

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Realizace regulačních algoritmů na multifunkčním
průmyslovém regulátoru KS 98-1

Milan Jičínský

Bakalářská práce

2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan Jičínský**
Osobní číslo: **I10326**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Realizace regulačních algoritmů na multifunkčním průmyslovém regulátoru KS 98-1**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl práce

Návrh a ověření zvolených regulačních algoritmů v prostředí Matlab - Simulink. Realizace vybraných algoritmů řízení v prostředí ET/KS 98 a jejich ověření v prostředí SIM/KS 98 a při použití multifunkčního průmyslového regulátoru PMA KS 98-1 připojeného k PC.

Teoretická část

Stručná rešerše problematiky týkající se multifunkčních průmyslových regulátorů. Návrh vybraných regulačních algoritmů a nalezení jejich optimálních parametrů.

Implementační část

Vytvoření skriptů v Matlabu, realizace počítačového modelu v Simulinku. Softwarová implementace navržených řídicích algoritmů v prostředí ET/KS 98. Ověření funkce na základě simulace v prostředí SIM/KS 98 a s regulátorem KS 98-1 připojeným k PC.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] Dorf, R. C., Bishop, R. H. Modern Control Systems. 10 vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005. ISBN 0-13-127765-0.
- [2] Hlava, J. Prostředky automatického řízení II: analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02221-8.
- [3] Balátě, J. Automatické řízení. 2 vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-148-9.
- [4] Kupka, L., Janeček, J. Matlab & Simulink: řešené příklady. 1. vyd. Lanškroun: TG tisk a SOŠ a SOU, 2007. ISBN 978-80-239-9532-9.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Kupka, Ph.D.

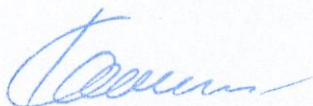
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce:

27. listopadu 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. května 2013



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích 10. 5. 2013

Milan Jičínský

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Liborovi Kupkovi, Ph.D., za cenné rady, podporu, poskytnuté materiály a příjemný přístup. Velké díky patří samozřejmě všem členům mé rodiny. Za to že při mně stáli a podporovali mě, kdykoliv jsem to potřeboval. Bez jejich morální a finanční podpory bych se tak daleko zřejmě nikdy nedostal. Nemohu zapomenout ani na své přátele, jejichž psychické podpory si nesmírně cením. Jmenovitě bych chtěl poděkovat Petru Zemachovi, Petru Černohlávkovi, Tomáši Rejzkovi, Andreje Klímové, Radimu Kyrzovi, Romanu Pluskalovi a Katce Herzogové. Jsem rád, že mám kolem sebe lidi, které můžu nazývat opravdovými přáteli.

Anotace

Předmětem této práce je problematika multifunkčních průmyslových regulátorů. Cílem je prozkoumat některé z mnoha možností praktického využití nejen v průmyslu. Univerzálnost přístroje ještě doplňuje software od výrobce, který umožňuje úpravu konfigurace dle požadavků uživatele.

Klíčová slova

Průmyslový regulátor, regulace, automatizace.

Title

The implementation of control algorithms using the multifunctional industrial controller KS 98-1.

Annotation

Issues about multifunctional industrial controller are the subject of thesis. The main objective is to explore some ways of practical usage not only in industry. Versatility of device depends on software. It allows us to configure device especially according to user's requirements.

Keywords

Industrial controller, regulation, automation.

Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Úvod.....	13
Průmyslové regulátory - teorie	14
1.1 Úvodní pojmy	14
1.1.1 Ovládání.....	14
1.1.2 Regulace.....	14
1.1.3 Vyšší kybernetické řízení.....	15
1.2 Historie.....	15
1.3 Paralelní a sériový tvar rovnic	17
1.4 Číslicové regulátory	19
1.5 Rampování	22
1.6 Wind-up	22
1.7 Automatické nastavení parametrů	24
1.7.1 Metoda EXACT (EXpert Adaptive Controller Tuning)	24
1.7.2 Samočinné nastavení regulačních parametrů regulátoru KS98-1.....	25
1.8 Optimalizace parametrů	27
1.8.1 Metoda kritického zesílení (kritické frekvence)	27
1.8.2 Metoda přechodové odezvy	27
1.9 Volba soustavy.....	28
2 Praktická část.....	31

2.1	Inženýrský software ET/KS98.....	31
2.2	Funkční bloky	33
2.2.1	AINP1	33
2.2.2	I_OUT	34
2.2.3	LED.....	34
2.2.4	VBAR	34
2.2.5	VTREND	36
2.2.6	CONTR.....	37
2.2.7	PIDMA.....	39
2.2.8	L1READ	39
2.2.9	ALARM	40
2.3	Simulační software SIM/KS98	40
2.4	Regulační algoritmy.....	43
2.4.1	Reléový regulátor s jedním výstupem	43
2.4.2	Spojité regulátor	45
2.5	Skutečné zapojení	49
	Závěr	50
	Literatura.....	51

