

Osobní číslo: **A11420**

Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Řízení a monitorování technologických procesů s
FOX Board embedded Linux systémem**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma.
2. Prostudujte hardwarové i softwarové vlastnosti Fox Board LX embedded linux systému.
3. Provedte hardwarový návrh desky pro styk Fox Board LX s technologickým procesem obsahující analogové i digitální vstupy a výstupy.
4. Realizujte prototyp desky rozhraní a ověřte její funkci.
5. Vytvořte knihovnu podprogramů pro tvorbu řídicích aplikací (obsluha vstupů / výstupů, generování PWM, základní regulační algoritmy).
6. Vytvořte ukázkovou řídicí aplikaci využívající vytvořené knihovní funkce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **AXIS COMMUNICATIONS. AXIS ETRAX 100LX Network Device System-on-Chip Data Sheet [online]. 2001. Dostupné z: [www.axis.com]**
2. **AXIS COMMUNICATIONS. AXIS ETRAX 100LX Designer's Reference [online]. 2006. Dostupné z: [www.axis.com]**
3. **GOFTON, Peter W. Sériová komunikace. 1. vyd. Praha: Grada, 1994, 234 s. ISBN 80-716-9131-3.**
4. **HRUŠKA, František. Senzory v systémech informatiky a automatizace. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 177 s. ISBN 978-807-3186-302.**
5. **JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. EAGLE pro začátečníky /: uživatelská a referenční příručka :. 2. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 80-730-0213-2.**
6. **VAŠEK, Vladimír. Teorie automatického řízení. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1990, 139 s. ISBN 802140115x.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Dostálek, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

24. února 2013

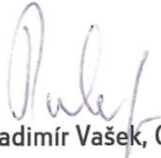
Termín odevzdání diplomové práce:

11. června 2013

Ve Zlíně dne 24. února 2013


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je hardwarový návrh desky pro styk modulu FOX Board s technologickým procesem. Operační systém Linux v kombinaci s vysokým výpočetním výkonem embedded jednotky dovolil vytvořit zařízení, které umožňuje nejenom regulaci regulované soustavy, ale také stanovení ideálních parametrů regulátoru dle různých metod návrhu a simulaci regulačního pochodu. Naměřená data jsou graficky interpretována uživateli prostřednictvím dynamických grafů a systematicky archivována do souboru v takovém formátu, který dovoluje jejich pozdější zpracování a vyhodnocení.

Klíčová slova: FOX Board, regulace, simulace, monitorování, embedded Linux

ABSTRACT

This thesis is aimed at the hardware board design for connection of FOX Board module with the technological process. Linux operating system in combination with high-performance embedded unit allowed to create a device that not only allows control of the controlled system, but also determines the ideal controller parameters according to different design methods and simulation of control process. The measured data are graphically represented to users via dynamic graphs and systematically archived to the file in the format which allows later processing and evaluation.

Keywords: FOX Board, regulation, simulation, monitoring, embedded Linux

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Dostálkovi, Ph.D za jeho cenné rady, postřehy a odborné vedení při psaní diplomové práce.

Děkuji také rodině a přátelům za podporu, kterou mi poskytli v období vzniku této práce.

„Tajemství úspěchu v životě není dělat, co se nám líbí,
ale nalézt zalíbení v tom, co děláme.“

Thomas Alva Edison (*1847 – †1931)

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ŘÍZENÍ TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ	11
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ.....	11
1.2 REGULAČNÍ OBVOD	13
1.3 REGULÁTOR	15
1.4 DRUHY REGULACE	17
1.5 LOGICKÉ ŘÍZENÍ.....	18
1.5.1 Logické členy a logické obvody.....	18
1.6 SPOJITÉ LINEÁRNÍ ŘÍZENÍ.....	22
1.6.1 Popis spojitého systému	22
1.6.2 Spojitý regulační obvod.....	24
1.6.3 Dynamické vlastnosti spojitých regulátorů	24
1.6.4 Charakteristika činnosti spojitých regulátorů.....	26
1.7 DISKRÉTNÍ ŘÍZENÍ.....	27
1.7.1 Popis diskrétního systému	28
1.7.2 Diskrétní regulační obvod	30
1.7.3 Volba periody vzorkování	31
1.7.4 Diskrétní náhrada spojitých operací v číslicovém PID regulátoru	32
2 MONITOROVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ	35
2.1 VIZUALIZAČNÍ SYSTÉM.....	36
2.1.1 Control Web	37
2.1.2 PROMOTIC	38
2.1.3 InTouch	38
2.1.4 Witness	38
2.1.5 Wizcon	38
3 UNIFIKOVANÉ SIGNÁLY	39
4 FOX BOARD	40
4.1 TECHNICKÁ SPECIFIKACE.....	41
4.1.1 Mikroprocesor	42
4.1.2 USB	42
4.1.3 Ethernet	43
4.1.4 I ² C.....	43
4.1.5 GPIO.....	43
4.2 VÝVOJ APLIKACÍ S PHROZEN SDK	44
II PRAKTICKÁ ČÁST	45
5 NÁVRH DESKY PRO STYK S TECHNOLOGICKÝM PROCESEM.....	46
5.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	46
5.1.1 Napájení	46

5.1.2	Digitální vstupy a výstupy	47
5.1.3	Analogové vstupy a výstupy	48
5.1.4	Obvod reálného času	50
6	PROTOTYP ZAŘÍZENÍ	51
6.1	VÝROBA DESKY PLOŠNÉHO SPOJE	52
6.2	INICIALIZACE ZAŘÍZENÍ	52
7	KNIHOVNA FUNKCÍ	53
7.1	PWM	53
7.2	I ² C	53
7.3	DIGITÁLNÍ VSTUPY A VÝSTUPY	53
7.4	ANALOGOVÉ VSTUPY A VÝSTUPY	54
7.5	OBVOD REÁLNÉHO ČASU	54
7.6	PRÁCE S ADRESÁŘI A SOUBORY	54
7.7	REGULAČNÍ ALGORITMY	55
7.7.1	Výpočet parametrů regulátoru	55
7.7.2	Simulace regulačního pochodu	55
7.7.3	Regulace	56
8	HLAVNÍ PROGRAM	57
8.1	POPIS PROGRAMU	57
8.2	OVLÁDÁNÍ PROGRAMU	59
8.2.1	Příkazová řádka	59
8.2.2	Webové rozhraní	60
8.3	UŽIVATELSKÉ VSTUPY	62
9	OVĚŘENÍ FUNKCE ZAŘÍZENÍ	65
9.1	PSD REGULÁTOR METODOU POŽADOVANÉHO MODELU	65
9.2	METODA KONEČNÉHO POČTU KROKŮ	66
	ZÁVĚR	67
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK	75
	SEZNAM PŘÍLOH	76

ÚVOD

V posledních letech vidíme snahu o neustále se zvyšující produktivitu práce za minimální spotřebu času a vynaložených nákladů. Jednotlivé pracovní úkony musejí být co nejkratší a nejjednodušší, aby vyžadovaly minimum lidských sil. Snahou člověka je osvobodit se od těchto stereotypních, unavujících fyzických a duševních činností za použití nejrůznějších zařízení a strojů. Tento proces nahrazení lidské činnosti při výrobě se nazývá automatizace.

Cílem automatizace je tedy odstranění nebo potlačení vlivu lidského faktoru na výrobní nebo jiný technický objekt. Proces automatizace proniká do nejširších oblastí každodenního života, který umožňuje přesné a rychlé měření, vyhodnocení naměřených hodnot a provedení potřebného zásahu v adekvátní míře. Ve všech technických odvětvích, v nevýrobních činnostech a v posledních letech také v technice budov můžeme nalézt prvky automatizace. Nejzásadnější dopad a uplatnění automatizace je pozorovatelný ve výrobních procesech, kde přináší výhody v podobě zkrácení výrobní doby, snížení výrobních nákladů, zefektivnění práce, zvýšení kvality a stability technologického procesu. Odstraněním lidského faktoru z výrobního procesu se zvyšuje jeho spolehlivost, kvalita a především pak jeho přesnost. Bez automatizace se dnes neobejde žádný výrobní nebo technologický proces.

Výpočetní technika musí odolávat náročnému průmyslovému prostředí a splňovat podmínky pro nepřetržitý chod s různými negativními vlivy, mezi které můžeme zařadit vibrace, ořesy, prašnost, vlhkost a další. Proto jsou pro prostředky automatizace použita speciálně konstruována zařízení typu průmyslový personální počítač (IPC) nebo programovatelný logický automat (PLC).

S rozvojem automatizační techniky musel přijít i rozvoj v oblasti monitorování výrobních a technologických procesů, které přibližují jednotlivé prvky automatizace lidskému vnímání. Monitorovací a vizualizační systém musí být navrhnut tak, aby obsluhujícímu personálu poskytl nezbytné informace o připojeném technologickém procesu v uživatelsky přívětivé podobě. Proto jsou vytvářeny vizualizační obrazovky a dispečerské pracoviště, kde jsou zobrazeny informace o provozních stavech technologického objektu, které dovolují jeho ovládání a archivaci dat pro pozdější zpracování a vyhodnocení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ŘÍZENÍ TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ

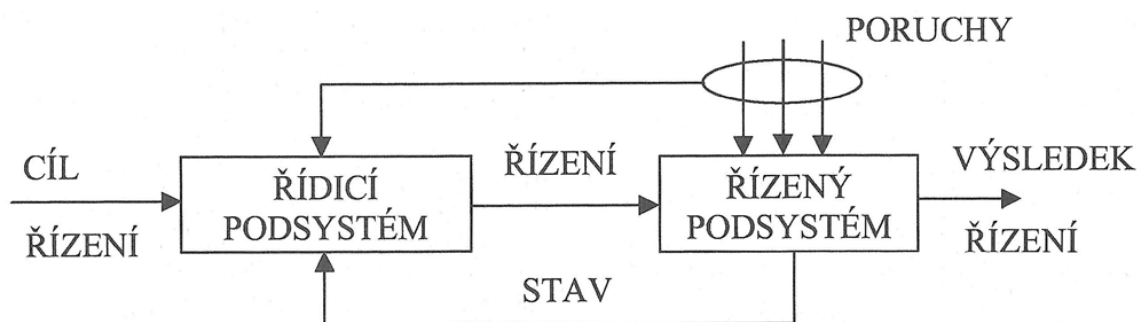
Současný stav řídicí techniky je výsledkem dlouholetého vývoje metod popisu a řešení regulačních obvodů, završený moderními teoriemi řízení. [1]

Řízení je cílevědomá činnost, při níž se hodnotí a zpracovávají informace o řízeném objektu nebo procesu spolu s informacemi o dějích vně a podle nich se ovládají příslušná zařízení se snahou o dosažení předepsaného cíle.

1.1 Základní rozdělení

Teorie regulace je nejdůležitější částí teorie řízení, která se zabývá studiem systému řízení. Obecný systém řízení se skládá z řídicího a řízeného pod systému. [2]

Úkolem systému řízení je působit řídicím pod systémem na řízený pod systém tak, aby výsledek řízení byl v souladu s cílem řízení. Toto cílené působení řídicího pod systému na řízený pod systém se nazývá řízení. Řídicí pod systém může kvalitněji plnit cíl řízení, pokud je informován o poruchách a pomocí zpětné vazby o stavu řízeného pod systému. [2]



Obr. 1. Schéma obecného systému řízení [2]

Důležitým hlediskem pro dělení řízení je, zda výsledek řízení je nebo není zpětně kontrolován, zda je obsažená vazba při řízení. Podle toho rozlišujeme ovládání (otevřené řízení, řízení bez zpětné vazby), regulaci (uzavřené řízení, zpětnovazební řízení) a vyšší formy řízení. Regulací rozumíme udržování určité fyzikální veličiny na požadované hodnotě (konstantní hodnotě nebo měnící se hodnotě). Během regulace se zjišťují hodnoty fyzikální veličiny a srovnávají se s hodnotou, kterou má dosahovat. Podle zjištěných odchylek se zasahuje do regulačního procesu tak, aby se tyto odchylky odstranily. Pokud řízení probíhá automaticky, tj. bez přímé účasti člověka, jde o automatické řízení.

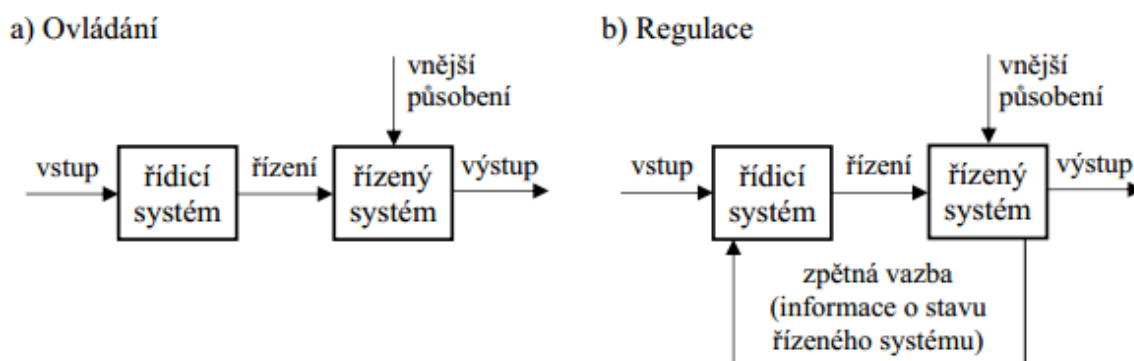
Mezi vyšší formy řízení řadíme optimální řízení, adaptivní řízení, učení a řízení s umělou inteligencí. Ve všech případech je cílem řízení, aby výstupní veličina, tj. regulovaná nebo ovládaná veličina se pokud možno co nejvíce blížila žádané veličině bez ohledu na nepříznivý vliv poruchových veličin.

Systém regulace zajistí kvalitnější řízení, protože regulující (řídící) podsystém je pomocí zpětné vazby a prostřednictvím regulované veličiny informován o působících poruchách regulovaného (řízeného) podsystému. Naproti tomu systém ovládání nemusí vždy zajistit kvalitní řízení, protože ovládací (řídící) podsystém není informován o poruchách ovládaného (řízeného) podsystému, a nemůže na ně tedy reagovat.

Optimální řízení je takové, kdy systém dosáhne požadovaných vlastností např. v nejkratším čase nebo naopak při minimu vynaložené energie, tedy s maximální účinností. Systém je schopen vyhledat nejvýhodnější působení a dosáhnout tak co nejlepšího chování celého systému v daných omezujících podmínkách.

Adaptivní řízení je takové, kdy systém je schopen měnit svou strukturu, tedy i své parametry tak, aby proces řízení probíhal stále optimálně a to i při změnách parametrů řízeného objektu (řízeného systému). Jestliže je adaptivní systém schopen ukládat přijaté informace do paměti a později v téže nebo podobné situaci znovu využít získaných zkušeností, lze jej nazvat učícím se systémem a proces řízení tohoto systému je učení. [3]

Nejvyšším stupněm řízení je řízení systémy s umělou inteligencí. Obecně zde umělá intelligence představuje řídící systém, který vykazuje známky inteligentního chování, tzn. na základě znalostí a vstupů je systém schopen generovat výstupy, případně je modifikovat podle jejich efektivnosti a odvozovat tak nové zákonitosti. [3]

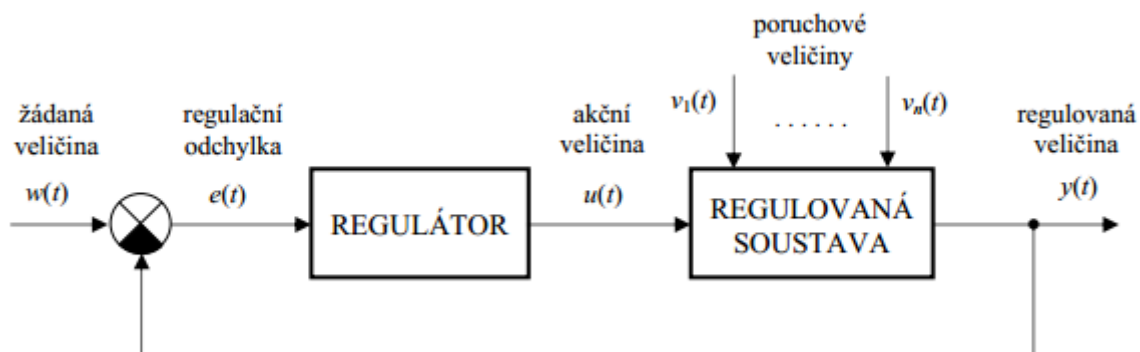


Obr. 2. Blokové schéma pro ovládání (a) a pro regulaci (b) [3]

1.2 Regulační obvod

Řízení se zpětnou vazbou se nazývá regulace. Úkolem regulace je nastavení konkrétní veličiny na požadovanou hodnotu, která je nejčastěji konstantní nebo proměnná a udržovat ji na této hodnotě i v případě působení poruchových veličin. V regulačním obvodu probíhá regulační pochod, který vzniká připojením regulátoru (řídícího systému) k regulované soustavě (řízenému systému) a zavedením záporné zpětné vazby. V uvedeném regulačním obvodu je možno nalézt dvě části, tj. regulátor (řídící systém) a regulovanou soustavu (řízený systém).

Časové průběhy uvedených veličin, tj. $y(t)$, $w(t)$, $e(t)$, $u(t)$ a $v(t)$ charakterizují chování regulačního obvodu. Regulovaná soustava a regulátor se zpravidla skládají z řady členů. Proto je vhodné pro schematické znázorňování regulačních obvodů používat blokových schémat.



Obr. 3. Obecné blokové schéma systému regulačního obvodu [4]

Výstupem z regulované soustavy je výstupní neboli regulovaná veličina, která je označována jako y . Úkolem regulace je udržet tuto veličinu na požadované hodnotě. Regulovanou veličinou může být např. teplota, tlak, hmotnostní tok, napětí, množství paliva v nádrži, množství sledovaných částic atd.

Žádaná veličina, která je označována jako w , je veličina, pomocí které se nastavuje hodnota, kterou má dosahovat (udržovat) regulovaná veličina y . Pokud je žádaná veličina zadávána člověkem je to obvykle poloha nějakého nastavovacího prvku, např. potenciometru, ovládací páčky, atd. V automatických provozech, to může být elektrické napětí nebo jiná veličina, pomocí které lze přenést informaci.

V regulačním obvodu se trvale měří hodnota regulované veličiny y a porovnává se s žádanou hodnotou w . Rozdíl těchto veličin se nazývá regulační odchylka e , pro niž platí $e = w - y$, přičemž je snahou, aby platilo $e \rightarrow 0$. V případě nenulového rozdílu mezi regulovanou veličinou y a její požadovanou hodnotou w provádí regulátor tzv. akční zásah.

Úlohou regulace je zasahovat do regulačního procesu tak, aby se regulační odchylka udržovala na minimální nebo nulové hodnotě. Tento proces je uskutečněn pomocí výstupní veličiny regulátoru, která je zároveň vstupní veličinou do regulované soustavy. Nazývá se akční veličina a je označována symbolem u . Regulátor musí být přitom zapojen tak, aby díky své výstupní veličině, tj. akční veličině, zmenšoval regulační odchylku.

Příčinou, proč je třeba provádět regulaci, jsou poruchy (poruchové veličiny), které jsou označovány symbolem v . Počet poruch působících na regulační obvod přitom může být více, tj. v_1, v_2, v_3 , atd. Poruchové veličiny nepředvídatelným a nežádoucím způsobem působí na regulovanou soustavu, čímž ovlivňují regulovanou veličinu.

Regulovaná soustava je tvořena souborem řízení, v nichž probíhá nějaký dílčí proces, u kterého je třeba dodržovat určité podmínky, např.: stálou teplotu, teplotu měnící se podle určitého programu, lineárně rostoucí otáčky a jejich udržování na zadané výši, stabilizace elektrického napětí nebo proudu atd. Regulátor je tvořen souborem zařízení, která tyto požadované podmínky dodržují. [3]

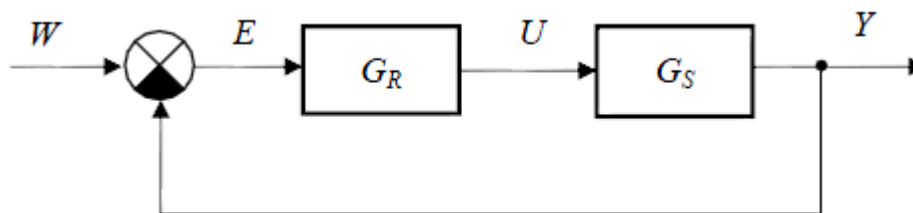
Úkolem regulačního obvodu je zajištění těchto požadavků, což může být vyjádřeno cílem regulace. Cíl regulace může být formulován ve dvou vzájemně ekvivalentních tvarech. [2]

Pomocí vhodně zvoleného regulátoru a jeho řízení vytvořit takovou akční veličinu u , která bez ohledu na negativní působení poruchových veličin zajistí aby:

- regulovaná veličina y byla v každém okamžiku blízká (ideálně, aby se rovnala) žádané veličině.
 - $y \rightarrow w$
- regulační odchylka e byla v každém okamžiku blízká (ideálně, aby se rovnala) žádané veličině.
 - $e \rightarrow 0$

1.3 Regulátor

Regulátorem G_R je nazýváno zařízení v regulačním obvodu, kterým se uskutečňuje proces automatické regulace, prostřednictvím akční veličiny působí na regulovanou soustavu G_S takovým způsobem, aby se regulovaná veličina y udržovala na žádané hodnotě w a regulační odchylka e byla zcela eliminována nebo co nejmenší.



Obr. 4. Základní zpětnovazební zapojení [4]

Signály a jim odpovídající obrazy a dále pak přenosy ve výše uvedeném obrázku mohou být buď spojité, nebo diskrétní, tj. spojité systémy jsou funkcí času t , diskrétní systémy jsou funkcí diskrétního času kT , kde k představuje krok a T periodu vzorkování. Spojité obrazy a přenosy jsou funkcí komplexní proměnné s , diskrétní obrazy a přenosy jsou funkcí komplexní proměnné z . [4]

Vlivem poruchy v dojde ke změně regulované veličiny, která se odchýlí od požadované hodnoty, která je nastavena prostřednictvím žádané hodnoty w . Není-li shoda mezi žádanou hodnotou w a regulovanou veličinou y , vznikne regulační odchylka $e = w - y$. Regulační odchylku odstraňuje regulátor svým zásahem do regulované soustavy prostřednictvím akční veličiny u . Vlivem záporné vazby je zásah regulátoru v takovém charakteru, že působí zmenšování regulační odchylky. [3]

Základní třídění regulátorů lze provést podle přívodu energie, a sice na regulátory direktní (přímé) a indirektní (nepřímé). Direktní regulátory nepotřebují ke své činnosti pomocnou energii a veškerou potřebnou energii odebírají z regulované soustavy. Patří mezi ně např.: automatický regulátor hladiny I. V. Polzunova z roku 1765 a regulátor otáček parního stroje J. Watta z roku 1784. O jejich vhodné konstrukci svědčí skutečnost, že se používají v modifikovaném provedení dosud. Jejich předností je jednoduchost, spolehlivost, ale regulační vlastnosti nebyly dobré.

Indirektní (nepřímé) regulátory vyžadují pro svůj chod zdroj pomocné energie. Podle zdroje pomocné energie jsme schopni je rozdělit na pneumatické, hydraulické a elektrické regulátory.

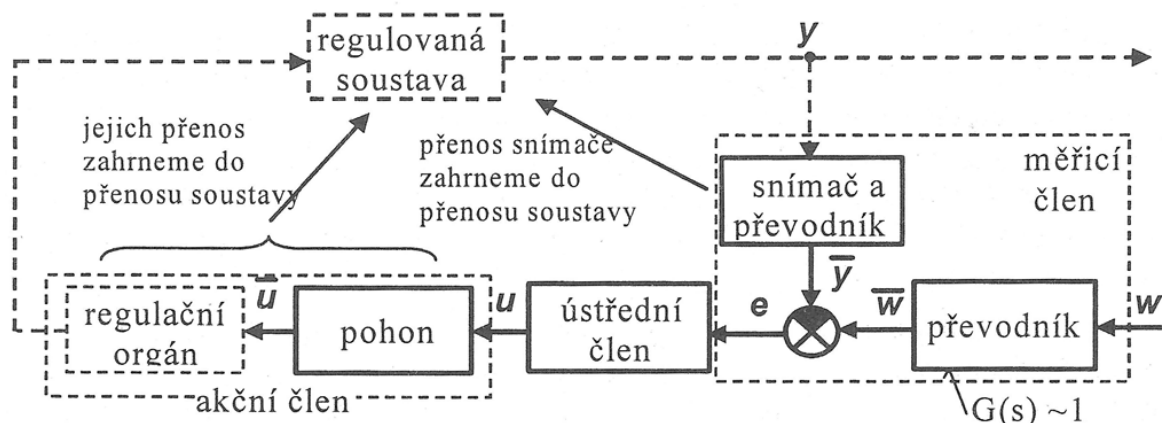
Pneumatické regulátory jsou použity v závodech, kde je proveden rozvod tlakového vzduchu. Dříve se hojně využívaly ve výbušných prostředích, kde se nemohly použít elektrické regulátory. Dnes jsou tyto regulátory vytlačeny právě elektrickými regulátory vyrobené v nevýbušném provedení. Ke své činnosti používají ventily, membrány, clony a podobné pneumatické prvky. [3]

Hydraulické regulátory využívají k napájení tlakový olej. Tyto regulátory mohou vyvinout velkou sílu, a proto se používají hydraulické servoválce jako silové ovládací servomotory např. k ovládání regulačních lopatek vodních turbín.

Elektrické regulátory, které využívají k napájení elektrickou energii, jsou většinou elektrická zařízení (operační zesilovače), pouze akční členy jsou elektromechanické (servomotory, elektromagnety). Největší výhodou elektrických regulátorů jsou dobré regulační vlastnosti, malé rozměry a malá hmotnost, vysoká energetická účinnost, čistý a bezhlučný provoz, relativně nízká cena. Nevýhodou je větší složitost, která komplikuje opravy. Se zavedením integrovaných obvodů a dalších moderních součástek vzrostla i spolehlivost těchto systémů. V dnešní době nemají konkurenci ve srovnání s ostatními typy regulátorů. [3]

Další dělení regulátorů je možné provést podle průběhu vstupního signálu na spojitý a nespojitý. Hlavními stavebními prvky spojitých regulátorů pracujících se spojitým signálem jsou operační zesilovače. Kvalita regulace je velmi dobrá a návrh není obtížný. Spojité regulátory jsou základem regulační techniky. Nespojité regulátory pracují s nespojitými signály. Dnes do popředí vstupují diskrétní regulátory, jejichž výstupem je posloupnost numerických hodnot – jsou to číslicové počítače ve funkci regulátoru.

Většina průmyslových regulátorů jsou nepřímé regulátory, které vyžadují vnější energii pro svou funkčnost. Základem regulátoru jsou tři prvky zapojené v sérii a to měřící člen (čidlo, snímač), ústřední člen a akční člen (pohon, servomotor).



Obr. 5. Blokové uspořádání regulátoru [3]

Měřicím členem zjišťujeme skutečnou hodnotu regulované veličiny, převádíme ji u elektrických regulátorů na elektrické napětí a vytváříme regulační odchylku. Měřicí člen se skládá ze snímače s převodníkem, z převodníku řídicí veličiny a z porovnávacího členu.

Porovnávací člen provádí odečítání výstupního signálu z čidla žádané hodnoty regulované veličiny a vytváří regulační odchylku.

Ústřední člen regulátoru zpracovává regulační odchylku. Regulační odchylka je zpravidla zesilována, integrována a derivována. Označuje se jako regulátor v užším slova smyslu a často tím pádem pod pojmem regulátor myslíme ústřední člen. Ústřední člen má rozhodující vliv na regulační pochod. Jeho vlastnosti můžeme volit a právě při návrhu regulátoru hledáme takový ústřední člen s takovými parametry, které nám zajistí vyhovující vlastnosti celého obvodu. [3]

Akční člen regulátoru se skládá z pohonu a regulačního orgánu. Regulační orgán je už často považován za součást regulované soustavy. Pohon nebo někdy též servomotor dodává energii regulačnímu orgánu, mění jeho polohu, natočení, otevření apod. Regulační orgán přímo ovládá akční veličinu. Mezi regulační orgány zahrnujeme různé ventily, klapky, šoupátka apod. U regulačního orgánu požadujeme lineární závislost mezi polohou pohonu a akční veličinou. [3]

1.4 Druhy regulace

Podle funkce regulačního obvodu rozeznáváme několik druhů regulace. V praxi je nejčastějším případem regulace na konstantní hodnotu, kdy žádaná hodnota regulované

veličiny má konstantní průběh tj. $w(t) = konst.$ Je to např. regulace teploty v místnosti, regulace otáček strojů nebo regulace výšky hladiny. U tohoto typu regulace je zvláště důležitá kompenzace vlivu poruchových veličin.

Systémy realizující vlečnou regulaci označujeme obvykle jako sledovací. Ve sledovacích systémech není průběh žádané hodnoty $w(t)$ předem znám. Cílem regulace je, aby regulovaná veličina $y(t)$ co nejpřesněji sledovala průběh žádané hodnoty $w(t)$. Příkladem je dávkování chemikálie do vody, kdy požadujeme změnu množství dávkované chemikálie v závislosti od okamžitého průtočného množství vody.

Programová regulace je zvláštním typem vlečné regulace. Průběh žádané hodnoty regulované veličiny $w(t)$ je dán tzv. časovým plánem – programem. Jako příklad můžeme uvést regulaci teploty v pecích, kde se teplota mění podle časového programu.

1.5 Logické řízení

Logické řízení je činnost, při níž se logickým obvodem zpracovávají informace o řízeném procesu a podle nich ovládají příslušná zařízení tak, aby se dosáhlo předepsaného cíle. K řízení se využívá dvouhodnotových veličin, které jsou formálně interpretovány jako logická 0 a logická 1. Jsou tedy vždy jen dvě možnosti, tj. ventil je otevřen nebo zavřen, vypínač je sepnut nebo vypnut, atd. Také informace o stavu objektu jsou dvouhodnotové veličiny, tj. hladina je nad nebo pod minimální hodnotou, teplota je nad nebo pod požadovanou hodnotou atd. Dvouhodnotové veličiny jsou analogické s proměnnými výrokové logiky, a proto jsou vztahy mezi proměnnými nazývány logické funkce a řídicí obvody pracující na tomto principu jsou logické řídicí obvody.

1.5.1 Logické členy a logické obvody

Logický obvod je fyzikální systém, který realizuje logické operace. Je realizován skupinou logických členů vzájemně spojených tak, aby realizovaly žádané logické funkce.

Logický obvod je takový obvod, u něhož může každá veličina na vstupu i výstupu v ustáleném stavu nabývat s určenou přesností jednu ze dvou možných hodnot.

Podle způsobů realizace logické funkce rozlišujeme kombinační obvody (bez paměti) a sekvenční obvody (s pamětí).

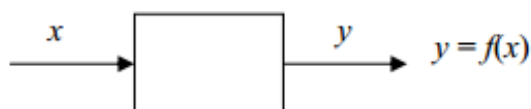
Kombinační obvody

Kombinační logický obvod je obvod, v němž je výstupní stav jednoznačně určen okamžitým vstupním stavem. Tedy ke každému vstupnímu stavu vyjádřenému kombinací hodnot vstupních proměnných odpovídá jednoznačně jeden výstupní stav vyjádřený kombinací hodnot výstupních proměnných. Hodnota každé z výstupních proměnných je určena Booleovou funkcí F_i , $f_i = F_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, kde $i = 1, 2, 3, \dots, m$.

Obvod neobsahuje paměťové členy ani uzavřené smyčky (zpětnou vazbu). Logickým členem je míněno elementární logické zařízení, uskutečňující (realizující) elementární logickou funkci. [4]

Rozdělení kombinačních logických obvodů

A) Logická funkce jedné proměnné



Obr. 6. Logická funkce jedné proměnné [4]

Logické funkce jedné proměnné jsou 4, můžeme je vyjádřit pomocí pravdivostních tabulek a algebraickým zápisem.

$y = 0$

x	1	0	falsum (lež)
y	0	0	

$y = 1$

x	1	0	verum (pravda)
y	1	1	

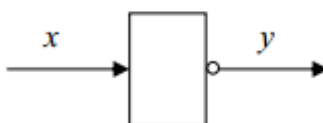
$y = x$

x	0	1	aserce (opakování)
y	0	1	

$y = \bar{x}$

x	0	1	negace (opak)
y	1	0	

Nejčastěji se z uvedených funkcí používá funkce negace (opak).



Obr. 7. Značka funkce negace [4]

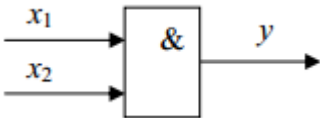
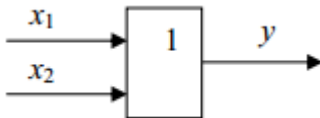
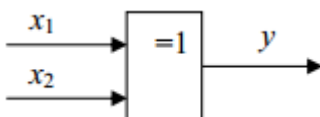
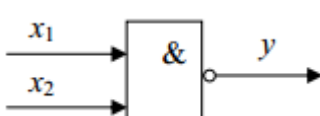
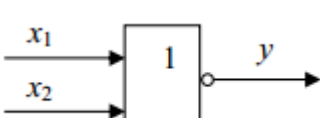
B) Logická funkce dvou proměnných



Obr. 8. Logická funkce dvou proměnných [4]

Logických funkcí dvou proměnných je celkem 16, můžeme je vyjádřit pomocí pravdivostních tabulek a algebraickým zápisem (rovnicí).

Tab. 1. Základní logické funkce dvou proměnných

Název funkce	Algebraické vyjádření	Schématická značka	Pravdivostní tabulka															
Konjunkce, logický součin, AND	$y = x_1 * x_2$ $y = x_1 \wedge x_2$		<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
x_1	x_2	y																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																
Disjunkce, logický součet, OR	$y = x_1 + x_2$ $y = x_1 \vee x_2$		<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
x_1	x_2	y																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
Nonekvivalence, eXklusivní OR, XOR	$y = x_1 \oplus x_2$ $y = x_1 \text{ xor } x_2$		<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
x_1	x_2	y																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
Negace konjunkce, Shefferova funkce, NAND	$y = \overline{x_1 * x_2}$ $y = x_1 \uparrow x_2$		<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
x_1	x_2	y																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
Negace disjunkce, Pierceova funkce, NOR	$y = \overline{x_1 + x_2}$ $y = x_1 \downarrow x_2$		<table><tr><th>x_1</th><th>x_2</th><th>y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	x_1	x_2	y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
x_1	x_2	y																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																

Způsoby vyjádření logické funkce:

- Boolovskými funkcemi, tj. negací, konjunkcí, disjunkcí,
- Funkcí NAND – pro realizaci stačí jediný typ obvodu (NAND),
- Funkcí NOR – pro realizaci stačí jediný typ obvodu (NOR).

Sekvenční obvody

Sekvenční obvody jsou obvody, u kterých výstupní hodnota závisí nejenom na kombinaci vstupních hodnot, ale také na určité posloupnosti předchozích vstupních hodnot, které jsou uchovávány, jako tzv. vnitřní stav tzn., že tento typ obvodu obsahuje zpětnou vazbu.

Nejjednodušším sekvenčním obvodem jsou klopné obvody, ze kterých je možno sestavit složitější obvody jako například čítače, registry, atd. Jeden klopný obvod je schopen uchovat informaci o velikosti jeden bit.

Klopné obvody nabývají dvou fyzikálně odlišných stavů reprezentovaných dvěma úrovněmi. Jedná se v podstatě o generátory obdélníkového signálu, které můžeme rozdělit do dvou základních skupin a to na asynchronní a synchronní.

Asynchronní klopné obvody jsou obvody bez synchronizačního vstupu. Čím složitější systém z asynchronních prvků sestavíme, tím větší vliv bude mít zpoždění hradel na funkčnost obvodu. Systém se může lehce stát nestabilním a nepředvídatelným. Asynchronní obvody jsou nevhodné pro konstrukci složitějších digitálních systémů. [4]

Synchronní klopné obvody jsou obvody, které obsahují na vstupu synchronizační signál (C – clock). Ke změně stavu může dojít pouze v případě aktivace synchronizačního signálu, např. hodinového impulsu (náběžnou nebo sestupnou hranou). Princip synchronizace je takový, že jestliže je na synchronizační vstup přivedena logická 0, obvod nereaguje na vstup. V případě přivedení logické 1 na synchronizační vstup se obvod chová stejně jako asynchronní.

Další dělení klopných obvodů můžeme provést podle počtu stavů a způsobu přepínání. Můžeme tedy rozlišit následující druhy: bistabilní, monostabilní a astabilní klopné obvody.

1.6 Spojité lineární řízení

Spojité řízení je takové, kde jak řídicí tak i řízený systém jsou spojité, tj. vstupně/výstupní veličiny těchto systému jsou veličiny spojité v čase. Spojitý řídicí systém vytváří nepřetržitou vazbu mezi vstupy a výstupy. Při vyšetřování vlastností dynamického systému a způsobu jeho řízení je potřebné zkoumat, jak působí jedna část systému na druhou, jaký vliv mají tyto interakce na chování celého systému v daném prostředí a jak zpětně působí systém na prostředí nebo na jiné systémy. Vhodným způsobem zjišťování těchto vlivů je určení matematického popisu reálného systému tj. vytvoření jeho matematického modelu, který má být rovnocenným s reálným objektem. [4]

Při popisu chování, tj. analýze i syntéze spojitých lineárních systému řízení je třeba často řešit velmi složité diferenciální rovnice. Ke zjednodušení těchto operací nám slouží Laplaceova transformace. Analýza systému se přitom zabývá zejména popisem statických a dynamických vlastností systému, zkoumání vztahů mezi nimi, vyšetřování stability, atd. Syntéza systému se zabývá stanovením struktury a parametrů regulačního obvodu tak, aby byly splněny požadavky kladené na regulační pochod. [4]

1.6.1 Popis spojitého systému

Popisujeme-li systém pouze relacemi mezi vstupem a výstupem, hovoříme o vnějším popisu. V případě, že se k popisu systému používají další veličiny, které nemusejí být na systému přímo měřitelné, mluvíme o vnitřním popisu (stavový model).

Vnější popis lineárního systému můžeme vyjádřit vzájemně rovnocennými způsoby jako např.: lineární diferenciální rovnice, přenos systému v Laplaceově transformaci, rozložení pólů a nul v komplexní rovině, impulsní funkce a impulsní charakteristika, přechodová funkce a přechodová charakteristika, frekvenční přenos a frekvenční charakteristika, statická charakteristika.

Spojitý systém s jednou vstupní a výstupní veličinou lze popsat lineární diferenciální rovnicí n -tého řádu ve tvaru:

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + b_{m-1} u^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 u'(t) + b_0 u(t) \quad (1)$$

,kde a_i, b_i jsou konstantní koeficienty, $u(t)$ je vstupní veličina systému a $y(t)$ je výstupní veličina systému.

Počáteční podmínky jsou uvažovány následující $y(0) = y'(0) = \dots = y^{(n-1)}(0) = 0$,
 $u(0) = u'(0) = \dots = u^{(m-1)}(0) = 0$.

Použitím Laplaceovy transformace s uvažováním nulových počátečních podmínek se určí z diferenciální rovnice přenos systému, který je definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupních veličin k Laplaceovu obrazu vstupních veličin.

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0) U(s) \quad (2)$$

Přenos systému je pak dán vztahem:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3)$$

Přenos systému můžeme vyjádřit také pomocí pólů a nulových bodů ve tvaru:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m}{a_n} \cdot \frac{(s - n_1) \dots (s - n_j) \dots (s - n_m)}{(s - p_1) \dots (s - p_j) \dots (s - p_n)} \quad (4)$$

,kde n - jsou nuly přenosu (kořeny čitatele) a p - jsou póly přenosu (kořeny jmenovatele)

Dalším možným způsobem zápisu přenosu je zápis pomocí časových konstant, pro něž platí, že převrácené hodnoty reálných pólů se nazývají časové konstanty jmenovatele, tj. $T_i = -\frac{1}{p_i}$ a převrácené hodnoty reálných nul jsou nazývány jako časové

konstanty čitatele, tj. $\tau_i = -\frac{1}{n_i}$.

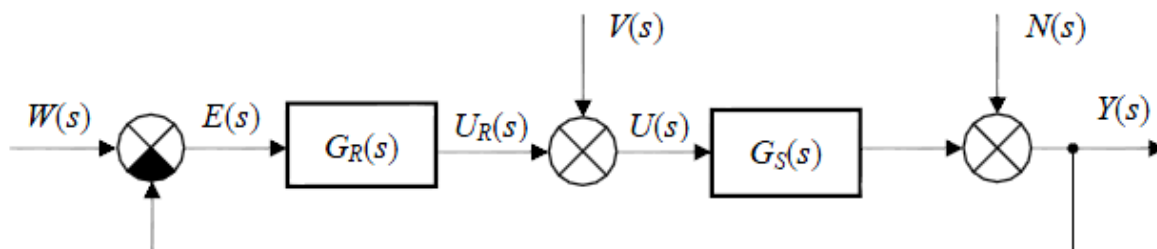
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{a_0} \cdot \frac{(1 + s\tau_1) \dots (1 + s\tau_2) \dots (1 + s\tau_m)}{(1 + sT_1) \dots (1 + sT_2) \dots (1 + sT_n)} \quad (5)$$

,kde poměr $\frac{b_0}{a_0} = k_0$ se nazývá zesílení systému.

Řádem systému zadaného přenosem se rozumí stupeň jmenovatele, resp. řád diferenciální rovnice n , relativní řád systému je pak dán rozdílem mezi stupněm jmenovatele a čitatele.

1.6.2 Spojitý regulační obvod

Na obrázku (Obr. 9) je uvedeno schéma zapojení spojitého uzavřeného regulačního obvodu spolu s popisem jednotlivých přenosů a signálů.



Obr. 9. Blokové schéma spojitého uzavřeného regulačního obvodu [4]

$G_S(s)$ - přenos regulované soustavy, $G_R(s)$ - přenos regulátoru, $W(s)$ - L-obraz žádané hodnoty $\rightarrow w(t)$ žádaná hodnota, $V(s), N(s)$ - L obrazy poruchových veličin $\rightarrow v(t), n(t)$ poruchy, $U(s)$, resp. $U_R(s)$ - L-obraz akční veličiny $\rightarrow u(t)$ - akční veličina, $Y(s)$ - L-obraz výstupní veličiny $\rightarrow y(t)$ - výstupní veličina, $E(s)$ - L-obraz regulační odchylky $\rightarrow e(t)$ - regulační odchylka, přičemž platí $E(s) = W(s) - Y(s)$, $e(t) = w(t) - y(t)$, tedy regulátor pracuje tak, aby zmenšoval, případně zcela odstranil regulační odchylku. [4]

1.6.3 Dynamické vlastnosti spojitých regulátorů

Zpracování regulační odchylky e je u regulátoru rozloženo do tří paralelních složek, kde každá svým způsobem ovlivňuje velikost akčního zásahu u pro odstranění regulační odchylky.

Dynamické chování regulátoru můžeme popsat následující rovnicí:

$$\dots + T_2 u''(t) + T_1 u'(t) + u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

,kde $r_0 e(t)$ je proporcionální složka regulátoru, $r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$ je integrační složka regulátoru,

$r_1 \frac{de(t)}{dt}$ je derivační složka regulátoru a $\dots + T_2 u''(t) + T_1 u'(t) + u(t)$ jsou setrvační členy regulátoru.

Jde o popis chování skutečného PID regulátoru (PID regulátor se setrvačnými členy). Provedeme Laplaceovu transformaci rovnice a za předpokladu splnění nulových počátečních podmínek, můžeme tuto rovnici upravit do následujícího tvaru:

$$G_R(s) = \frac{E(s)}{U(s)} = \frac{r_0 \left(1 + \frac{r_{-1}}{r_0} \frac{1}{s} + \frac{r_1}{r_0} s \right)}{1 + T_1 s + T_2^2 s^2 + \dots} = \frac{r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)}{1 + T_1 s + T_2^2 s^2 + \dots} = \frac{k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)}{1 + T_1 s + T_2^2 s^2 + \dots} \quad (7)$$

,kde r_0 je proporcionální konstanta regulátoru, r_{-1} je integrační konstanta regulátoru, r_1 derivační konstanta regulátoru, T_I je integrační časová konstanta, T_D je derivační časová konstanta a k_p je zesílení regulátoru.

Pokud časové konstanty zpožďujících členu položíme rovno nule ($T_1=0, T_2=0, \dots$) dostaneme rovnici a přenos ideálního PID regulátoru.

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

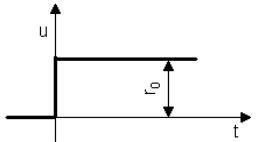
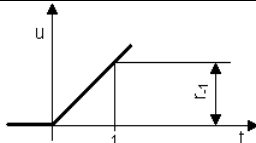
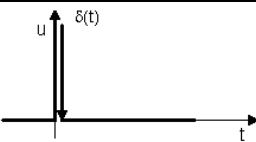
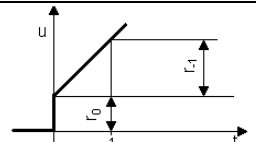
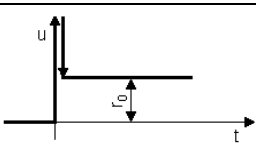
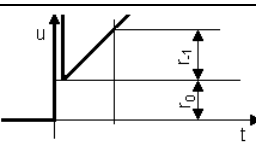
$$G_R(s) = \frac{E(s)}{U(s)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s \quad (9)$$

$$G_R(s) = \frac{E(s)}{U(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (10)$$

Podle toho, které z konstant r_0 , r_{-1} , r_1 , resp. k_p , T_I , T_D položíme rovny nule, dostáváme přenosy pro základní typy regulátorů. P regulátoru, I regulátor, derivační složka se používá pouze u kombinovaných regulátorů (D regulátor by nic nevěděl o skutečné hodnotě regulační odchylky, neboť na vstupu je signál úměrný první derivaci – rychlosti odchylky) a kombinované regulátory, tj. PD regulátoru, PI regulátor a PID regulátor.

Tyto regulátory můžeme uvažovat jako ideální (bez zpožďovacích členů) nebo jako skutečné (se zpožďujícími členy). V tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny vlastnosti ideálních regulátorů.

Tab. 2. Dynamické vlastnosti spojitých regulátorů

Typ	Diferenciální rovnice	Přechodová charakteristika	Přenos $G_R(s)$
P	$u = r_0 e$		$G_R(s) = r_0$
I	$u = r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$		$G_R(s) = \frac{r_{-1}}{s}$
D	$u = r_1 \frac{de}{dt}$		$G_R(s) = r_1 s$
PI	$u = r_0 e + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau$		$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s}$
PD	$u = r_0 e + r_1 \frac{de}{dt}$		$G_R(s) = r_0 + r_1 s$
PID	$u = r_0 e + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de}{dt}$		$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$

1.6.4 Charakteristika činnosti spojitých regulátorů

Proporcionální regulátor je vhodný k regulaci proporcionálních i integračních soustav se setrvačností 1. řádu a se střední časovou konstantou, popř. menším dopravním zpožděním. Zanechává trvalou regulační odchylku a má dobré stabilní vlastnosti.