Seznam zkratek

URO	Uzavřený regulační obvod
ORO	Otevřený regulační obvod
USB	Universal serial bus
RAM	Random access memory
PID	Proporcionálně-integračně-derivační
ZN	Ziegler-Nichols
px	Pixel
AČ	Akční člen
OZ	Operační zesilovač

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - Otevřený regulační obvod.....	14
Obrázek 1.2 - Uzavřený regulační obvod	14
Obrázek 1.3 - Blokové schéma regulátoru.....	15
Obrázek 1.4 - Paralelní tvar PID.....	16
Obrázek 1.5 - Sériový tvar PID s interakcí	16
Obrázek 1.6 - Ukázka aktivní realizace PID regulátoru	17
Obrázek 1.7 – Průmyslový regulátor KS98-1.....	20
Obrázek 1.8 - Blokové schéma číslicového regulátoru	21
Obrázek 1.9 - Ilustrační graf rampové funkce	22
Obrázek 1.10 - Wind-up efekt	23
Obrázek 1.11 - Kmity při použití metody EXACT	25
Obrázek 1.12 - Přechod na stránku samooptimalizace	26
Obrázek 1.13 - Přechodový děj pro nekmitavé stat. systémy s vyznačenými parametry	28
Obrázek 1.14 - Reálný model soustavy	28
Obrázek 2.1 - Prostředí ET/KS98	31
Obrázek 2.2 - Funkční blok AINP	33
Obrázek 2.3 - Funkční blok I_OUT	34
Obrázek 2.4 - Funkční blok LED.....	34
Obrázek 2.5 - Funkční blok VBAR	35
Obrázek 2.6 - Ovládací stránka bloku VBAR	35
Obrázek 2.7 - Funkční blok VTREND	36
Obrázek 2.8 - Ovládací stránka bloku VTREND	36

Obrázek 2.9 - Funkční blok CONTR.....	37
Obrázek 2.10 - Okno pro nastavení parametrů regulátoru.....	38
Obrázek 2.11 – Funkční blok PIDMA.....	39
Obrázek 2.12 - Funkční blok L1READ	40
Obrázek 2.13 - Funkční blok ALARM.....	40
Obrázek 2.14 - Simulátor SIM/KS98	41
Obrázek 2.15 - Nastavení verze přístroje v simulátoru	42
Obrázek 2.16 – Schéma obvodu s reléovým regulátorem v Simulinku.....	43
Obrázek 2.17 – Reléový regulační algoritmus.....	44
Obrázek 2.18 – Regulační pochod v simulátoru.....	44
Obrázek 2.19 – Tentýž regulační pochod v okně trendu	45
Obrázek 2.20 – Simulační schéma pro paralelní tvar přenosu	46
Obrázek 2.21 – Optimalizace parametrů podle metody ZN na základě skriptu	46
Obrázek 2.22 - Simulační schéma pro sériový tvar přenosu	47
Obrázek 2.23 – Regulace na žádanou hodnotu bez překmitu (sériový tvar)	47
Obrázek 2.24 - Regulační pochod bez překmitu na skutečné soustavě	48
Obrázek 2.25 – Svorkovnice na zadní straně regulátoru	49

Seznam tabulek

Tabulka 1.1 - Nastavení konstant regulátoru	26
Tabulka 1.2 – Metoda ustálených kmitů.....	27
Tabulka 1.3 – Metoda přechodové odezvy	28
Tabulka 2.1 - Přehled úrovní zabezpečení.....	32

Úvod

Cílem práce je blíže se seznámit s multifunkčním průmyslovým procesním regulátorem KS98-1, který je vyvíjen německou společností PMA. Regulátor je uzpůsoben zejména pro řízení technologických procesů. V praxi se pak nejčastěji používá právě k regulaci teploty. Je plně programovatelný. Tvorba vnitřní struktury je zajištěna formou blokových schémat. Inženýrský software k návrhu struktury vhodně doplňuje simulátor. Regulátor je vybaven nejen pro připojení k počítači, ale také pro komunikaci s dalšími zařízeními po sběrnici RS485 ISO 1745 / Modbus RTU, Interbus, CAN či PROFIBUS DP. Velmi snadno se připojuje k počítači přes USB. K dispozici je výběr hned několika rozšiřujících modulů, které umožňují uživateli přizpůsobit regulátor pro jakoukoliv aplikaci. Umožňuje realizovat celou řadu regulačních algoritmů, což rozšiřuje oblast praktického použití nejen pro tepelné soustavy. Ovládání pomocí tlačítek na čelním panelu je velmi intuitivní a omezuje se pouze na čtyři klávesy. Průběžné hodnoty vstupů, výstupů a dalších sledovaných veličin se zobrazují na displeji s rozlišením 160x80 px. Barva displeje se může měnit např. pro zdůraznění nežádoucího stavu. Regulátor navíc umožňuje vykreslovat průběhy sledovaných veličin. V práci budou zmíněny určité teoretické předpoklady, které mohou být velmi užitečné při práci s regulátorem. Nebude chybět ani popis použitého softwaru. Dalším klíčovým bodem je simulace regulačních pochodů v prostředí Matlab. Cílem je, aby bylo u skutečného regulátoru KS98-1 dosaženo co nejpodobnějších průběhů.