Integrační regulátor je vhodný k regulaci proporcionálních soustav se setrvačností 1. řádu s malou časovou konstantou a bez dopravního zpoždění. Pracuje bez trvalé regulační odchylky. Nevyhovuje podmínkám stability, pokud reguluje astatickou soustavu.

PI je vhodný k regulaci proporcionálních i integračních soustav se setrvačností vyšších řádů s libovolnými časovými konstantami a s velkým dopravním zpožděním. Vlivem I složky odstraňuje trvalou regulační odchylku, P složka zlepšuje stabilní vlastnosti regulačního obvodu.

PD je vhodný k regulaci proporcionálních i integračních soustav se setrvačností vyšších řádů se středními časovými konstantami a s velkým dopravním zpožděním. Zanechává trvalou regulační odchylku. Regulační obvod s tímto regulátorem má lepší stabilní vlastnosti než při použití čistě proporcionálního regulátoru.

PID je vhodný k regulaci proporcionálních i integračních soustav se setrvačností vyšších řádů s libovolnými časovými konstantami a s delším dopravním zpožděním. Vlivem I složky odstraňuje trvalou regulační odchylku, vlivem D složky zlepšuje stabilní vlastnosti regulačního obvodu (natáčí fázi amplitudové fázové charakteristiky v komplexní rovině o $+90^\circ$. Informuje regulátor o změně regulační odchylky a regulátor tedy může v "předstihu" na tuto změnu reagovat).

Více než v 95% průmyslových regulačních obvodů dominují PID regulátory, ve většině případů s vypnutou derivační složkou. Na většinu technologických procesů, zde popsané regulátory vystačí.

1.7 Diskrétní řízení

Diskrétní řízení je důsledkem nasazení počítačů jako regulátorů (řídících systémů). U řídících počítačů, které nedovedou zpracovávat spojitý signál, je nutný převádět spojitý signál na diskrétní. Diskrétní řídicí systém vytváří vztah mezi vstupy a výstupy jako vztah mezi posloupností impulsů, snímaných v časovém sledu daném tzv. vzorkovací periodou. Mezi okamžiky vzorkování není regulovaná veličina měřena a akční veličina není nijak upravována. Tato vzorkovací perioda je tím kratší, čím rychlejší je řízený proces.

Spojitě řízení je dnes spíše na ústupu, logické a diskrétní řízení je přitom možno realizovat na jednom a tomtéž zařízení. Diskrétní řízení realizované s velmi krátkou periodou vzorkování může být přibližně shodná se spojitým, volba periody vzorkování však výrazně ovlivňuje chování výstupní veličiny řízeného systému z hlediska stability.

Při popisu chování, tj. analýze i syntéze diskrétních lineárních systému řízení je třeba často řešit velmi složité diferenční rovnice. Ke zjednodušení těchto operací nám slouží

Z - transformace. Analýza systému se přitom zabývá zejména popisem statických a dynamických vlastností systému, zkoumání vztahů mezi nimi, vyšetřování stability, atd. Syntéza systému se zabývá stanovením struktury a parametrů regulačního obvodu tak, aby byly splněny požadavky kladené na regulační pochod.

1.7.1 Popis diskrétního systému

Popisujeme-li systém pouze relacemi mezi vstupem a výstupem, hovoříme o vnějším popisu. V případě, že se k popisu systému používají další veličiny, které nemusejí být na systému přímo měřitelné, mluvíme o vnitřním popisu (stavový model).

Vnější popis lineárního systému můžeme vyjádřit vzájemně rovnocennými způsoby jako např. lineární diferenční rovnice, přenos systému v Z-transformaci, rozložení pólů a nul v komplexní rovině, impulsní funkce a impulsní charakteristika, přechodová funkce a přechodová charakteristika, frekvenční přenos a frekvenční charakteristika, statická charakteristika.

Diferenční tvar

Diskrétní systém s jednou vstupní a výstupní veličinou lze popsat lineární diferenční rovnicí n -tého řádu ve tvaru:

$$\tilde{a}_n \Delta y^{(n)}(kT) + \dots + \tilde{a}_1 \Delta y(kT) + \tilde{a}_0 \Delta y(kT) = \tilde{b}_m u^{(m)}(kT) + \dots + \tilde{b}_1 \Delta u(kT) + \tilde{b}_0 \Delta u(kT) \quad (11)$$

,kde \tilde{a}_i, \tilde{b}_i jsou konstantní koeficienty systému, $u(kT)$ je vstupní veličina systému, $y(kT)$ je výstupní veličina systému. Počáteční podmínky jsou uvažovány následující $y(0) = \Delta y(0) = \dots = \Delta^{n-1} y(0) = 0$, $u(0) = \Delta u(0) = \dots = \Delta^{m-1} u(0) = 0$.

Použitím Z-transformace s uvážením nulových počátečních podmínek se určí z diferenční rovnice přenos systému, který je definován jako poměr Z-obrazu výstupní veličiny k Z-obrazu vstupní veličiny.

$$(\hat{a}_n z^n + \hat{a}_{n-1} z^{n-1} + \dots + \hat{a}_1 z + \hat{a}_0) Y(z) = (\hat{b}_m z^m + \hat{b}_{m-1} z^{m-1} + \dots + \hat{b}_1 z + \hat{b}_0) U(z) \quad (12)$$

Přenos systému je pak dán vztahem:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\hat{b}_m z^m + \hat{b}_{m-1} z^{m-1} + \dots + \hat{b}_1 z + \hat{b}_0}{\hat{a}_n z^n + \hat{a}_{n-1} z^{n-1} + \dots + \hat{a}_1 z + \hat{a}_0} \quad (13)$$

Mezi koeficienty \tilde{a}_i, \tilde{b}_i a \hat{a}_i, \hat{b}_i platí přepočtové vztahy, jež je možno získat po úpravě dané diferenční rovnice s využitím věty o dopředné diferenci obecně n -tého řádu při nulových počátečních podmínkách, srovnáním koeficientů mocnin.

Pokud by byla diferenční rovnice zapsána ve tvaru zpětné difference, tedy:

$$\bar{a}_n \nabla^n y(kT) + \dots + \bar{a}_1 \nabla y(kT) + \bar{a}_0 y(kT) = \bar{b}_m \nabla^m u(kT) + \dots + \bar{b}_1 \nabla u(kT) + \bar{b}_0 u(kT) \quad (14)$$

a uvažovány následující počáteční podmínky $y(0) = \nabla y(0) = \dots = \nabla^{n-1} y(0) = 0$, $u(0) = \nabla u(0) = \dots = \nabla^{m-1} u(0) = 0$ pak by byl výsledný přenos v záporných mocninách definován vztahem:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b'_m + b'_{m-1} z^{-1} + \dots + b'_1 z^{-(m-1)} + b'_0 z^{-m}}{a'_n + a'_{n-1} z^{-1} + \dots + a'_1 z^{-(n-1)} + a'_0 z^{-n}} \quad (15)$$

Mezi koeficienty \bar{a}_i, \bar{b}_i a a'_i, b'_i platí přepočtové vztahy, jež je možno získat po úpravě dané diferenční rovnice s využitím věty o zpětné diferenci obecně n -tého řádu při nulových počátečních podmínkách, srovnáním koeficientů mocnin.

Rekurentní (normální) tvar

$$\begin{aligned} \hat{a}_n y[(k+n)T] + \hat{a}_{n-1} y[(k+n-1)T] + \dots + \hat{a}_1 y[(k+1)T] + \hat{a}_0 y[kT] = \\ = \hat{b}_m u[(k+m)T] + \hat{b}_{m-1} u[(k+m-1)T] + \dots + \hat{b}_1 u[(k+1)T] + \hat{b}_0 u[kT] \end{aligned} \quad (16)$$

pro počáteční podmínky ($k=0$), které jsou rovny funkčním hodnotám $y(0), y(T), \dots, y[(n-1)T]$, $u(0), u(T), \dots, u[(m-1)T]$, $m \leq n$ lze z tohoto tvaru odvodit výsledný přenos, pokud by výše uvedené počáteční podmínky byly nulové. Využitím věty o posunutí v časové oblasti vlevo (předstih) by pak přenos odpovídal přenosu uvedenému výše, tj. rovnici s přenosem v kladných mocninách z (11).

K popisu systému lze také použít následující rekurentní tvar:

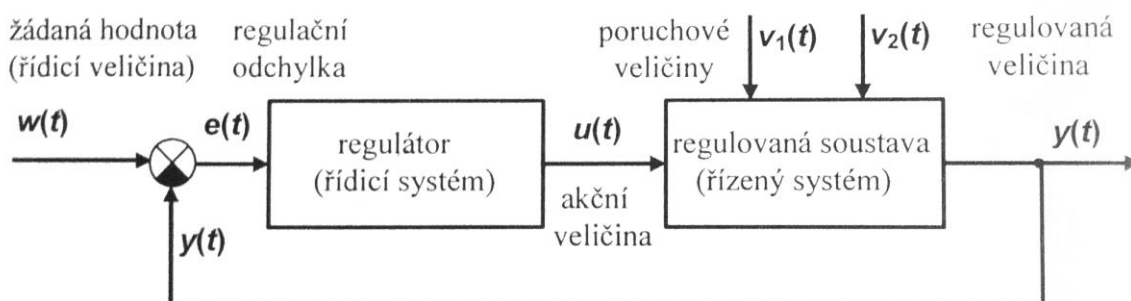
$$\begin{aligned} a'_n y[(k+n)T] + a'_{n-1} y[(k+n-1)T] + \dots + a'_1 y[(k+1)T] + a'_0 y[kT] = \\ = b'_m u[(k+m)T] + b'_{m-1} y[(k+m-1)T] + \dots + b'_1 u[(k+1)T] + b'_0 y[kT] \end{aligned} \quad (17)$$

pro počáteční podmínky ($k=0$), které jsou rovny funkčním hodnotám $y(-T), \dots, y[(-n+1)T], y(-nT), u(-T), \dots, u[(-m+1)T], u(-mT)$, $m \leq n$ lze z tohoto tvaru opět odvodit přenos, pokud by výše uvedené počáteční podmínky byly nulové. Využitím věty o posunutí v časové oblasti vpravo (zpoždění) by pak přenos odpovídal přenosu uvedenému výše, tj. rovnici s přenosem v kladných mocninách z (13).

Diferenční tvar (11), resp. (14) je přímým analogem lineární diferenciální rovnice n -tého řádu, která slouží k popisu systému. U diskretních systémů se využívá rekurentního tvaru (17), neboť při znalosti počátečních podmínek a vstupního signálu je možné určit řešení přímo rekurentním způsobem.

1.7.2 Diskrétní regulační obvod

Diskrétní regulační obvody jsou takové, v nichž alespoň jeden člen pracuje diskrétně, tj. v diskretních časových okamžicích (zpravidla rovnoměrných – ekvidistantních). Blokové schéma diskretního regulačního obvodu je na obrázku (Obr. 10). Jedná se o nejběžnější typ regulačního obvodu, kdy je regulována spojitá soustava, která je prostřednictvím analogově digitálního převodníku (tvarovače) vzorkována s periodou T . Vlastní řídicí algoritmus určí hodnotu akčního zásahu, která pomocí digitálně-analogovým převodníkem (tvarovačem) působí na regulovanou soustavu.



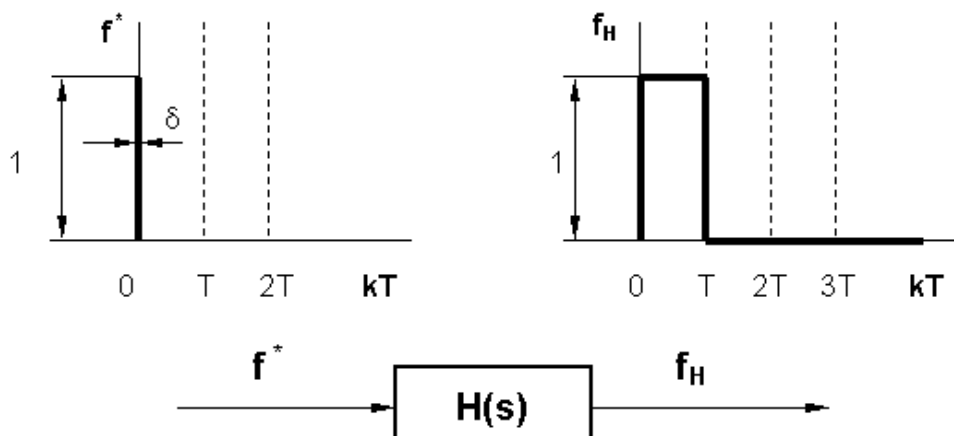
Obr. 10. Diskrétní regulační obvod [3]

Vzorkovač a vzorkování

Vzorkovač provádí periodické snímání hodnoty vstupní veličiny. Její hodnotu odebírá v pravidelných intervalech ve formě vzorků a mezi dvěma těmito odběry nezná průběh snímané veličiny. Ve schématech se vzorkovač (analogově-digitální převodník) znázorňuje jako spínač.

Tvarovač a tvarování

Působí-li diskretní signál jako vstupní veličina do spojitě regulované soustavy, je potřeba ji upravit, tvarovat. Diskretní signál obsahuje řadu nekonečně krátkých impulsů, jejichž amplituda je nositelem informace. Tvarování diskretního signálu je přeměna diskretního signálu na signál po částech spojitý. Většinou se používá tvarovač nultého řádu, kde výstupní veličina je po celou dobu periody T konstantní a je rovna amplitudě vstupního signálu, přivedeného na počátku této periody. Výstupem z tvarovače je schodovitá funkce.



Obr. 11. Funkce tvarovacího členu nultého řádu [6]

1.7.3 Volba periody vzorkování

Perioda vzorkování T vstupuje v diskretních algoritmech regulátorů jako stavitelný parametr. Vzorkovací periodu T a tím i vzorkovací kmitočet ω_v není možné volit libovolně. Její velikost má zásadní vliv na stabilitu a na další vlastnosti diskretního regulačního obvodu. [4]

Dle Shannonova-Kotelnikova teorému je pro dokonalou reprodukci spojitého signálu při převodu z číslicového tvaru nutné, aby vzorkovací frekvence ω_v byla minimálně dvakrát větší než maximální frekvence ve spektru měřeného signálu ω_m . [7]

$$\omega_v \geq 2\omega_m; \quad T \leq \frac{\pi}{\omega_m} \quad (18)$$

Pro přibližné určení vzorkovací periody lze použít některý ze vztahů v uvedené tabulce (Tab. 3) rozdělených podle typů regulovaných soustav, případně typu regulátoru, přičemž uvedené volby pro periodu vzorkování T jsou navrženy podle dynamiky regulované soustavy.

Tab. 3. Přibližná volba periody vzorkování

Hledisko volby	Vztah	Poznámky
Proporcionální nekmitavá regulovaná soustava	$T = \left(\frac{1}{15} \div \frac{1}{6} \right) t_{0,95}$	6-15 vzorků za čas, kdy přechodová charakteristika regulované soustavy dosáhne 95% svého stavu
Proporcionální kmitavá regulovaná soustava	$T = \left(\frac{1}{5} \div \frac{1}{2} \right) T_0$	T_0 - časová konstanta kmitavé soustavy
Regulovaná soustava s dominantním dopravním zpožděním	$T = \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{3} \right) L$	L - dopravní zpoždění
Regulátor s diferenční složkou	$T = (0,1 \div 0,5) T_D$	T_D - derivační časová konstanta

1.7.4 Diskrétní náhrada spojitých operací v číslicovém PID regulátoru

Diskrétní (číslíkové) regulátory s pevně danou strukturou mají předem známý tvar popsany rovnicí nebo přenosem a jsou analogií spojitých PID (proporcionálně-integračně-derivačních) regulátorů, jedná se tedy o PSD (proporcionálně-sumačně-diferenční) regulátor nebo diskretní PID regulátory.

Činnost ideálního spojitého PID regulátoru lze popsat vztahem:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (19)$$

a Laplaceovým obrazem (při nulových počátečních podmínkách, tj. $u(0) = 0$)

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = \frac{q_0 + q_1 s + q_2 s^2}{s} \quad (20)$$

,kde k_p je zesílení regulátoru, $T_I = \frac{k_p}{k_I}$ je integrační časová konstanta a $T_D = \frac{k_D}{k_p}$

je derivační časová konstanta.

Regulátor spojitého PID regulátoru definuje hodnotu akční veličiny $u(t)$ v libovolném časovém okamžiku t na základě průběhu regulační odchylky $e(t) = w(t) - y(t)$.

Jestliže tento okamžik splyne s k -tým vzorkovacím okamžikem, tj. $t = kT$, je možné uvedenou rovnici spojitého PID regulátoru přepsat do následujícího tvaru:

$$u(kT) = k_p e(kT) + \frac{k_p}{T_I} I(kT) + k_p T_D D(kT) + u(0) \quad (21)$$

,který umožňuje určit u číslicového regulátoru akční veličinu v k -tém vzorkovacím okamžiku, pokud budou známy hodnoty integrálu $I(kT)$ a derivace $D(kT)$ v diskretním časovém okamžiku $t = kT$. Určení těchto hodnot, tedy $I(kT)$ a $D(kT)$ se provede numerickým výpočtem, kde je uvažováno, že v k -tém vzorkovacím okamžiku jsou známy diskretní hodnoty regulační odchylky (současné a minulé). Většinou se využívá několika jednoduchých způsobů přibližných diskretních náhrad spojitých algoritmů integrace a derivace.

Náhrada integrace

Zpětná obdélníková náhrada (ZOBD):

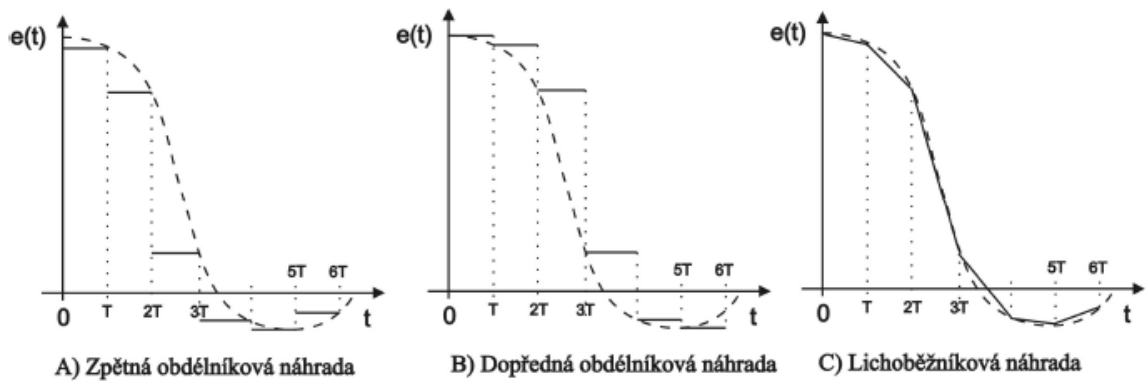
$$I(kT) = T \sum_{i=1}^k e(iT) \equiv \frac{Tz}{z-1} \quad (22)$$

Dopředná obdélníková náhrada (POBD):

$$I(kT) = T \sum_{i=1}^k e(iT) \equiv \frac{T}{z-1} \quad (23)$$

Lichoběžníková náhrada (LICHŮ):

$$I(kT) = T \sum_{i=1}^k \frac{e(iT) + e[(i-1)T]}{2} \equiv \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1} \quad (24)$$

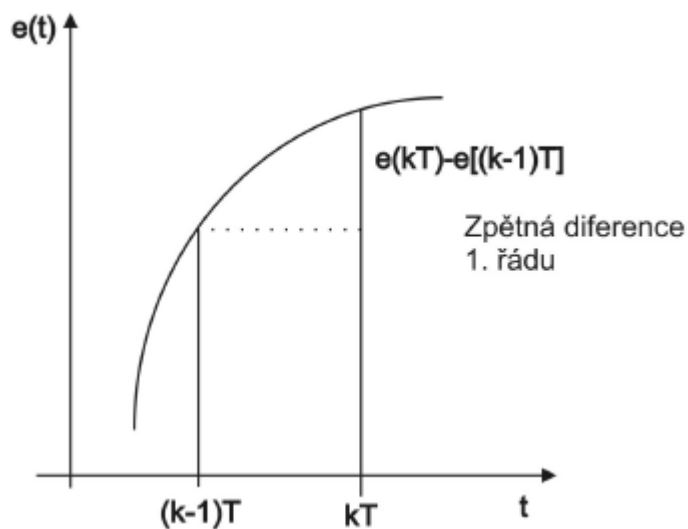


Obr. 12. Diskrétní náhrady integrace spojitého signálu [4]

Náhrada derivace

Zpětná difference 1. řádu:

$$D(kT) = \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \equiv \frac{z-1}{Tz} \quad (25)$$



Obr. 13. Náhrady derivace spojitého signálu [4]

2 MONITOROVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ

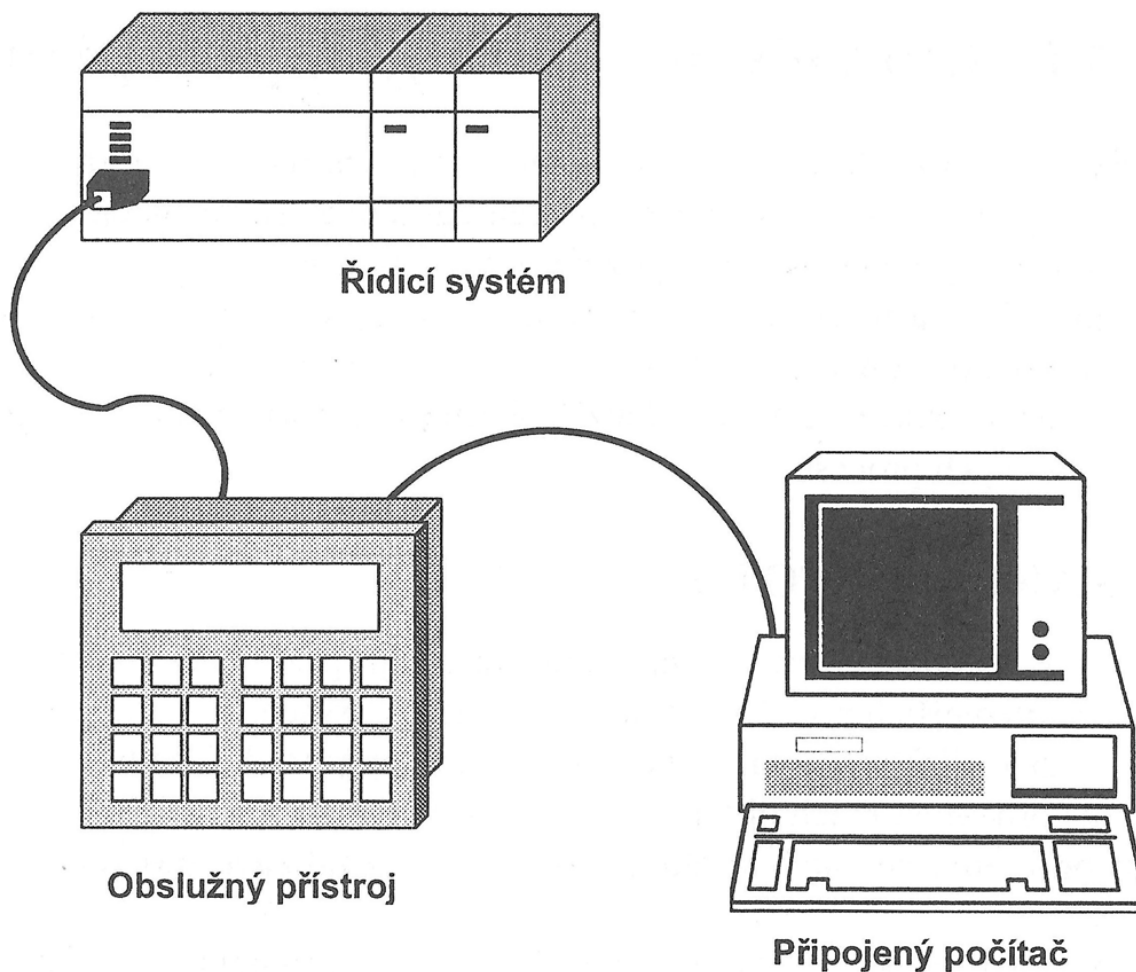
Vizualizace, neboli zviditelnění technologického procesu je vyšší formou jeho řízení, kdy člověk má možnost nejen do řízeného děje zasahovat, sledovat jej, příp. reagovat na vzniklé situace nýbrž průběh celého děje archivovat, vytvářet předpisy pro dosažení požadovaného výsledku a postupně tak vytvářet vyšší formu řízení s cílem eliminovat rutinní práce a zvýšit kvalitu práce. [8]

Dnešní moderní řídicí hardware se neobejde bez kvalitního technologického softwaru, který je schopen poskytovat důležitá technologická data operátorům. Základem moderního softwaru pro průmyslovou automatizaci tvoří tzv. aplikace kategorie SCADA/HMI (Supervisory Control and Data Acquisition/Human-Machine Interface)

Člověku je vlastní prezentace informací pomocí grafického zobrazení v nejrůznějších podobách. Charakteristickým rysem vizualizace je prezentace velkého objemu dat v takové podobě, že je možno velmi rychle porozumět jejich obsahu a významu. Historický vývoj ukazuje výhody grafické reprezentace dat i v oblastech řízení technologických procesů, kde pro celou řadu případů je vhodné ne-li nezbytné, získávat potřebné informace přímo z řízeného děje během činnosti řízení.

Do počítače s nainstalovaným programovým vybavením, který je připojen komunikační linkou k technologickému procesu se pravidelně přenáší důležité informace z řízeného procesu, takže obsluha má k dispozici mohutný nástroj k názornému sledování děje a případného zásahu do něj. Programové vybavení automaticky sleduje případné chybové nebo nezvyklé (alarmové) stavy, zaznamenává parametry z řízeného děje a celkově tak děj monitoruje a jeho průběh archivuje. Některé řídicí systémy podporují standardní komunikační protokoly pro přenos informací mezi technologickým procesem a vizualizačním programem. Příkladem je formát pro dynamickou výměnu dat DDE (Dynamic Data Exchange) nebo ODBC (Open DataBase Connectivity). Uživatel tak může pro zpracování dat ze sledovaného procesu plně využít standardních programových prostředků (např. Excel apod.).

Na obrázku (Obr. 14) je znázorněn příklad zapojení řídicího systému s připojeným obslužným přístrojem, který umožňuje obsluze provádět určité zásahy do řízeného technologického děje (např. změna parametrů apod.) a nadřazeným počítačem, jehož pomocí lze řídicí systém nejprve naprogramovat a při běhu řízený děj vizualizovat. [8]



Obr. 14. Blokové schéma řídicího systému pro vizualizace [8]

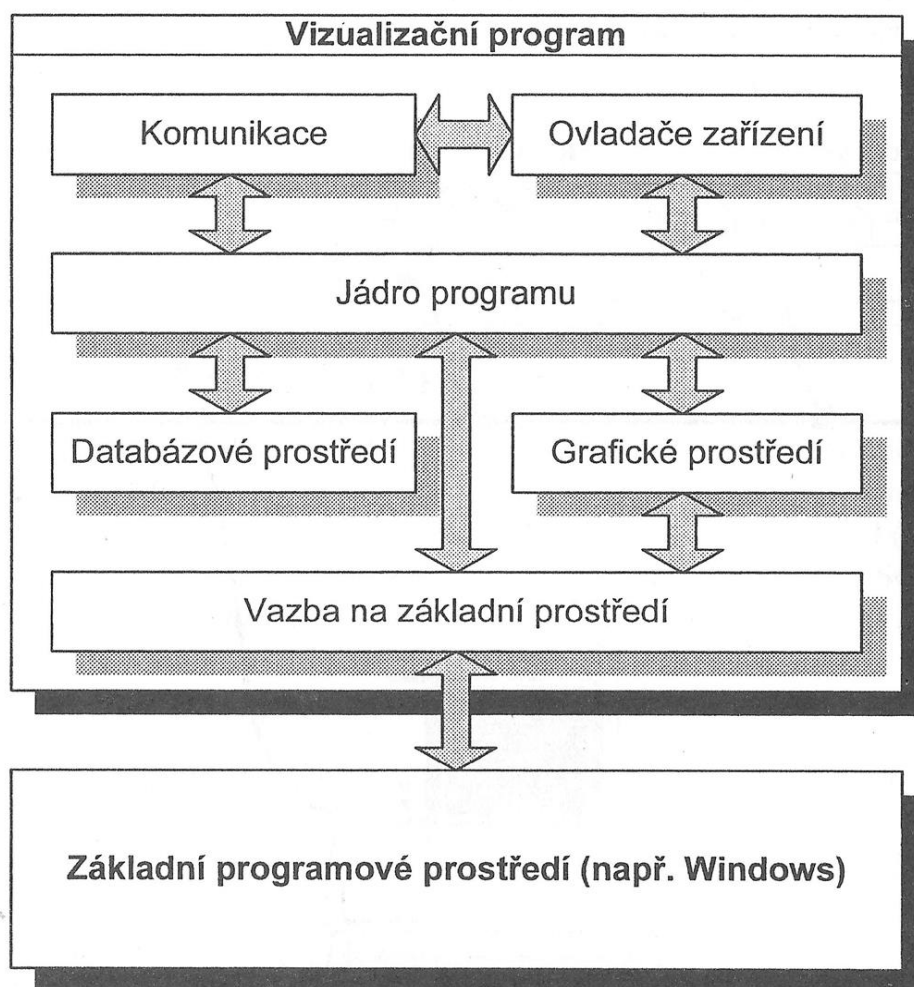
2.1 Vizualizační systém

Vizualizačním systémem rozumíme soubor technických a programových prostředků určených pro vizualizaci řízeného technologického děje. Někdy se setkáme s označením MMI (Man – Machine Interface), HMI (Human – Machine Interface) nebo SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).

Předpokládanou samozřejmou vlastností vizualizačního systému je bezproblémové připojení k řízenému systému. Vizualizační systémy umožňují vytvářet větší technologické celky spojením více řídicích systémů do sítě. Obsluha tak má možnost sledovat více dílčích technologických dějů.

Příklad struktury vizualizačního programu je formou blokového schématu na obrázku (Obr. 15) Jádrem programu je těsně vázáno na základní programové prostředí nejčastěji na bázi Windows NT. Využívá se jeho grafického prostředí, které je doplněno

o další aplikační možnosti. Databázové prostředí provádí zpracování a archivaci všech parametrů a naměřených údajů z řízeného procesu. Ovladače zařízení zajišťují programovou obsluhu připojených zařízení, komunikace zabezpečuje přenos informací mezi vizualizačním programem a řídicím systémem.



Obr. 15. Příklad struktury vizualizačního programu [8]

2.1.1 Control Web

Systém Control Web vyvíjený a dodávaný firmou Moravské přístroje je objektově orientovaný systém, který slouží ke generování měřicích, řídicích a regulačních programů pro PC. Systém může být využit v široké škále aplikací. Tento systém zajišťuje v reálném čase sběr dat, jejich zobrazování, archivaci a prezentaci, matematické zpracování, vyhodnocení dat a generování řídicích signálů pro řízený proces. Uživatel může vytvářet programy dvojím způsobem, a to pomocí textového nebo grafického editoru, přičemž je umožněno libovolně přecházet z jednoho do druhého dle potřeby a vlastního uvážení.

Při návrhu aplikace je nutno definovat potřebné konstanty a proměnné. Prostřednictvím ovladačů a kanálů stanovit vazby aplikace na reálná vstupné/výstupní zařízení. Potom můžeme rozmístit a propojit panely, přístroje, ovládací, indikační zařízení atd.

2.1.2 PROMOTIC

PROMOTIC je vizualizační a řídicí software technologických procesů, který je možno uplatnit v širokém spektru průmyslových odvětví. Stále častěji je tento typ software využíván pro správu a ovládání technologií v inteligentních domech a budovách. Umožňuje efektivně vytvářet distribuované a otevřené aplikace v nejrůznějších odvětvích průmyslu. V systému PROMOTIC jsou zabudovány všechny nezbytné komponenty pro tvorbu jednoduchých i rozsáhlých vizualizačních a řídicích systémů.

2.1.3 InTouch

Toto rozsáhlé objektově orientované grafické programové vybavení je určeno pro vytváření aplikací supervizního řízení, vizualizací a sběru dat z technologických procesů. Umožňuje vytvářet grafické zobrazení procesu, jeho ovládání a animaci. Tento produkt se vyvíjí od roku 1987 a uvádí se, že v současné době je ve světě nasazeno přes 50 000 instalací tohoto produktu. [8]

2.1.4 Witness

Systém pro vizualizaci a interaktivní simulaci procesů navržený britskou firmou Lanner Group Ltd. Systém umožňuje modelovat, řízený proces různého typu vč. logistiky, řízení výroby a simulovat důsledky různých rozhodnutí. Podporuje manažerské rozhodování, strategickou a operační analýzu, re-engineering a plánování.

2.1.5 Wizcon

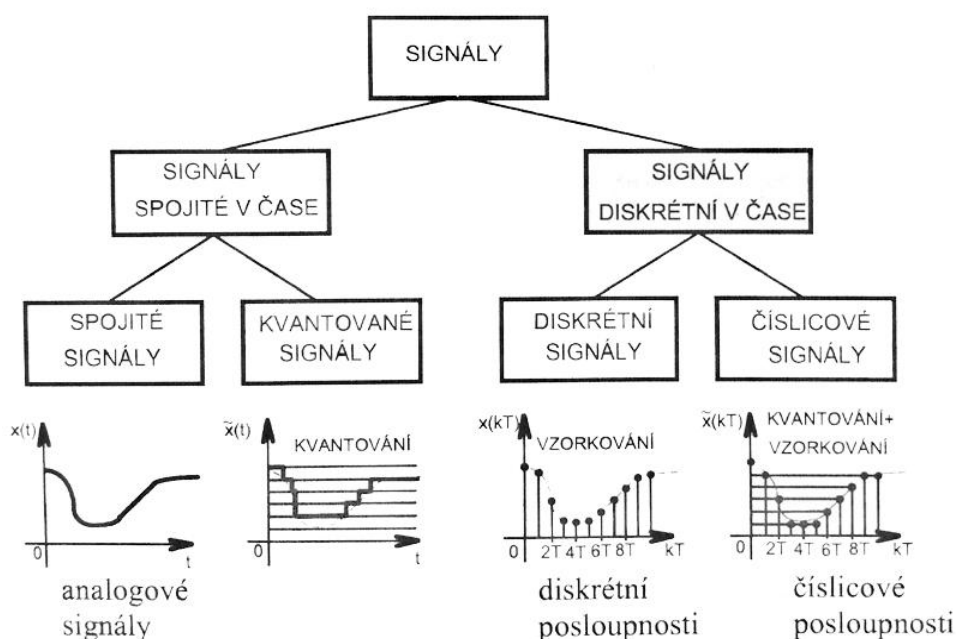
Mohutný řídicí a vizualizační systém dodávaný firmou PC Soft (Belgie) je určen pro řízení rozsáhlých technologií. Integruje v sobě rozsáhlý systém vizualizace, komunikace s obsluhou, obsluhu alarmních stavů, matematický aparát a řadu funkcí.

3 UNIFIKOVANÉ SIGNÁLY

Signál je fyzicky transformovaná informace nejčastěji v rozsahu elektrického napětí, proudu nebo jiných hodnot elektrických veličin (odpor, kapacita, atd.). V technologických procesech se pro analogový přenos veličin používají unifikované signály.

Nejčastěji používaným je proudový unifikovaný signál s rozsahem 0 až 20 mA, případně 0 až 20 mA, který je nazýván také jako proudová smyčka. Rozsah 4 až 20 mA je v současné době nejpoužívanější. U některých senzorů se základní elektronikou postačí k napájení 4 mA. V takových případech je možné navrhnout proudovou smyčku jako pasivní a signálové vodiče pak slouží i pro napájení senzoru. Nespornou výhodou 4 mA počátku rozsahu je snadná identifikace poruchy (přerušení smyčky, výpadek napájení) na straně přijímače. Výhodou proudového unifikovaného signálu je, že přenášený signál neovlivňuje odpor vedení.

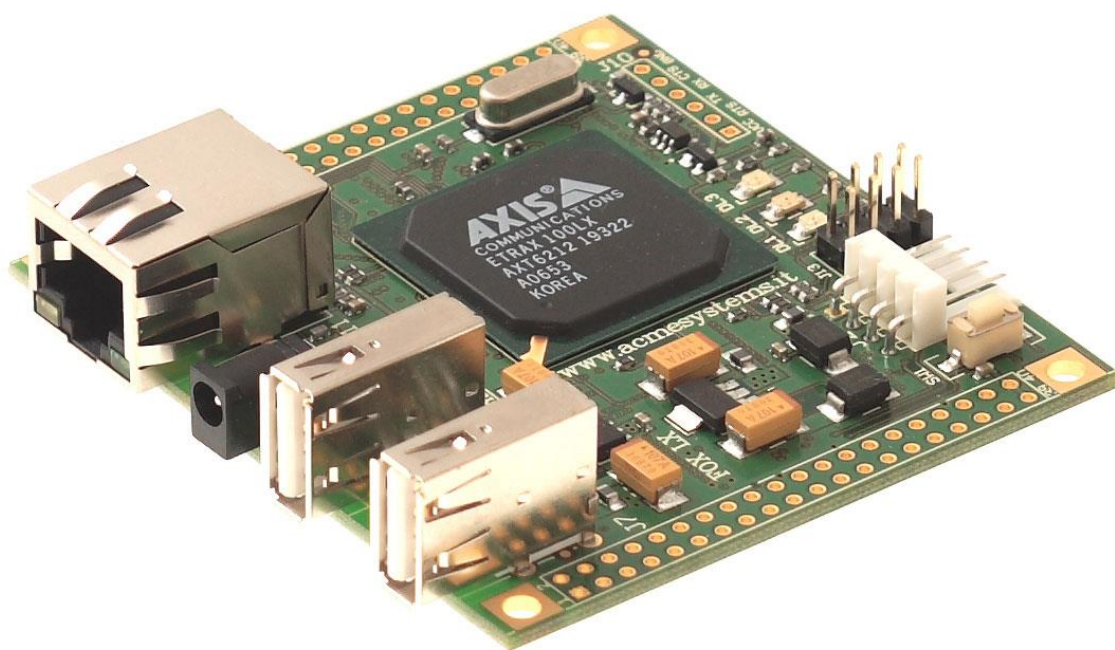
Druhou variantou je unifikovaný napěťový signál nejčastěji 0 až 10 V, případně 0 – 5 V. Výhodou napěťového unifikovaného signálu je jednoduchost použité elektroniky. Problém může nastat při přenosu na větší vzdálenosti, protože na přenášeném signálu se může projevit zkreslení vlivem odporu vedení. Unifikovaný napěťový signál proto najdeme spíše u laboratorních než průmyslových systému.



Obr. 16. Spojité a diskrétní signály [2]

4 FOX BOARD

FOX Board je univerzální vestavný modul malých rozměrů od společnosti ACME SYSTEMS osazený 32 bitovým procesorem AXIS ETRAX 100LX architektury RICS s operačním systémem Linux poskytující jednoduché a levné řešení pro vývoj vlastních aplikací typu výkonných síťových zařízení, měřicích a řídicích systémů pro průmyslové aplikace, vzdáleného monitoringu a sběru dat, vizualizace procesů, přístupových systému a mnoha dalších. Vývojové nástroje (SDK) jsou volně stažitelné na oficiálních stránkách výrobce, které umožňují odladění aplikace na stolním PC a snadnou přenositelnost. Upgrade aplikace nebo samotného firmware přes komunikační rozhraní Ethernet/RS232. Vysoká univerzálnost modulu, kompaktní rozměry (66 x 72 mm) a volně dostupné vývojové prostředí včetně operačního systému dávají modulu široké uplatnění.

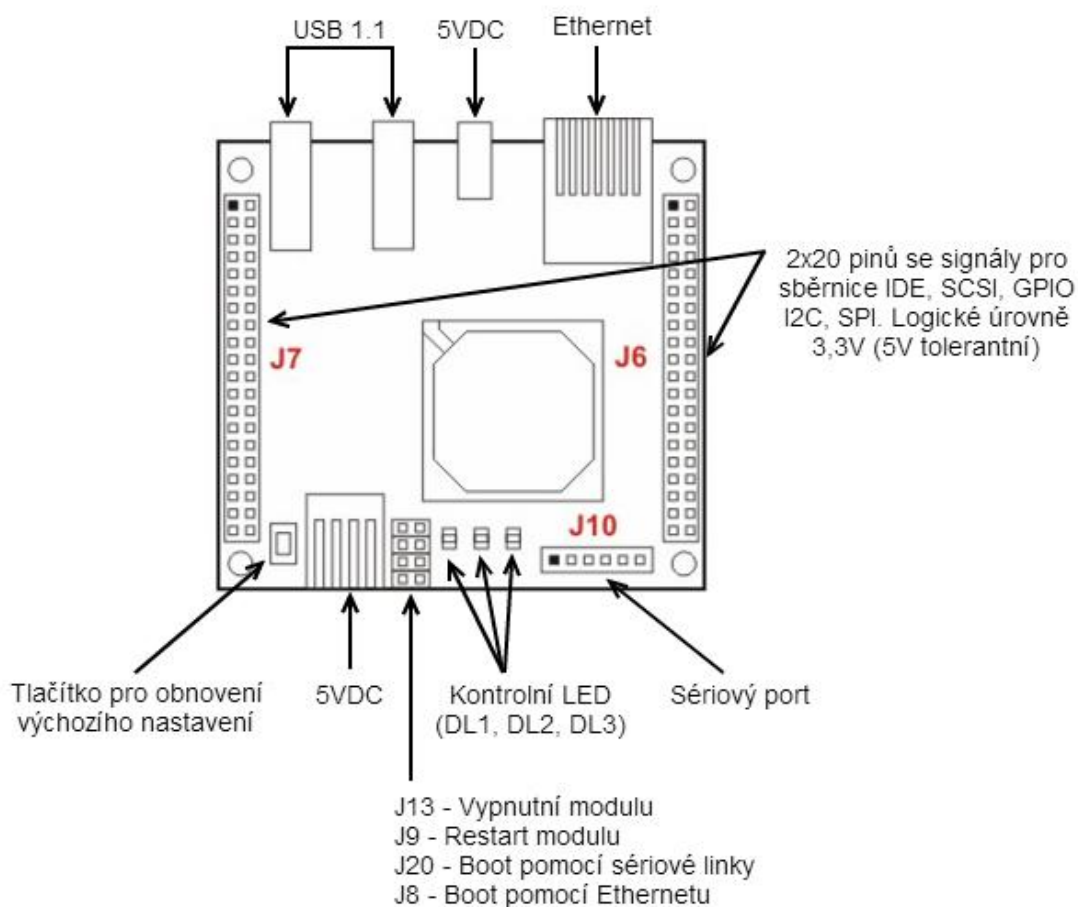


Obr. 17. Embedded jednotka FOX Board LX416 [9]

Společnost ACME SYSTEMS již jednotku FOX Board LX416 nevyrábí. Byla nahrazena novějším a výkonnějším modelem FOX Board G20, který navazuje na úspěch svého předchůdce se zachováním stejných periférií, kompaktních rozměrů a funkcí.

4.1 Technická specifikace

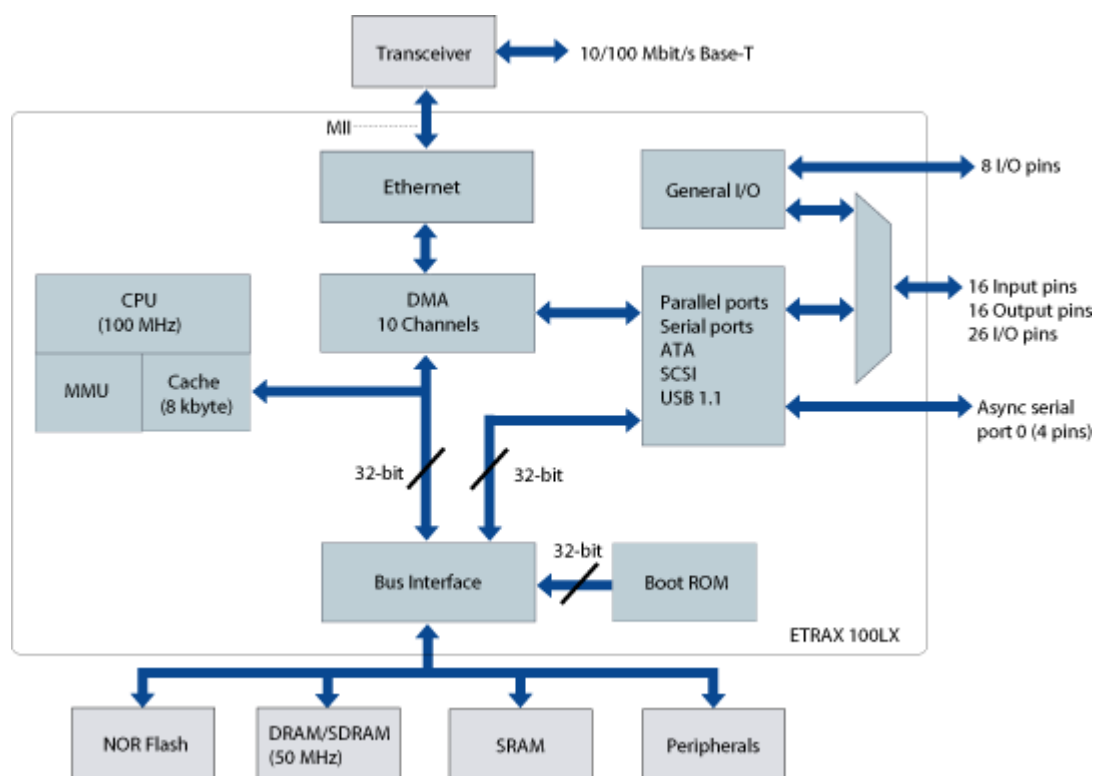
Modul je napájen stejnosměrným napětím o velikosti 5V s maximálním proudem 280mA a je možné jej přivést na konektor pro napájení diskových mechanik, který je použit u napájecích zdrojů v PC nebo do 3,5mm napájecího konektoru. Napájení modulu je signalizováno LED diodou s označením DL3. Na desce jsou dále umístěny dvě informační LED diody, kde DL1 signalizuje nenastavenou MAC adresu a DL2 podává informaci o probíhající komunikaci prostřednictvím Ethernet portu. Použitá jednotka s typovým označením FOX Board LX416 disponuje pamětí SDRAM o kapacitě 16MB a 4MB FLASH pamětí, kde je umístěn operační systém Linux. V případě uložení většího množství dat jsou k dispozici dvě rozhraní USB 1.1. Na dvou 40 pinových konektorech označených jako J6 a J7 jsou vyvedeny vstupně/výstupní komunikační rozhraní. Nalézají se zde sběrnice I²C, SPI, dva sériové porty s TTL logikou a 48 GPIO pinů, které lze rozdělit na vstupní, výstupní nebo vstupně/výstupní. Všechna nabízená rozhraní nelze využít současně, protože některé vstupně/výstupní piny jsou vzájemně sdílené.



Obr. 18. Vstupně/výstupní prvky modulu FOX Board

4.1.1 Mikroprocesor

Axis ETRAX 100LX je mikroprocesor s integrovaným řadičem Ethernet 10/100Mb a USB 1.1. Podporuje také paralelní port LPT, až čtyři sériové porty, rozhraní ATA a SCSI. Jedná se o 100MIPS 32bit RISC procesor s 8kB cache pamětí s podporou rozhraní pro SDRAM, EDO DRAM, SRAM, EPROM, paralelní EEPROM a FlashPROM. Výhodou je podpora DMA (Direct Memory Access) pro I/O porty, který umožňuje přímý přístup do paměti pro subsystémy bez zásahu jádra procesoru, čímž dochází ke snížení zátěže. Mikroprocesor je navržen s ohledem na použití jádra Linux a to včetně MMU (Memory Managemnet Unit), která je umístěna mezi mikroprocesor a operační paměť. Slouží k virtualizaci adres pro programy zpracovávané procesorem.



Obr. 19. Blokové schéma mikroprocesoru Axis ETRAX 100LX [10]

4.1.2 USB

Univerzální sběrnice USB (Universal Serial Bus) je v dnešní době standardem pro připojení periferních zařízení k počítači. Díky hvězdicové architektuře lze zapojit až 127 periférii k jednomu řídicímu prvku. Nespornou výhodou je napájení zařízení přímo ze sběrnice. V dnešní době je nejrozšířenějším typem tzv. USB 2.0, nahrazující starší typ USB 1.1, který je zpětně kompatibilní a přináší zejména vyšší rychlost datového přenosu

až 480MB/s oproti 12Mb/s u verze USB 1.1. FOX Board disponuje dvěma konektory typu A se standardem USB 1.1, jejichž řadič je integrován v mikroprocesoru. Tyto porty umožňují připojení USB flash disků, web kamer, Wi-Fi a Bluetooth modulu nebo jiná zařízení vybavena příslušným konektorem a ovladačem.

4.1.3 Ethernet

Technologie Ethernet slouží k vytváření místních počítačových sítí. Umožňuje využít různá přenosová média a s tím spojené různé šířky přenosového pásma. V dnešní době se nejčastěji používá k vytváření sítí kabel tvořený kroucenou dvoulinkou nebo optický kabel. Pro zapojení modulu FOX Board se používá konektor RJ-45 a přenosové médium standardu 10BaseT nebo 100BaseTX. Díky podpoře rozhraní Ethernet se na modulu mohou provozovat webové služby, nebo se k modulu připojit pomocí SSH.

4.1.4 I²C

Sériová multi-masterová sběrnice I²C (Inter-Integrated Circuit) vyvinutá firmou Philips, která je používána k připojování nízkorychlostních periférií k základní desce. Poskytuje obousměrný přenos dat mezi zařízeními, která mají pevně stanovenou adresu, specificky pro dany typ obvodu, který v určitých případech lze změnit. Rozhraní I²C tvoří tři vodiče a to linka SDA (Serial Data), SCL (Serial Clock) a GND. Modul FOX Board podporuje sběrnici již na úrovni jádra operačního systému.

4.1.5 GPIO

Pojmem GPIO (General purpose input/output) se rozumí obecně použitelné vstupy a výstupy. Mikroprocesor ETRAX 100LX obsahuje celkem 3 obecné vstupně/výstupní porty označované jako Port A (8 bitový), Port B (8 bitový) a Port G (32 bitový), kde každý z těchto bitů může být společně sdílen s jinou sběrnici na pinovém konektoru J6, případně J7. Vstupně/výstupní piny se dají programově řídit, lze zjišťovat a nastavovat jejich stav.

4.2 Vývoj aplikací s Phrozen SDK

V této práci byla použita sada vývojových nástrojů Phrozen SDK 2.01, která jsou volně ke stažení na oficiálních stránkách výrobce. Vývojové SDK je určeno k programování aplikací na FOX Board LX416 případně na vyšších modelech zařízení. Jedná se o kolekci ovladačů periférií a kompletní zdrojové kódy jádra (implementace linuxového jádra ve verzi 2.6.15 a starší verze 2.4.31). Pro vývoj aplikací je dostupné i vývojové SDK od dodavatele mikropočítače, které však neopravuje bezpečnostní chyby, nemá tak širokou komunitu uživatelů pracujících s touto platformou a nenabízí rozšíření podpory zařízení Bluetooth, USB web kamer, webového serveru BOA a dalších aplikací.

Vývojová sada Phrozen SDK je určena k instalaci pod operační systém Linux. Získáme tak možnost úpravy počtů spuštěných modulů jádra, ovladačů hardware a do konečného image můžeme přidat vlastní programy, webové stránky a skripty vykonávající se po spuštění modulu. V případě, že chceme vyvíjet aplikace pod operačním systémem Windows, je nutné nainstalovat software pro virtualizaci počítače a v něm použít image s odlehčenou distribucí Linuxu s předinstalovaným vývojovým SDK. Možnosti vývoje aplikací jsou shodné jako pod systémem Linux, ale musíme brát na zřetel omezení plynoucí s použitím virtuálního PC. Poslední z možností jak vyvíjet aplikace je použití webového kompilátoru. Jeho použití je nejjednodušším způsobem z výše uvedených, protože programátor nemusí ručně překládat a kompilovat zdrojové kódy aplikace.

FOX Board LX Web Compiler (glibc version)

Simple web front end to GCC compiler to generate executable file for the FOX Boards or other boards based on Cris architecture CPU

1. Select the C source file from your hard disk...

Procházet...

2. Select the library linking mode: ☒ dynamic ☐ static

3. Do you need pthread lib ? ☒ No ☐ Yes

4. Do you need math lib ? ☒ No ☐ Yes

5. Press to compile it and get the executable file.

Related links

- [How to compile a C program with WebCompiler](#)

Obr. 20. Webový kompilátor pro FOX Board LX

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH DESKY PRO STYK S TECHNOLOGICKÝM PROCESEM

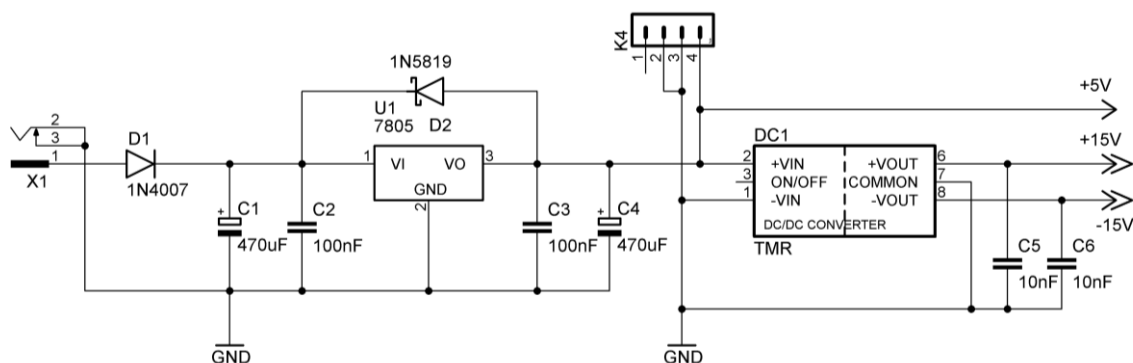
Návrh desky pro styk s technologickým procesem byl konstruován s ohledem na zachování kompaktních rozměrů modulu FOX Board a snadnou dostupnost digitálních a analogových vstupu/výstupů pro jednoduché připojení regulované soustavy. Při návrhu byl kladen důraz na výběr analogově-digitálního a digitálně-analogového převodníku s dostatečným velkým rozlišením pro správu funkčnost zařízení a ochranu modulu FOX Board galvanickým oddělením binárních vstupů.

5.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení a návrh desky plošného spoje s osazovacím plánem bylo vytvořeno v programu EAGLE, jehož název je zkratkou z Easily Applicable Graphical Layout Editor. K modelování dílčích zapojení byl využit simulační program Multisim od společnosti National Instruments, kde byla testována hodnota zesílení operačních zesilovačů u převodníků a velikost přívodního napájení rozšiřující desky. Vytvořené schéma, desku plošného spoje, osazovací plán a seznam součástek naleznete v příloze této práce.

5.1.1 Napájení

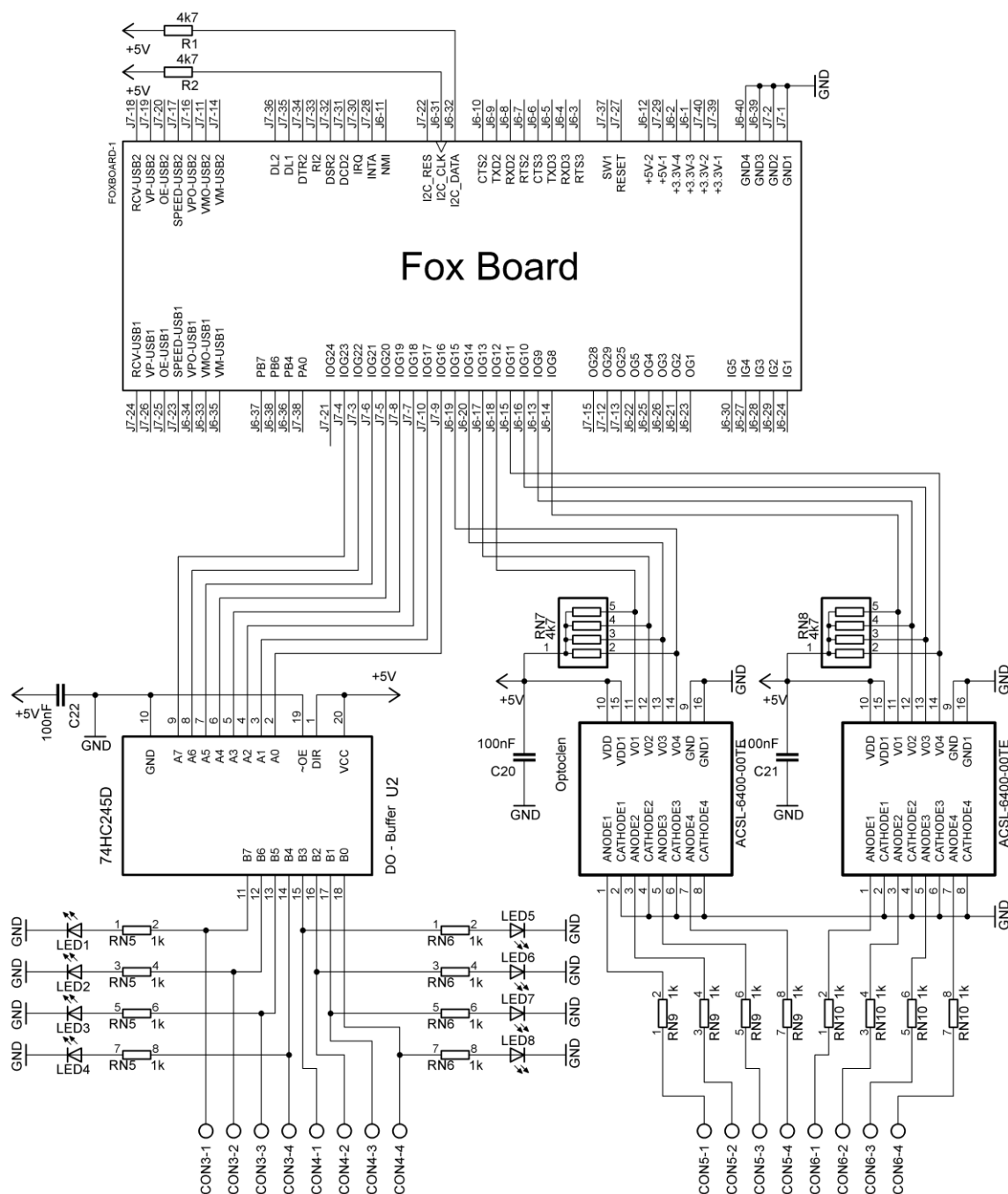
Napájení je realizováno 9V zdrojem stejnosměrného napětí. S ohledem na omezení napájecího napětí modulu a dalších součástek umístěných na desce je přivedených 9V sníženo pomocí stabilizátoru 7805 na hodnotu 5V, kterým je napájen nejenom FOX Board, ale také A/D a D/A převodník, obvod reálného času, DC/DC měnič, budič sběrnice u binárních vstupů a optočleny na binárních vstupech. U operačních zesilovačů bylo voleno symetrické napájecí napětí $\pm 15V$ dodáváno DC/DC měničem TRACO TMR 3-0525.



Obr. 21. Schéma napájecího zdroje

5.1.2 Digitální vstupy a výstupy

Prostřednictvím digitálních vstupů/výstupu realizujeme připojení snímačů nebo akčních členů použitých v technologickém procesu. Na obrázku (Obr. 22) je zobrazeno navržené zapojení binárních vstupů a výstupů k modulu FOX Board pomocí GPIO.



Obr. 22. Schéma zapojení binárních vstupů a výstupů

Digitální vstupy

Digitálním vstupem rozumíme napěťový signál o maximální velikost 5V, které je možno připojit na jednu ze svorek CON5 nebo CON6. Z ochranných důvodů je mezi svorkou a příslušným GPIO pinem FOX Board zařazen optočlen ACSL-6400-00TE, který zamezuje přivedení vyššího napětí na vstup modulu.

Digitální výstupy

Pro posílení napěťového signálu byl do zapojení binárních výstupů začleněn budič sběrnice s typovým označením 74HC245D. Binární výstup je možné připojit pomocí svorek CON3 nebo CON4. Stav jednotlivých výstupů je signalizován osmicí LED diod.

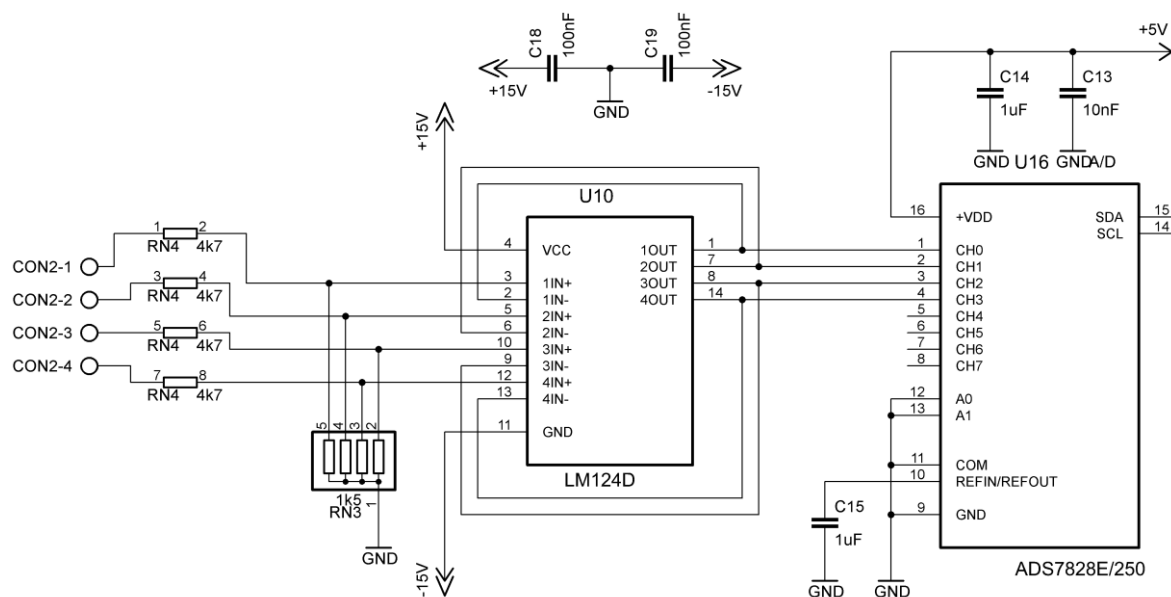
5.1.3 Analogové vstupy a výstupy

Jak je ze samotného názvu patrné, analogové vstupy a výstupy pracují s analogovými signály, které v daném technologickém procesu získáváme z nejrůznějších snímačů nebo generujeme v podobě signálů pro ovládání motorů, ventilů, atd. Hovoříme-li o snímačích, máme na mysli převod fyzikálních veličin na elektricky vyhodnotitelnou podobu. Nejběžněji se vyskytujícím analogovým vstupem v technologické praxi je měření teploty.

Analogové vstupy

Schématické zapojení analogových vstupů je patrné z obrázku (Obr 23). Rozšiřující deska dovoluje připojit až čtyři analogové vstupy v rozmezí 0 – 10V prostřednictvím svorek CON2. Přivedený signál je před operačním zesilovačem s typovým označením LM124D přizpůsoben odporovým děličem na úroveň, vhodnou pro vstup do analogově-digitálního převodníku, který přes sběrnici I²C informuje modul FOX Board o velikosti přivedeného napětí.

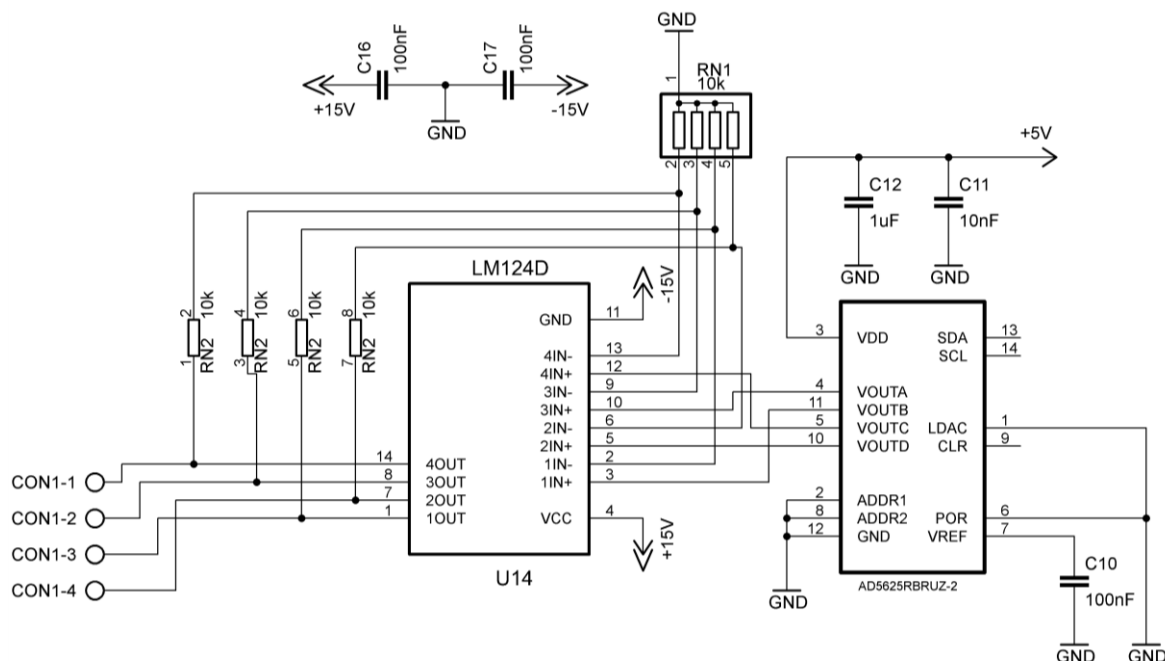
V této práci byl použit nízkonapěťový, 12 bitový, osmi kanálový A/D převodník ADS7828E/250 s I²C sběrnicí v pouzdře TSSOP, který svým rozlišením dostatečně splňuje požadavky na snímání analogových veličin technologického procesu. Jedná se o převodník pracující metodou postupné aproximace analogového signálu. Ve svém principu převodník nastavuje srovnávací napětí s postupně se zmenšujícím krokem a číselné hodnoty ukládá do registru postupného přibližování SAR (Successive Approximation Register).



Obr. 23. Schéma zapojení analogových vstupů

Analogové výstupy

Rozšiřující deska modulu FOX Board dovoluje připojit čtyři analogové výstupy, které generují napětí v rozmezí 0 – 10V na svorky CON1. Hodnota výstupního napětí je softwarově zadaná, pomocí sběrnice I²C předána a zpracována digitálně-analogovým převodníkem, který spolu s operačním zesilovačem definuje výstupní napětí na svorkách.



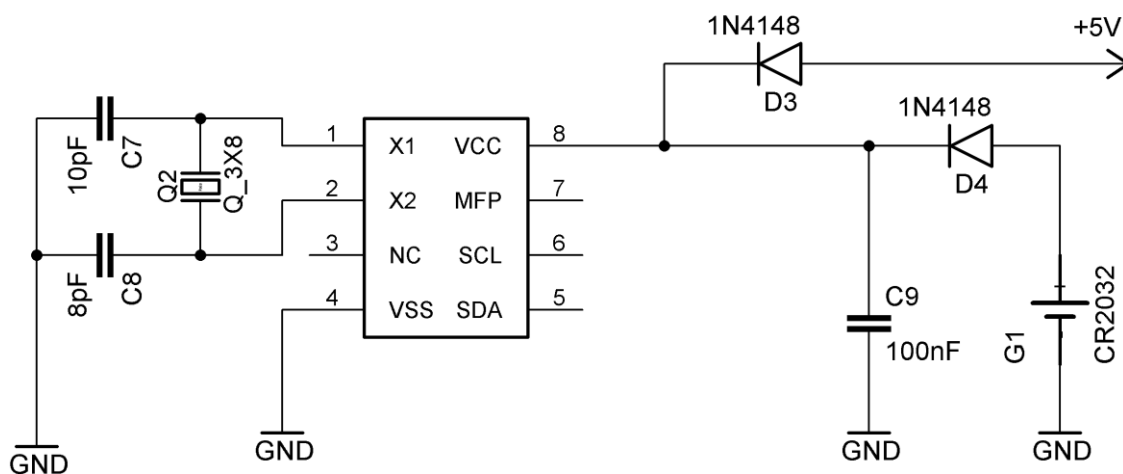
Obr. 24. Schéma zapojení analogových výstupů

Ve schématu zapojení je použit nízkonapěťový, 12 bitový, čtyř kanálový D/A převodník AD5625RBRUZ-2 s I²C sběrnici v TSSOP pouzdře od společnosti Analog Devices. Jedná se o převodník s odstupňovanými rezistory, který převádí jednotlivé cifry binárního čísla na proudy odpovídající vahám těchto cifer. U dvanácti bitového převodníku je celkem 4095 napěťových stupňů.

5.1.4 Obvod reálného času

Obvod reálného času udržuje údaj o nastaveném čase a datu. V této práci byl použit RTC (Real-time clock) obvod s typovým označením MCP7940M. Schéma zapojení je možno vidět na obrázku (Obr 25) ze kterého je patrné, že RTC obvod je schopen zpracovávat informace o nastaveném čase a datu i po odpojení napájení, protože v takovém případě je obvod napájen lithiovou knoflíkovou baterií CR2032.

Obvod reálného času není natolik podstatnou součástí rozšiřující desky jako analogové a digitální vstupy/výstupy. Avšak jeho použitím jsme schopni naměřené data a regulační pochody systematicky ukládat do adresářů pod názvem aktuálního data a času v okamžiku spuštění regulace.



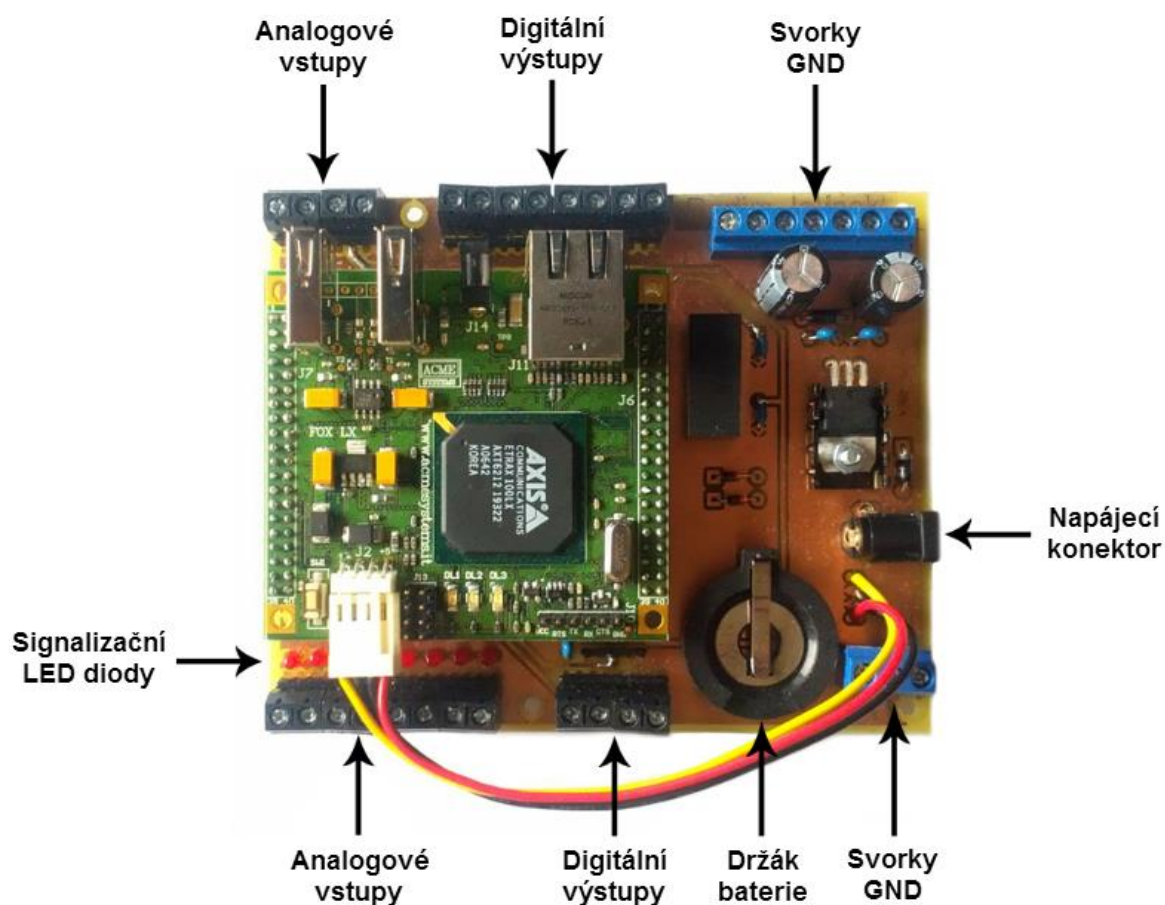
Obr. 25. Schéma zapojení obvodu reálného času

6 PROTOTYP ZAŘÍZENÍ

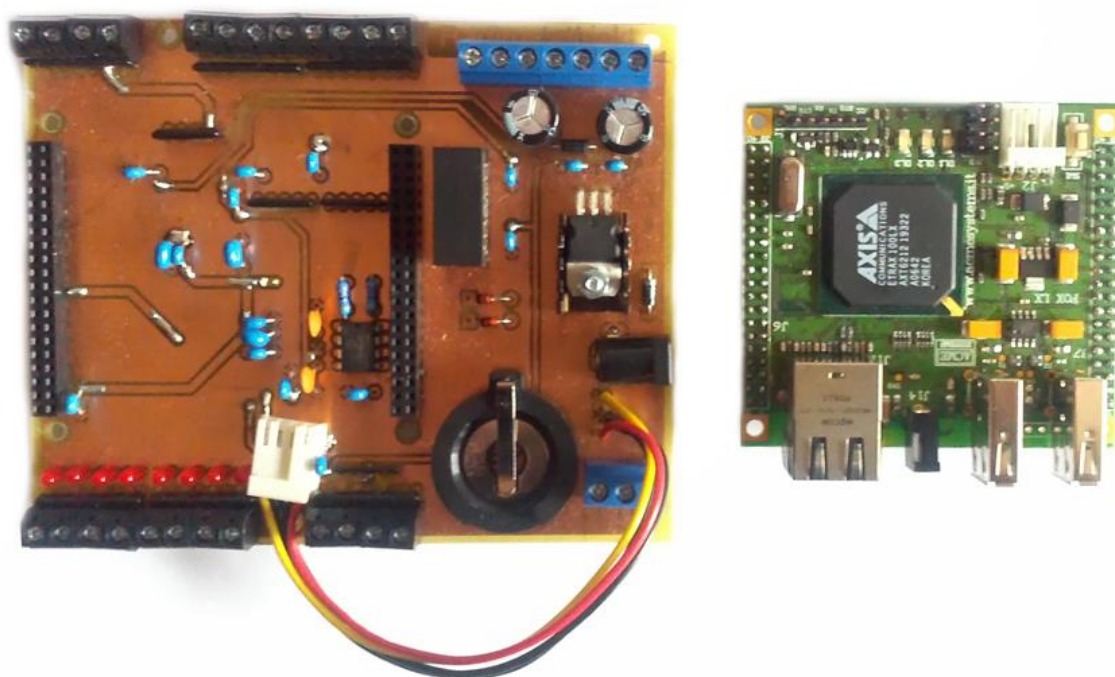
Prototyp desky pro styk modulu FOX Board s technologickým procesem je zobrazen na obrázku (Obr. 26). Při celkových rozměrech 120 x 100 mm se jedná o velmi kompaktní zařízení, které dovoluje připojit množství signálů, které jsou nezbytně nutné pro měření nebo řízení regulované soustavy. Pohled shora ukazuje svorky jednotlivých signálů, soubor signalizačních LED diod, držák baterie RTC obvodu a přívodní napájecí konektor.

FOX Board je připojen do rozšiřující desky pro styk s technologickým procesem prostřednictvím oboustranných kolíků, které jsou napájeny na dvou pinových konektorech modulu J6 a J7 a zasunuty do dutinkových lišt v desce plošného spoje. Obrázek (Obr. 27) ukazuje rozložené zařízení v podobě rozšiřující desky a FOX Board modulu.

K řízení a monitorování technologického procesu je možno připojit až čtyři vstupní analogové signály, čtyři výstupní analogové signály, osm vstupních digitálních signálů, osm výstupních digitálních signálů a deset signálů GND.



Obr. 26. Popis rozšiřující desky pro styk s technologickým procesem



Obr. 27. Rozšiřující deska a FOX Board modul

6.1 Výroba desky plošného spoje

Deska plošného spoje (DPS) byla navržena s ohledem na zachování minimálních rozměrů zařízení jako oboustranná, čímž vznikly problémy při její výrobě. DPS byla vyrobena ve školní laboratoři metodou fotocesty, kde k prosvícení fotocitlivého laku naneseném na desce přes filmovou předlohu používáme UV lampu.

Vrchní a spodní vrstva plošného spoje byly vytištěny na průsvitnou fólii a upevněny na fotosenzitivní dvoustranný fotocuprextit tak, aby jednotlivé vrstvy ležely správně proti sobě. Posunutím vrstev by byla deska znehodnocena a pro osazování jednotlivých komponent nepoužitelná. Jednotlivé vrstvy desky plošného spoje byly navrženy v programu EAGLE a jejich tiskové předlohy jsou umístěny v přílohách této práce.

6.2 Inicializace zařízení

Modul FOX Board s rozšiřující deskou je inicializován po svém spuštění. Tímto procesem rozumíme softwarové nastavení GPIO pinů do příslušných směrů a zapnutí interní reference D/A a A/D převodníku po zavedení operačního systému Linux. Úspěšný proces inicializace je indikován zhasnutím signalizačních LED diod u digitálních výstupů.

7 KNIHOVNA FUNKCÍ

V následujících kapitolách je uveden popis základních funkcí pro práci s komponenty na rozšiřující desce modulu FOX Board, které jsou logicky řazeny do podkapitol v závislosti na oblasti použití. Funkce jsou detailně okomentovány ve zdrojových textech, které jsou přílohou práce.

7.1 PWM

Funkce pro generování PWM modulace je uložena v souboru s názvem PWM.c.

Tab. 4. Přehled funkcí pro práci s PWM modulací

Název funkce	Popis funkce
PWM	Generování PWM modulace na zvolený binární výstup

7.2 I²C

Seznam funkcí pro komunikaci prostřednictvím sběrnice I²C je uložen v I2C.c. Před použitím jednotlivých funkcí musí být vytvořena struktura I2C_DATA, která uchovává adresu zařízení, buffer pro čtení a zápis. Komunikace je navázána prostřednictvím funkce start_I2C () a ukončena použitím close_I2C().

Tab. 5. Přehled funkcí pro práci s I²C sběrní

Název funkce	Popis funkce
read_I2C	Čtení hodnot z příslušných registrů zařízení
write_I2C	Zápis dat definovaných ve struktuře I2C_DATA
write_read_I2C	Zápis a čtení do registru zařízení

7.3 Digitální vstupy a výstupy

Funkce obsluhující digitální vstupy a výstupy jsou uloženy v souboru IO.c. Komunikace musí být před svým použitím nastavena pomocí funkce start_IO() a ukončena close_IO().

Tab. 6. Přehled funkcí pro práci s digitálními vstupy a výstupy

Název funkce	Popis funkce
IO_init	Inicializace binárních vstupů a výstupů
IO_input	Čtení stavu binárního vstupu
IO_output	Nastavení binárního výstupu do požadovaného stavu

7.4 Analogové vstupy a výstupy

Soubory AD.c a DA.c obsahují funkce pro práci s analogovým vstupy a výstupy. Před použitím je nutno vytvořit strukturu I2C_DATA a inicializovat I²C sběrnici.

Tab. 7. Přehled funkcí pro práci s analogovými vstupy a výstupy

Název funkce	Popis funkce
AD_init	Inicializace A/D převodníku
DA_init	Inicializace D/A převodníku
AD_read	Čtení hodnoty analogového vstupu
DA_write	Nastavení napětí na svorku analogového výstupu

7.5 Obvod reálného času

RTC obvod komunikuje prostřednictvím I2C sběrnice, která musí být inicializována a pro své funkce využívá strukturu I2C_DATA.

Tab. 8. Přehled funkcí pro práci s obvodem reálného času

Název funkce	Popis funkce
set_time	Nastavení obvodu reálného času
get_time	Čtení dat z obvodu reálného času

7.6 Práce s adresáři a soubory

Podpůrné funkce pro práci s adresáři a soubory jsou soustředěny v souboru function.c. Základními operacemi jsou kopírování, vytváření souborů a jejich inicializace.

Tab. 9. Přehled funkcí pro práci s adresáři a soubory

Název funkce	Popis funkce
copy_file	Kopíruje soubor ze zdrojového adresáře do cílového
make_folder	Vytvoří složky v systémové struktuře
data_write_init	Inicializace soubor pro ukládání měřených dat
data_write	Zápis dat do souboru měření
data_write_simulace_init	Inicializace soubor pro ukládání simulačních dat
data_write_simulace	Zápis dat do souboru simulace

7.7 Regulační algoritmy

Pro jednotlivé regulační algoritmy byly napsány funkce realizující výpočet ideálních parametrů regulátoru pro danou metodu a simulaci nebo regulaci regulované soustavy s vypočtenými nebo zadanými koeficienty regulátoru.

7.7.1 Výpočet parametrů regulátoru

Výpočet koeficientu ideálního regulátoru se odvíjí od použité metody regulačního algoritmu. Vstupem do jednotlivých funkcí je vždy vektor žádaných hodnot, vektor časových hodnot, zesílení soustavy, časová konstanta T_1 , časová konstanta T_2 , perioda vzorkování T a parametry b_1, b_2, a_1, a_2 z diskrétního přenosu soustavy.

Tab. 10. Přehled funkcí pro výpočet ideálních parametrů regulátoru

Název funkce
Konecny_pocet_kroku_vypocet
Konecny_pocet_kroku_omezeni_akcni_veliciny_vypocet
PS_regulator_metodou_pozadovaneho_modelu_vypocet
PSD_regulator_metodou_pozadovaneho_modelu_vypocet
PSD_regulator_metodou_umisteni_polu_vypocet
PSD_regulator_metodou_Ziegler_Nicholse_vypocet

7.7.2 Simulace regulačního pochodu

V případě simulování regulačního pochodu se očekávají stejná uživatelská data jako při výpočtu parametrů obohacena o vstupy koeficientů použitého regulátoru $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ případně $p_0, p_1, p_2, \dots, p_m$.

Tab. 11. Přehled funkcí pro simulaci regulačního pochodu

Název funkce
Konecny_pocet_kroku_simulace
Konecny_pocet_kroku_omezeni_akcni_veliciny_simulace
PS_regulator_metodou_pozadovaneho_modelu_simulace
PSD_regulator_metodou_pozadovaneho_modelu_simulace
PSD_regulator_metodou_umisteni_polu_simulace
PSD_regulator_metodou_Ziegler_Nicholse_simulace

7.7.3 Regulace

U regulačních funkcí jednotlivých metod jsou uživatelská data ve stejném tvaru jako v případě simulaci rozšířená o rozsah teplotního převodníku, číslo binárního výstupu pro PWM a číslo analogového vstupu teplotního senzoru.

Tab. 12. Přehled funkcí pro regulaci soustavy

Název funkce
Konecny_pocet_kroku_regulace
Konecny_pocet_kroku_omezeni_akcni_veliciny_regulace
PS_regulator_metodou_pozadovaneho_modelu_regulace
PSD_regulator_metodou_pozadovaneho_modelu_regulace
PSD_regulator_metodou_umisteni_polu_regulace
PSD_regulator_metodou_Ziegler_Nicholse_regulace

8 HLAVNÍ PROGRAM

Obslužný program modulu FOX Board je kompletně napsán v programovacím jazyku C, který počátkem 70. let 20. století vyvinuli Ken Thompson a Dennis Ritchie v Bellových laboratořích pro potřeby operačního systému Unix. V současné době je to jeden z nejčastějších jazyků pro psaní aplikačního softwaru. C je nízkoúrovňový, kompilovaný programovací jazyk, ze kterého mnoho moderních jazyků přebírá jeho syntaxi zápisu.

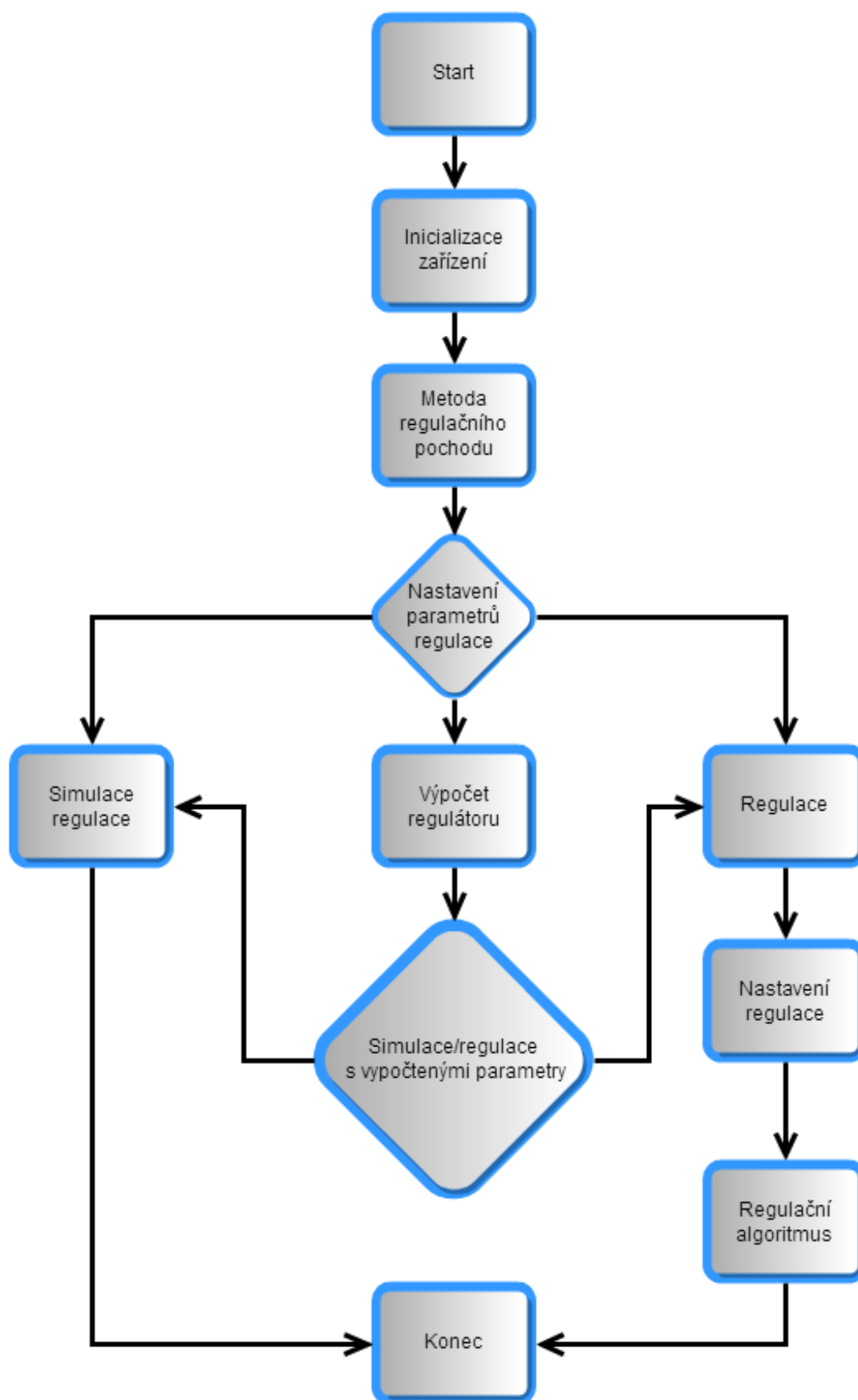
8.1 Popis programu

Vytvořená aplikace dovoluje uživateli číst stav binárních vstupů, nastavení binárních výstupů, kalibraci obvodu reálného času se čtením obsahu jeho registrů, čtení a zápis hodnot z analogově-digitálního a digitálně-analogového převodníku. Tyto základní funkce byly posléze použity pro měření přechodové charakteristiky a pro regulační algoritmy řízení regulované soustavy. Hlavní program byl navržen a testován pro řízení laboratorní tepelné soustavy a jeho vývojový diagram je na obrázku (Obr. 28).

Celkem bylo aplikováno sedm algoritmů řízení technologického procesu, které umožňují po zadání parametrů soustavy výpočet ideálních koeficientů regulátoru a jejich ověření prostřednictvím simulace regulace. Ze stanovaných parametrů lze kromě simulace spustit rovněž regulaci soustavy. Aplikace také dovoluje simulaci nebo regulaci s již vypočtenými parametry regulátoru. Průběžná data simulačního a regulačního pochodu jsou ukládána do CSV souboru v adresáři, kde jsou jednotlivé hodnoty odděleny středníkem. Zvolený způsob ukládání dat je vhodný především z hlediska jejich dalšího zpracování a vyhodnocení například programem Matlab. Adresář s uloženými daty regulace je vytvořen automaticky s názvem aktuálního data a času v okamžik spuštění regulace.

Grafická interpretace regulačních nebo simulačních dat je uživateli poskytována pomocí grafů, které jsou vykresleny do HTML okna prostřednictvím JavaScript knihovny Dygraphs. Grafy dovolují přiblížení a vypnutí vykreslování jednotlivých průběhů. V případě sledování regulačního pochodu je graf dynamicky aktualizován v okamžicích periody vzorkování, což uživateli dodává detailní přehled o stavu regulačního pochodu.

Hlavní program spolu s naměřenými daty je umístěn na Flash disku, který je automaticky připojen do systémové struktury operačního systému Linux po spuštění zařízení. Modul nedovoloval uložení takového objemu dat z důvodů malé kapacity FLASH paměti.



Obr. 28. Vývojový diagram

8.2 Ovládání programu

Hlavní program pro svou správnou funkčnost potřebuje nastavit obvod reálného času, který je zdrojem názvu složky měřených dat. Dalšími vstupy do programu jsou parametry regulované soustavy s koeficienty navrženého regulátoru dle jednotlivých metod návrhu. Aplikace dovoluje dva způsoby nastavení programu a parametrů regulace.

8.2.1 Příkazová řádka

V případě připojení k modulu FOX Board pomocí protokolu SSH nebo Telnet se doporučuje použít program PuTTY. Po navázání úspěšného spojení prostřednictvím IP adresy zařízení, která je v základním nastavení ve tvaru: 192.168.0.90 je nutné přihlásit se do systému Linux. Uživatelské jméno a heslo bylo ponecháno ve výchozím znění root. Spuštěním vytvořené aplikace se zobrazí menu hlavního programu, které je zobrazeno na obrázku (Obr. 29). Práce v příkazové řádce není uživatelsky nejpřívětivější, ale je to plnohodnotný způsob jak nastavit parametry regulované soustavy, koeficienty regulátoru a jak sledovat regulační pochod za pomoci výpisu dat na obrazovku příkazové řádky nebo dynamického grafu v okně HTML.

```
-----  
Diplomova prace - Bc. Radim Jelinek  
-----  
HLAVNI MENU  
-----  
1. Binarni vstupy  
2. Binarni vystupy  
3. Nastaveni RTC  
4. Cteni RTC  
5. A/D prevodnik  
6. D/A prevodnik  
7. Mereni prechodove charakteristiky  
8. PSD regulator metodou Ziegler-Nicholse  
9. PSD regulator metodou pozadovaneho modelu  
10. PS regulator metodou pozadovaneho modelu  
11. Konecny pocet kroku  
12. Konecny pocet kroku - omezeni akcni veliciny  
13. PSD regulator metodou umisteni polu  
14. Obecny linearni regulator  
-----  
Vyberte jednu z moznosti: █
```

Obr. 29. Obrazovka hlavního programu

8.2.2 Webové rozhraní

Alternativou k nastavení programu v příkazové řádce je uživatelsky přívětivější způsob prostřednictvím webového rozhraní. Úvodní stránka modulu FOX Board zobrazena na obrázku (Obr. 31) je dostupná pod výchozí IP adresou 192.168.0.90. V otázce možnosti nastavení se jedná o zcela rovnocenný způsob jako v případě příkazové řádky. Kromě samotného nastavení programu jsou na stránkách uvedeny teoretické podklady jednotlivých metod návrhu parametrů regulátorů. Webové rozhraní je modulem FOX Board distribuováno pomocí open-source webového serveru BOA, který je vhodný pro embedded jednotky a jehož autorem je Paul Phillips. BOA server je instalován ve vývojovém SDK od společnosti ACME SYSTEMS a pro účely použití v této práci musel být konfigurován. Původní webové rozhraní bylo uloženo ve FLASH paměti modulu FOX Board. S ohledem na její malou kapacitu byl web server přesměrován na připojený flash disk, kde se nacházejí kompletní HTML stránky a CGI skripty dostupné z výše zmíněné IP adresy zařízení.

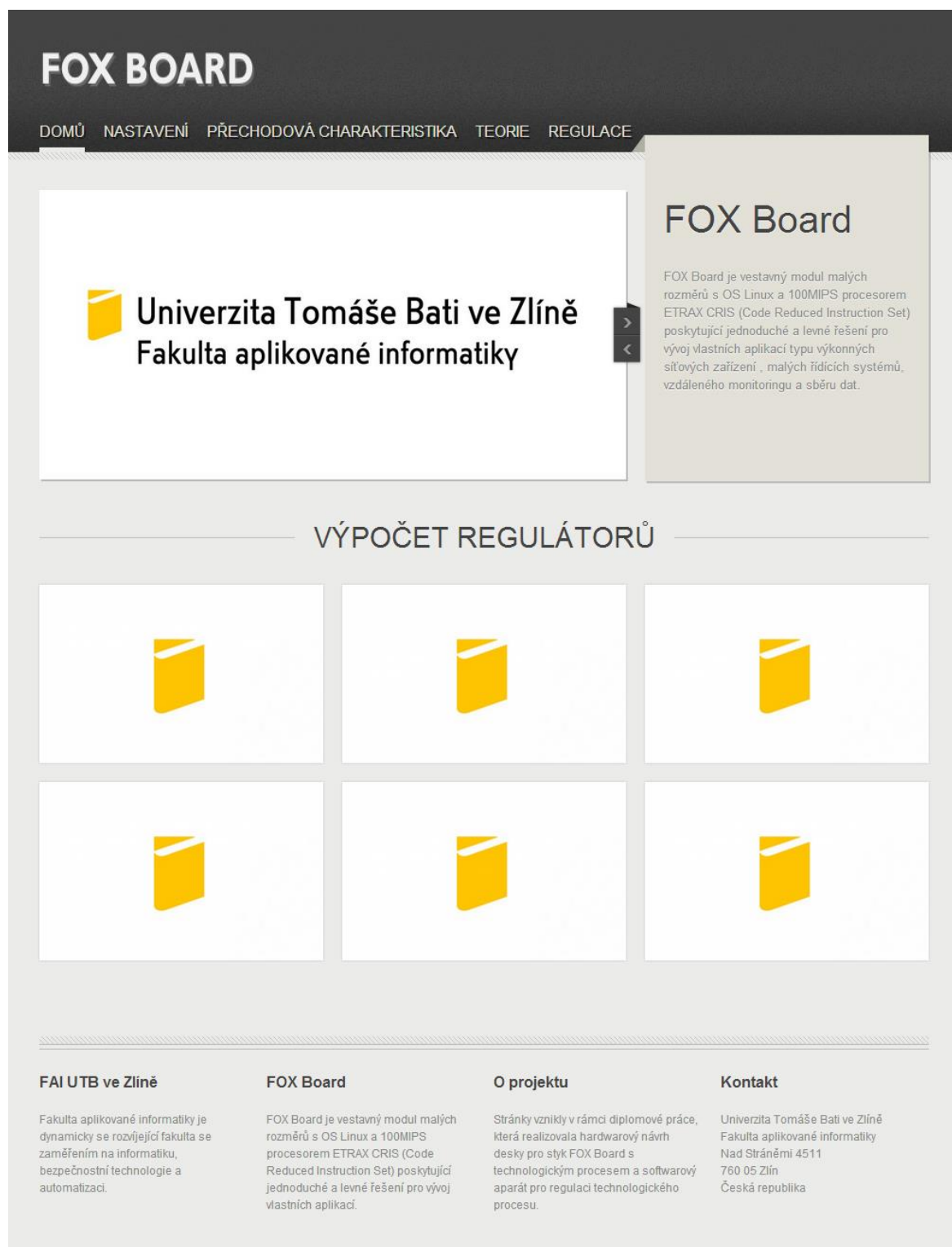
Předávání parametrů

Common Gateway Interface (CGI) je protokol pro propojení externích aplikací s webovým serverem. CGI skript je libovolný program nebo skript, který je na požadavek uživatele spuštěný WWW serverem jako samostatný proces. Jako CGI skript může pracovat spustitelný program vzniklý překladem zdrojového textu napsaného například v jazyce C nebo skript, tj. sekvence příkazů interpretované programem Perl, Shell apod. CGI skripty přebírají data zadaná uživatelem, zpracovávají je a jako výsledek vytvářejí HTML stránky. Tyto dynamicky vytvořené stránky pak WWW server posílá zpět klientovi. Pomocí CGI může server provádět výpočty, vyhledávat data v databázi atd.



Obr. 30. Komunikace mezi klientem, serverem a CGI skriptem

V této práci jsou uživatelská data z formulářů předávána CGI skriptu prostřednictvím metody GET. Jedná se o jednu z dotazovacích metod HTTP protokolu využívající URL adresu, která jednoznačně identifikuje jednotlivé objekty na WWW serveru. Takto předaná data jsou CGI skriptem přečtena z URL adresy a následně uložena do proměnných.



Obr. 31. Webové rozhraní modulu FOX Board

8.3 Uživatelské vstupy

Uživatelská data se očekávají v případě nastavení obvodu reálného času, parametrů regulované soustavy a u ručně zadávaných koeficientů vypočteného regulátoru.

RTC obvod může být jednoduše nastaven prostřednictvím příkazové řádky nebo webového rozhraní. Na obrázku (Obr. 32) je uveden příklad nastavení a čtení obsahu obvodu reálného času. Očekávají se následující celočíselná data:

- dd..... den v týdnu (1 – 7),
- DD..... datum v měsíci (1 – 31),
- MM..... měsíc v roce (1 – 12),
- RRRR..... aktuální rok,
- HH..... hodiny (0 – 23),
- MM..... minuty (0 – 59).

```
|-----|
|                                     |
|                               Nastavení RTC                               |
|-----|
| Zadejte den      (1-7)   :      5   |
| Zadejte datum    (1-31)  :      1   |
| Zadejte mesic    (1-12)  :      6   |
| Zadejte rok      :      2013   |
| Zadejte hodiny   (0-23)  :      16   |
| Zadejte minuty   (0-59)  :      00   |
|-----|
| Obvod realneho casu byl uspesne nastaven. |
|-----|
| Cas nastaven na: Pa 01 Cervna 2013 16:00:00 |
|-----|
|                                     |
|                               Ctení RTC                               |
|-----|
|                                     |
|-----|
| Aktualni cas: Pa 01 Cervna 2013 16:02:30 |
|-----|
```

Obr. 32. Příklad nastavení a čtení RTC obvodu prostřednictvím příkazové řádky

Zadání parametrů regulované soustavy je v případě výpočtu, simulace a regulace totožné tj. povinnými vstupy se rozumí, vektor žádaných hodnot, vektor časových hodnot, zesílení soustavy, časová konstanta T_1 , časová konstanta T_2 , perioda vzorkování T a parametry b_1, b_2, a_1, a_2 z diskrétního přenosu soustavy. Jednotlivé prvky vektorů jsou u metody ovládání přes příkazový řádek odděleny středníkem a u webového rozhraní mezerou. Z těchto vstupních hodnot program vychází při výpočtu ideálních koeficientů regulátoru.

Regulace a simulace regulačního pochodu vyžaduje další vstupní parametry, kterými jsou koeficienty $q_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ případně $p_0, p_1, p_2, \dots, p_m$ regulátoru. V případě regulace jsou požadovány dodatečné parametry, které udávají rozsah teplotního převodníku, číslo binárního vstupu pro PWM modulaci a číslo analogového vstupu teplotního senzoru.

— PSD regulátor metodou požadovaného modelu —

Zadejte vektor žádaných hodnot:

Zadejte vektor časových hodnot:

Zadejte zesílení soustavy:

Zadejte časovou konstantu T_1 :

Zadejte časovou konstantu T_2 :

Zadejte periodu vzorkování T :

Zadejte parametr b_1 z diskétního přenosu soustavy:

Zadejte parametr b_2 z diskétního přenosu soustavy:

Zadejte parametr a_1 z diskétního přenosu soustavy:

Zadejte parametr a_2 z diskétního přenosu soustavy:

Zadejte parametr q_0 regulátoru:

Zadejte parametr q_1 regulátoru:

Zadejte parametr q_2 regulátoru:

Zadejte rozsah převodníku:

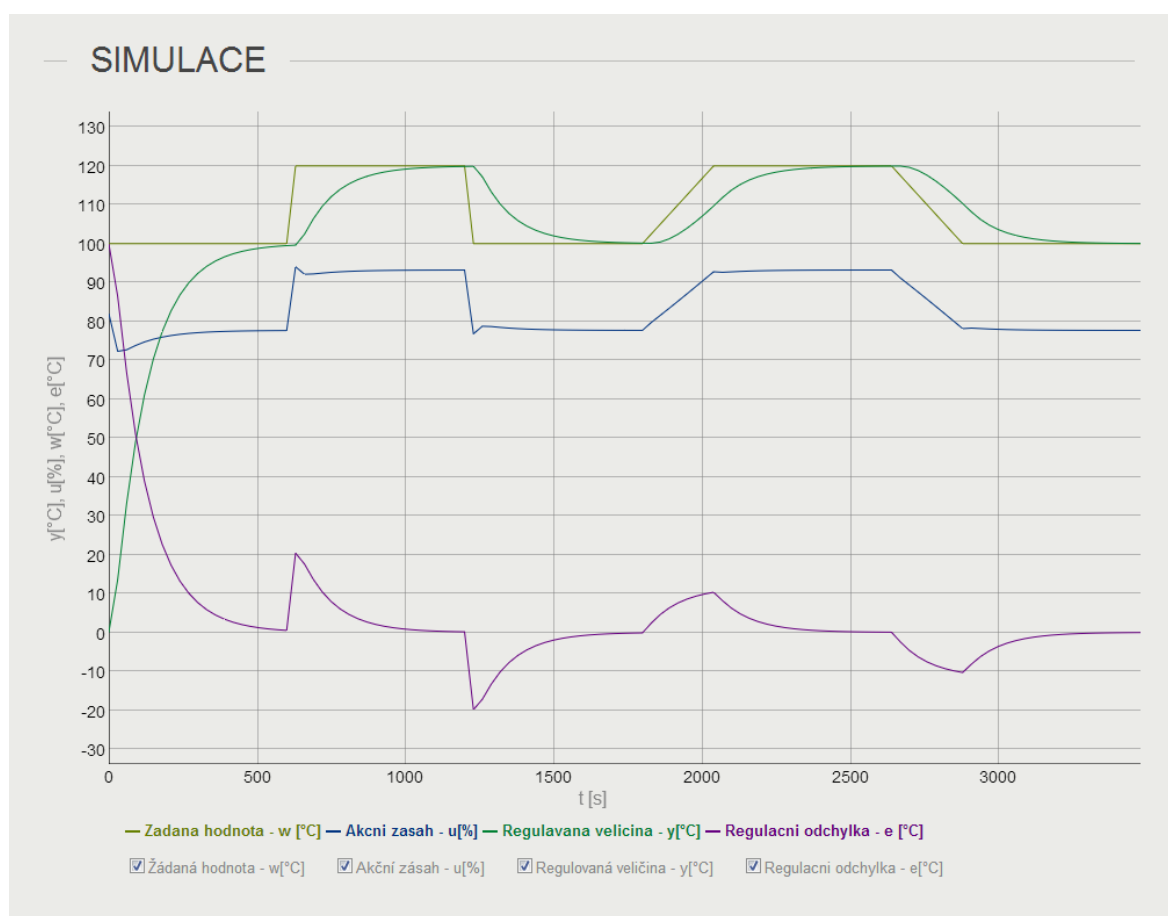
Zadejte číslo portu pro generování PWM:

Zadejte číslo kanálu AD převodníku:

Spustit regulaci

Obr. 33. Příklad nastavení PSD regulátoru metodou požadovaného modelu

Grafická interpretace průběhu regulačního pochodu nebo výsledné simulace či regulace je vykreslena do HTML okna. Na obrázku (Obr. 34) je zobrazen graf ukazující simulační data vypočtené modulem FOX Board pro uživatelsky definovanou soustavu a regulátor. Obdobným grafem je vykreslován i výsledek regulačních dat. Tyto grafy nejsou dynamicky aktualizovány jako v případě vykreslení průběhu regulačního pochodu, kde dochází k aktualizaci dat v okamžicích periody vzorkování. Jednotlivé grafy zobrazují průběh regulační veličiny, žádané hodnoty, akčního zásahu a regulační odchylky.



Obr. 34. Grafická interpretace simulačních a regulačních dat

9 OVĚŘENÍ FUNKCE ZAŘÍZENÍ

Prototyp zařízení byl testován na tepelných laboratorních soustavách, pro které byl program vytvořen. Soustava byla identifikována z přechodové charakteristiky pomocí Strejcovi metody a její přenos byl určen v následujícím tvaru:

$$G_s(s) = \frac{1,287377}{(95,02267s + 1) \cdot (21,88267s + 1)} \quad (26)$$

Z takto získaného spojitého přenosu byl pro účely regulace definován diskretní Z-přenos se zvolenou periodou vzorkování dle dané metody návrhu programem Matlab.

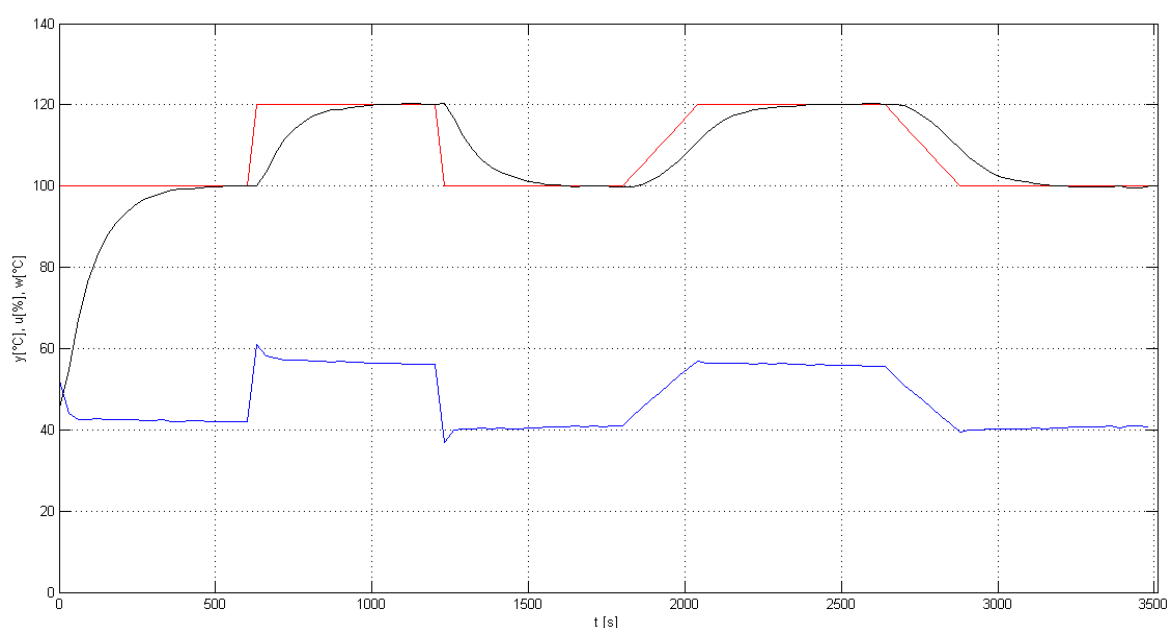
9.1 PSD regulátor metodou požadovaného modelu

Na obrázku (Obr. 35) můžeme pozorovat získaný regulační pochod prototypem zařízení, kterým byla regulována tepelná soustava v laboratoři s diskretním přenosem pro periodu vzorkování $T = 30$ ve tvaru:

$$G_s(z) = \frac{0,1654z^{-1} + 0,09463z^{-2}}{1 - 0,9831z^{-1} + 0,1851z^{-2}} \quad (27)$$

Pro regulaci byl navrhnut PSD regulátor metodou požadovaného modelu:

$$G_R(z) = \frac{0,820493 - 0,806654z^{-1} + 0,151902z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (28)$$



Obr. 35. Výsledek regulace použitím PSD regulátoru metodou požadovaného modelu

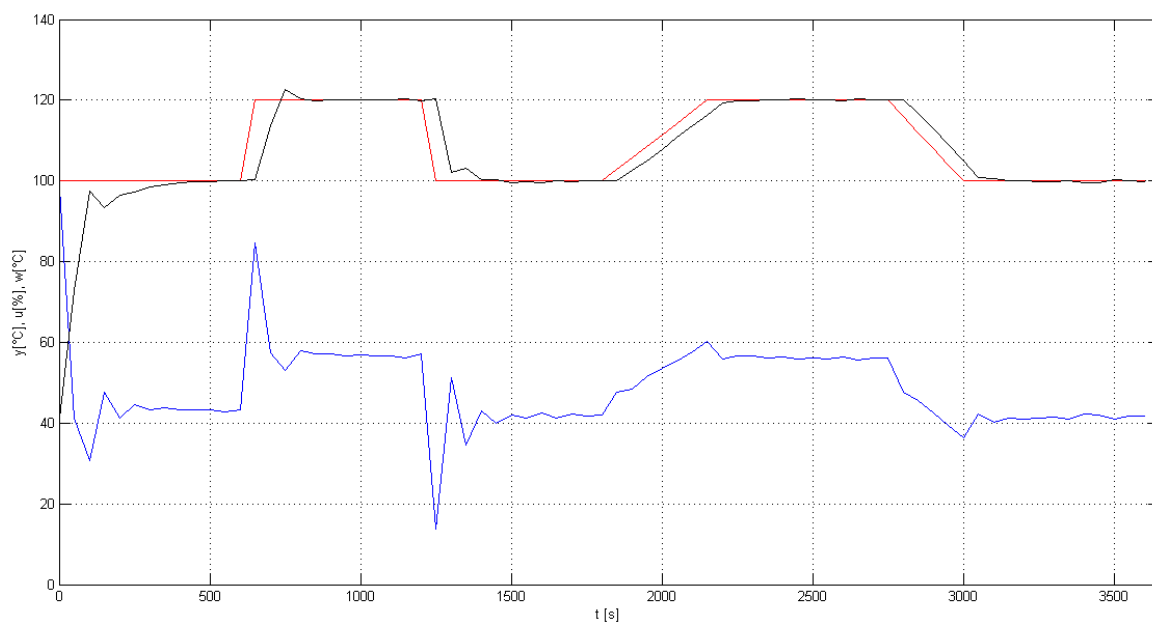
9.2 Metoda konečného počtu kroků

Pro periodu vzorkování $T = 50$ laboratorní tepelné soustavy byl stanoven diskretní přenos ve tvaru:

$$G_s(z) = \frac{0,3384z^{-1} + 0,1348z^{-2}}{1 - 0,6926z^{-1} + 0,06014z^{-2}} \quad (29)$$

Regulátor byl navržen metodou konečného počtu kroků a výsledek regulace můžete sledovat na regulačním pochodu, který je zobrazen na obrázku (Obr. 36).

$$G_R(z) = \frac{2,113271 - 1,463652z^{-1} + 0,127092z^{-2}}{1 - 0,715131z^{-1} - 0,284869z^{-2}} \quad (30)$$



Obr. 36. Výsledek regulace použitím regulátoru metodou konečného počtu kroků

ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce byl návrh a výroba desky plošného spoje umožňující styk modulu FOX Board s technologickým procesem. Deska byla navržena s ohledem na zachování kompaktních rozměrů modulu a snadnou dostupnost digitálních a analogových vstupů/výstupů pro jednoduché připojení regulované soustavy.

Prototyp zařízení o celkových rozměrech 120 x 100 mm dovoluje připojit až čtyři vstupní analogové signály, čtyři výstupní analogové signály, osm vstupních digitálních signálů a osm výstupních digitálních signálů, jejichž stav je vizualizován signalizačními LED diodami. Po připojení napájení zařízení inicializuje A/D a D/A převodník spolu s GPIO piny. Obvod reálného času je v případě odpojení přírodního zdroje napájen knoflíkovou baterií, která udržuje RTC obvod v chodu.

Hlavní obslužný program zařízení napsaný v programovacím jazyku C umožňuje uživateli naplno využít výpočetní výkon modulu. Program byl navržen pro řízení laboratorní tepelné soustavy, ale bez větších modifikací je aplikovatelný téměř na jakoukoliv regulovanou soustavu. Po zadání parametrů soustavy je program schopen určit ideální koeficienty regulátoru podle sedmi algoritmů řízení. S vypočtenými nebo uživatelsky definovanými parametry regulátoru lze poté simulovat regulační pochod nebo přímo regulovat připojenou regulovanou soustavu. Program je možné ovládat prostřednictvím příkazové řádky nebo uživatelsky přívětivější cestou v podobě HTML rozhraní. Z hlediska nastavení programu pro výpočet, simulaci a regulaci se jedná o dva zcela totožné přístupy.

Grafická interpretace regulačních nebo simulačních dat je uživateli zajišťována prostřednictvím dynamických grafů, které dovolují přiblížení a vypnutí vykreslování jednotlivých průběhů, které jsou zobrazeny v HTML okně prostřednictvím JavaScript knihovny. Data jsou systematicky archivována do souboru s automaticky vytvořeným názvem dle aktuálního data a času v okamžik spuštění regulace ve formátu, který dovoluje jejich pozdější zpracování a vyhodnocení.

Prototyp zařízení a obslužný program byl testován na laboratorní tepelné soustavě, kde byly ověřeny všechny programově vytvořené regulační algoritmy. Průběhy jednotlivých regulačních pochodů pro různé metody návrhu jsou identické ve srovnání s předpokládanými průběhy stanovených programem MATLAB.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of this thesis is to design and manufacture printed circuit board to allow a connection of FOX Board module with the technological process. The board was designed with regard to maintain compact module and easy availability of digital and analog inputs/outputs for easy connection of the controlled system.

Prototype size of 120 x 100 mm allows to connect up to four analog input signals, four output analog signals, eight digital input signals and eight output digital signals which status is visualized by signaling LEDs. After power-up the prototype initializes the A/D and D/A converter and GPIO pins. RTC is (in case of power supply disconnect) sourced by button-type battery which keeps the RTC running.

The main utility equipment is written in the C programming language and allows full use of computing power of the module to the user. The program is designed to control laboratory heat plant systems, but without any significant modifications is applicable to almost any type of the controlled system. After entering the system parameters, the program is able to determine the ideal controller coefficients by seven control algorithms. With the calculated or user-defined control parameters we can simulate the control process or directly regulate the controlled system. The program can be operated via command line or via a user-friendly way in the form of HTML interface. In terms of set the calculation, simulation and control are two entirely identical approaches.

Graphical interpretation of control or simulation data are provided to the user with dynamic graphs that allow to zoom in on it and turn off the rendering of waveforms that are displayed in the HTML window through JavaScript libraries. Data are systematically archived in a file with an automatically generated name based on the current date and time at start of control in a format that allows their later processing and evaluation.

The prototype and the utility were tested on laboratory heating system, where were verified all programmatically created control algorithms. Various regulatory processes for different design methods are identical in comparison with the expected waveforms given by MATLAB program.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HYNIOVÁ, Kateřina. *Základy řízení systémů: přednášky*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2012, 186 s. ISBN 9788001050651.
- [2] VÍTEČKOVÁ, Miluše. *Základy automatické regulace*. Přepřac. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 243 s. ISBN 9788024819242.
- [3] ŠVARC, Ivan. *Automatické řízení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, vi, 348 s. ISBN 9788021443983.
- [4] PAVEL NAVRÁTIL. *Automatizace - Vybrané statě* [online]. první. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011 [cit. 2013-05-28]. ISBN 978-80-7318-935-8.
- [5] Spojité typy regulátorů. [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://195.178.89.122/CAAC_PHP/CAAC/cesky/synteza/s_reg/s_reg.php
- [6] Diskrétní systémy: Tvarování signálu. [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://195.178.89.122/CAAC_PHP/CAAC/cesky/analyza/tvarsign/tvarsign.php
- [7] Číslicová regulace: Vzorkování. [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/>
- [8] VLACH, Jaroslav. *Řízení a vizualizace technologických procesů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 159 s. ISBN 808605666x.
- [9] Acme Systems srl. [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.acmesystems.it/FOXLLX>
- [10] Axis Communications s.r.o. [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.axis.com/products/dev_etraX_100lx/schematics.htm
- [11] BALÁTEĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 663 s. ISBN 8073001489.
- [12] HRUŠKA, František. *Senzory v systémech informatiky a automatizace*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 177 s. ISBN 978-807-3186-302.
- [13] ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 333 s. ISBN 8001030075.

- [14] VAŠEK, Vladimír. *Teorie automatického řízení*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1990, 139 s. ISBN 802140115x.
- [15] SCHMID, Dietmar. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2005, 420 s. ISBN 8086706109.
- [16] ROUBAL, Jiří a Petr HUŠEK. *Regulační technika v příkladech*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011, xxii, 276, ii s. ISBN 9788073002602.
- [17] JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. *EAGLE pro začátečníky: návrhový systém pro plošné spoje : uživatelská a referenční příručka*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 9788073002138.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D	Analogově-digitální
ATA	Advanced Technology Attachment
CGI	Common Gateway Interface
CSV	Comma-Separated Value
D/A	Digitálně-analogový
DDE	Dynamic Data Exchange
DMA	Direct Memory Access
DPS	Deska Plošného Spoje
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory
GPIO	General Purpose Input/Output
HMI	Human-Machine Interface
HTML	HyperText Markup Language
I ² C	Inter-Integrated Circuit
LED	Light-Emitting Diode
LPT	Line Printer Terminal
MAC	Media Access Control
MMI	Man-Machine Interface
MMU	Memory Management Unit
ODBC	Open DataBase Connectivity
PD	Proporcionálně-derivační
PI	Proporcionálně-integrační
PID	Proporcionálně-integračně-derivační
PSD	Proporcionálně-sumačně-diferenční

PWM	Pulse Width Modulation
RICS	Reduced Instruction Set Computing
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCSI	Small Computer System Interface
SDK	Software Development Kit
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
SSH	Secure Shell
TSSOP	Thin-Shrink Small Outline Package
TTL	Transistor-Transistor-Logic
USB	Universal Serial Bus
WWW	World Wide Web

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma obecného systému řízení [2]	11
Obr. 2. Blokové schéma pro ovládání (a) a pro regulaci (b) [3]	12
Obr. 3. Obecné blokové schéma systému regulačního obvodu [4]	13
Obr. 4. Základní zpětnovazební zapojení [4]	15
Obr. 5. Blokové uspořádání regulátoru [3]	17
Obr. 6. Logická funkce jedné proměnné [4]	19
Obr. 7. Značka funkce negace [4]	19
Obr. 8. Logická funkce dvou proměnných [4]	20
Obr. 9. Blokové schéma spojitého uzavřeného regulačního obvodu [4]	24
Obr. 10. Diskrétní regulační obvod [3]	30
Obr. 11. Funkce tvarovacího členu nultého řádu [6]	31
Obr. 12. Diskrétní náhrady integrace spojitého signálu [4]	34
Obr. 13. Náhrady derivace spojitého signálu [4]	34
Obr. 14. Blokové schéma řídicího systému pro vizualizace [8]	36
Obr. 15. Příklad struktury vizualizačního programu [8]	37
Obr. 16. Spojité a diskrétní signály [2]	39
Obr. 17. Embedded jednotka FOX Board LX416 [9]	40
Obr. 18. Vstupně/výstupní prvky modulu FOX Board	41
Obr. 19. Blokové schéma mikroprocesoru Axis ETRAX 100LX [10]	42
Obr. 20. Webový kompilátor pro FOX Board LX	44
Obr. 21. Schéma napájecího zdroje	46
Obr. 22. Schéma zapojení binárních vstupů a výstupů	47
Obr. 23. Schéma zapojení analogových vstupů	49
Obr. 24. Schéma zapojení analogových výstupů	49
Obr. 25. Schéma zapojení obvodu reálného času	50
Obr. 26. Popis rozšiřující desky pro styk s technologickým procesem	51
Obr. 27. Rozšiřující deska a FOX Board modul	52
Obr. 28. Vývojový diagram	58
Obr. 29. Obrazovka hlavního programu	59
Obr. 30. Komunikace mezi klientem, serverem a CGI skriptem	60
Obr. 31. Webové rozhraní modulu FOX Board	61

Obr. 32. Příklad nastavení a čtení RTC obvodu prostřednictvím příkazové řádky	62
Obr. 33. Příklad nastavení PSD regulátoru metodou požadovaného modelu.....	63
Obr. 34. Grafická interpretace simulačních a regulačních dat	64
Obr. 35. Výsledek regulace použitím PSD regulátoru metodou požadovaného modelu.....	65
Obr. 36. Výsledek regulace použitím regulátoru metodou konečného počtu kroků.....	66

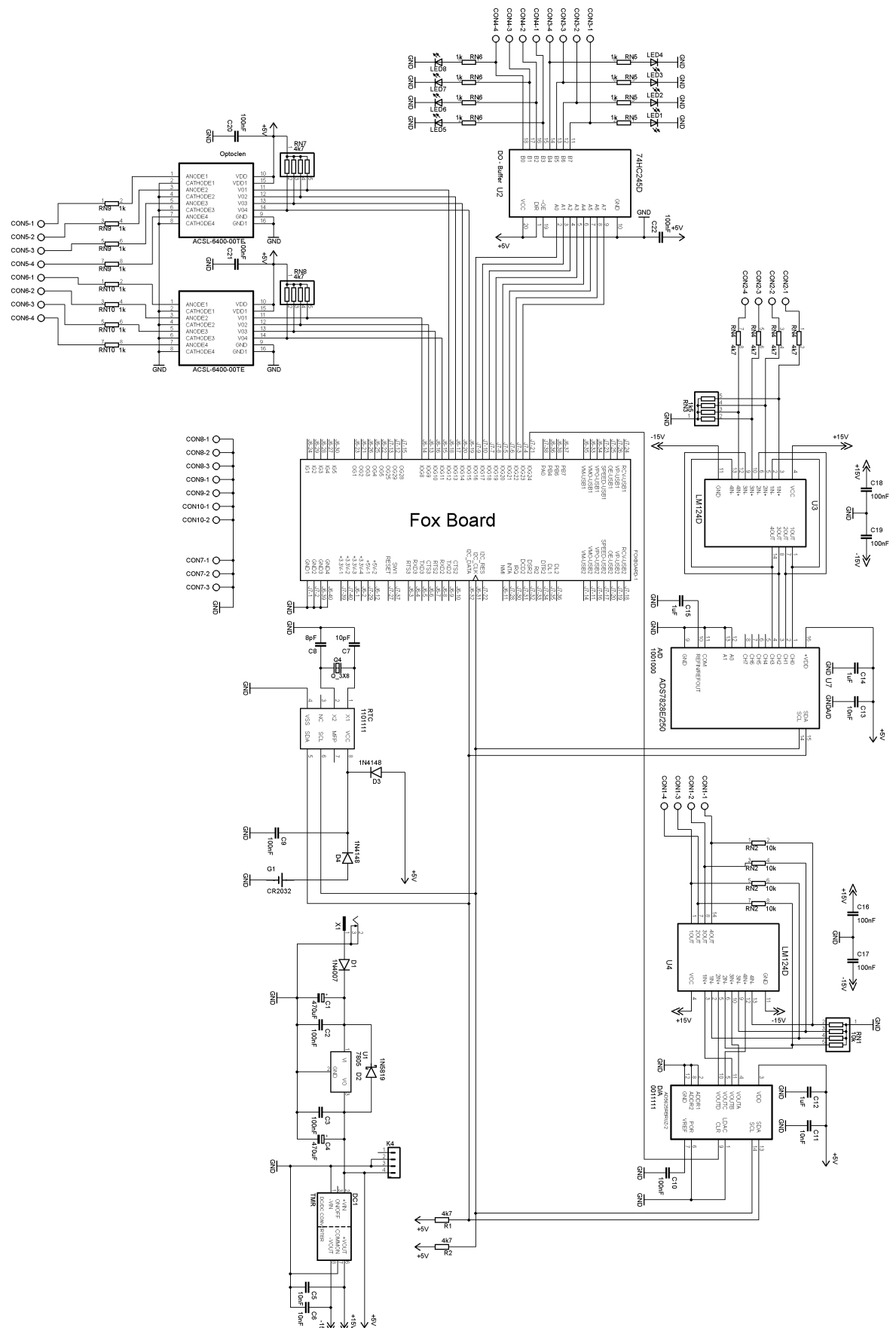
SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Základní logické funkce dvou proměnných.....	20
Tab. 2. Dynamické vlastnosti spojitých regulátoru.....	26
Tab. 3. Přibližná volba periody vzorkování.....	32
Tab. 4. Přehled funkcí pro práci s PWM modulací.....	53
Tab. 5. Přehled funkcí pro práci s I ² C sběrnici	53
Tab. 6. Přehled funkcí pro práci s digitálními vstupy a výstupy.....	53
Tab. 7. Přehled funkcí pro práci s analogovými vstupy a výstupy.....	54
Tab. 8. Přehled funkcí pro práci s obvodem reálného času	54
Tab. 9. Přehled funkcí pro práci s adresáři a soubory	54
Tab. 10. Přehled funkcí pro výpočet ideálních parametrů regulátoru.....	55
Tab. 11. Přehled funkcí pro simulaci regulačního pochodu	55
Tab. 12. Přehled funkcí pro regulaci soustavy.....	56

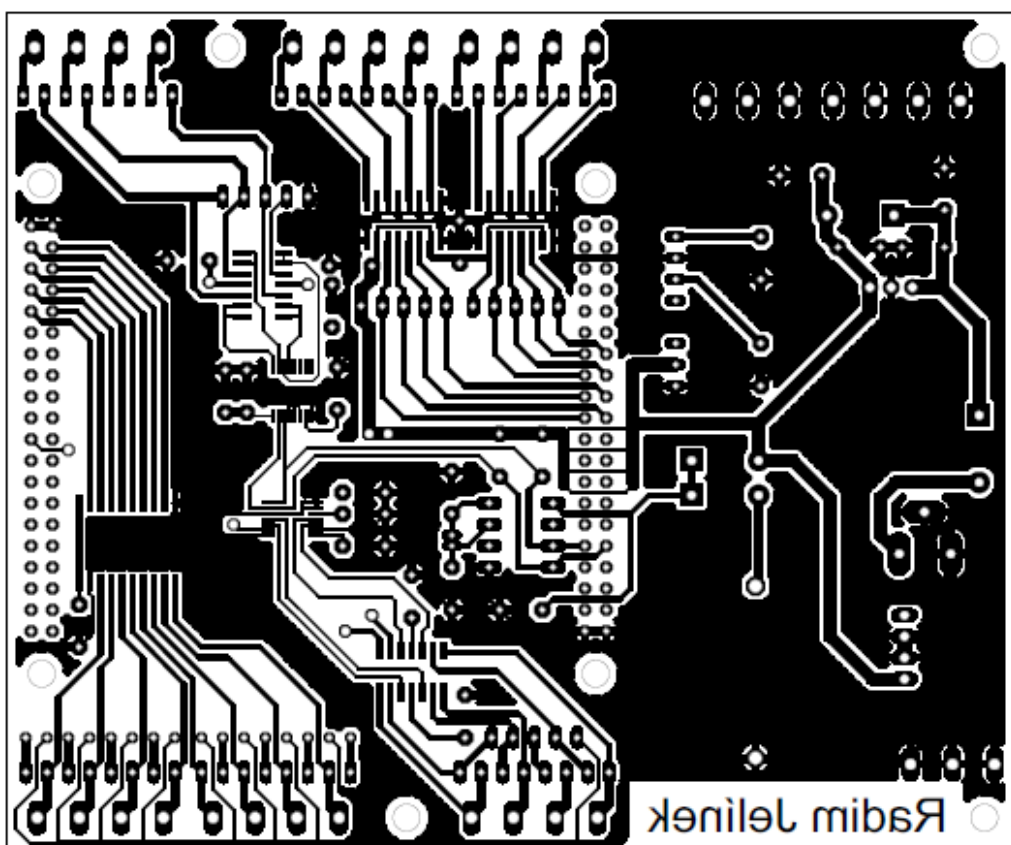
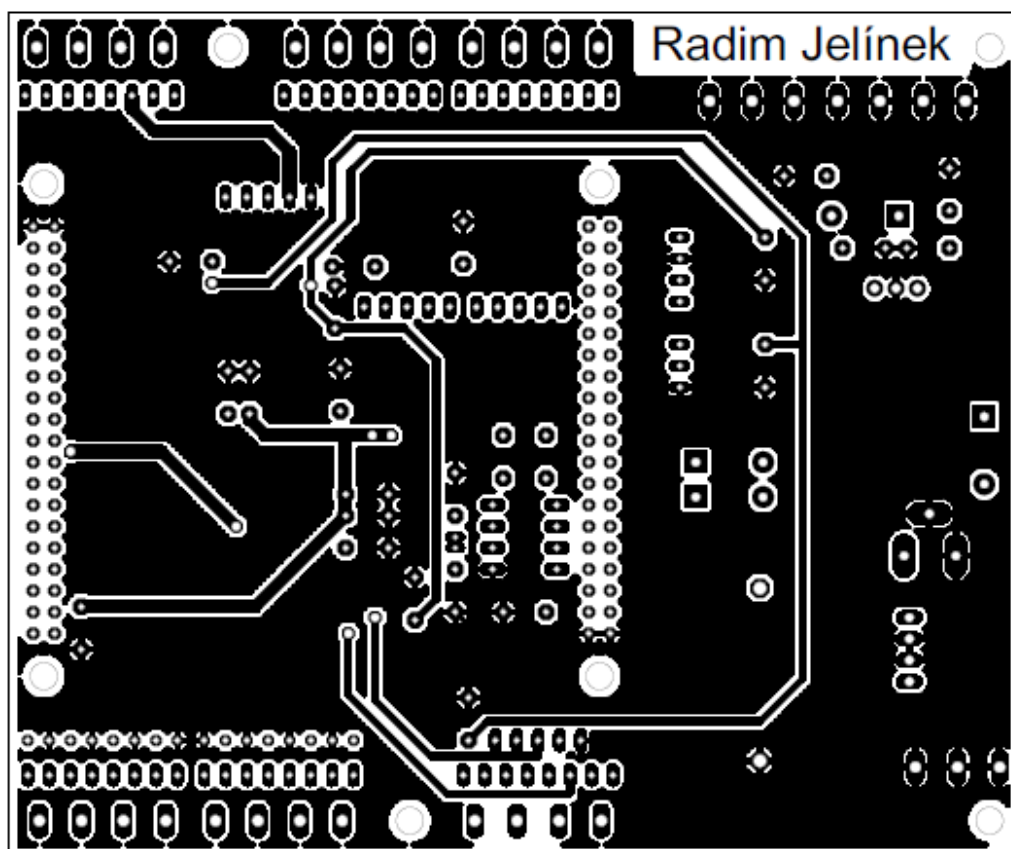
SEZNAM PŘÍLOH

- P I Schéma zapojení rozšiřující desky
- P II Plošný spoj
- P III Osazovací plán
- P IV Seznam součástek
- P V Fotodokumentace
- P VI Elektronické přílohy a verze diplomové práce na DVD

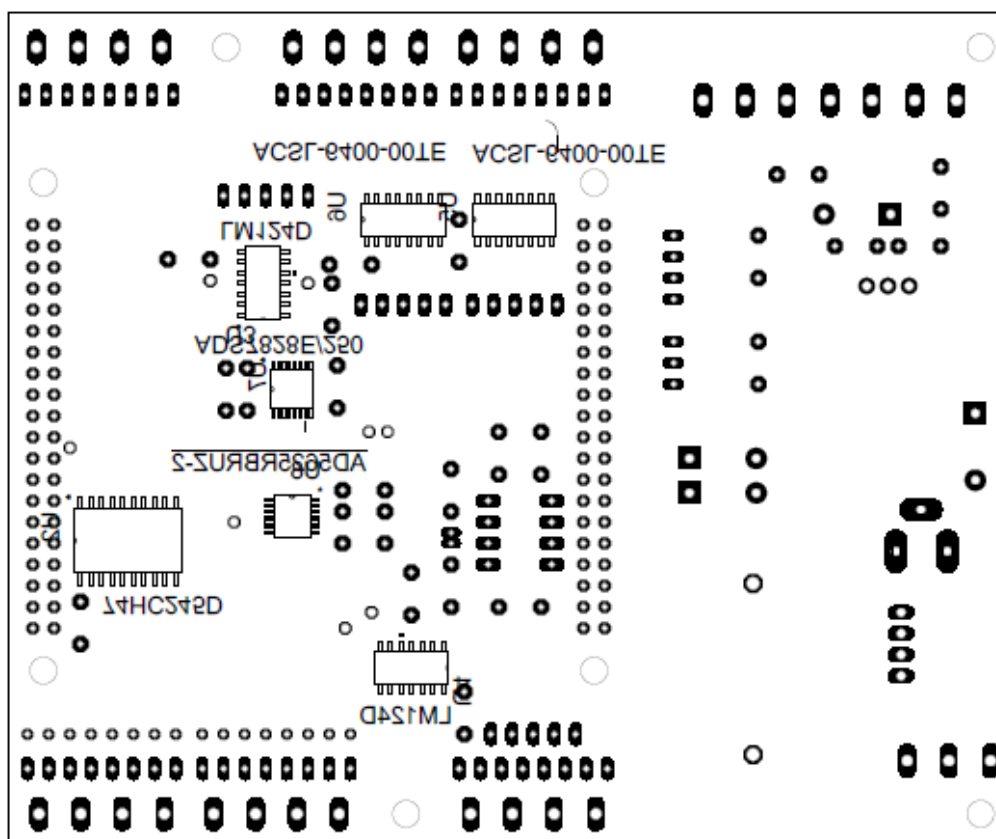
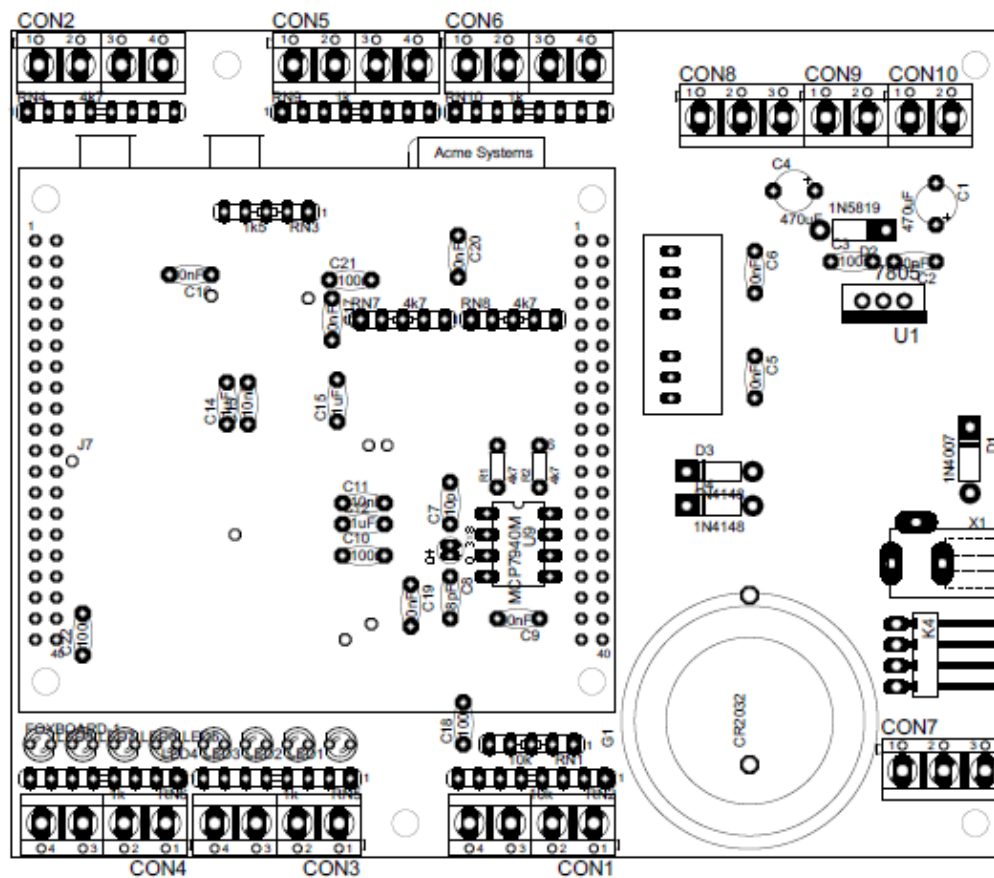
PŘÍLOHA P I: SCHÉMA ZAPOJENÍ ROZŠÍŘUJÍCÍ DESKY



PŘÍLOHA P II: PLOŠNÝ SPOJ



PŘÍLOHA P III: OSAZOVACÍ PLÁN



PŘÍLOHA P IV: SEZNAM SOUČÁSTEK

Projekční značení	Typ součástky	Počet kusů
C1, C2	Kondenzátor elektrolytický radiální, 470uF/50V	2
C12, C14, C15	Keramický kondenzátor 1u/50 V	3
C2, C3, C9, C10, C16, C17, C18, C19, C20, C21, C22	Keramický kondenzátor 100n/100 V	11
C5, C6, C11, C13	Keramický kondenzátor 10n/100 V	4
C7	Keramický kondenzátor 10n/100	1
C8	Keramický kondenzátor 8p2/50 V	1
CON 1 - CON 6	Šroubovací svorkovnice do DPS, černá	6
CON 7 - CON 10	Šroubovací svorkovnice do DPS, modrá	5
D1	Dioda 1000V/1A - 1N4007	1
D2	Dioda 40V/1A - 1N5819	1
D3, D4	Dioda 75V/0,2A - 1N4148	2
DC1	TRACOPOWER - TMR 3-0523 - CONVERTER, DC/DC, 3W, +/-15V/0.1A	1
G1	Držák Li bat.20x4,95mm, CR2016, CR2020, CR2032, montáž na DPS	1
LED1 - LED8	LED 3mm červená	8
Q4	Citizen krystal - 32.768KHZ	1
R1, R2	Odpor 4k7	2
RN1, RN2	RR 4X10K 2% - odporová síť SIP A, 5 pinů	2
RN3	RR 4X1K5 2% - odporová síť SIP A, 5 pinů	1
RN4	RR 4X4K7 2% - odporová síť SIP B, 8 pinů	1
RN7, RN8	RR 4X4K7 2% - odporová síť SIP A, 5 pinů	2
RN5, RN6, RN9, RN10	RR 4X1KB 2% - odporová síť SIP B, 8 pinů	4
U1	Lineární regulátor napětí 7805 5V/1A, pouzdro TO220	1
U2	NXP - 74HC245D - IC	1
U3, U4	TEXAS INSTRUMENTS - LM124D	2
U5, U6	AVAGO TECHNOLOGIES - ACSL-6400-00TE	2
U7	TEXAS INSTRUMENTS - ADS7828E/250 - IC, 12BIT	1
U8	ANALOG DEVICES - AD5625RBRUZ-2 - 12BIT	1
U9	MICROCHIP - MCP7940M-I/P - RTC	1
	chladic 13x19x6 25K/W TO-220 černý	1
	Napájecí souosý konektor	1
	Dutinková lišta rovná, 2 řady, rozteč 2,54mm, 2x20 pinů.	2

PŘÍLOHA P V: FOTODOKUMENTACE