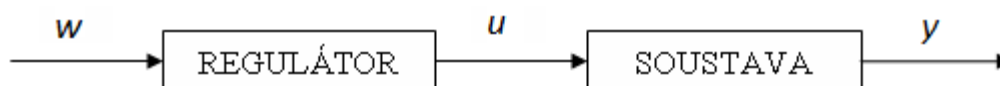
1 Průmyslové regulátory – teorie

1.1 Úvodní pojmy

Na počátku je třeba se zabývat problematikou řízení. V podstatě se jedná o posloupnost předem stanovených zásahů do řízeného objektu, které vedou k dosažení zadaného cíle. Obecně rozlišujeme řízení ruční a automatické. V rámci této práce budu již nadále uvažovat pouze řízení automatické, které se dále dělí na tři stupně. Nejčastěji se vychází z URO popř. ORO.

1.1.1 Ovládání

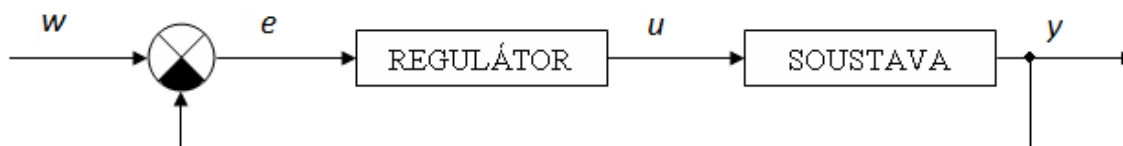
Někdy se také označuje jako dopředné řízení. Je to přímočaré řízení bez kontroly stavu (zpětné vazby) ovládaného objektu. Používá se zejména při změně stavu zařízení.



Obrázek 1.1 - Otevřený regulační obvod

1.1.2 Regulace

V literatuře také bývá označována jako zpětnovazební řízení. Regulátor reaguje na základě zjištění skutečné hodnoty regulované veličiny a dokáže eliminovat vliv poruch, které působí nepříznivě na regulovanou soustavu z hlediska požadovaného stavu. Umožňuje tak sledování požadované hodnoty. Informace o aktuální hodnotě regulované veličiny se regulátoru předává prostřednictvím zpětné vazby. Proces regulace můžeme snadno demonstrovat na schématu uzavřeného regulačního obvodu, které je na obrázku 1.2. Regulátor i soustava jsou charakterizovány svým přenosem v operátorovém tvaru. Vystupuje zde navíc regulační odchylka, která je definovaná jako rozdíl hodnoty požadované a hodnoty skutečné. Vzniká též nepříznivým působením poruch na regulovanou soustavu. Poruchy zde nejsou naznačeny, ale mohou působit v kterémkoliv místě.



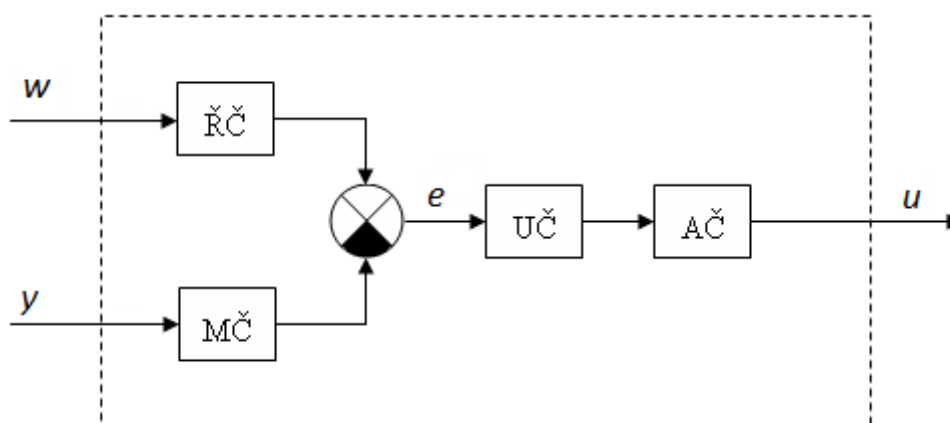
Obrázek 1.2 - Uzavřený regulační obvod

1.1.3 Vyšší kybernetické řízení

Je považováno za nejvyšší stupeň řízení. Řadíme sem například adaptivní systémy, které se umí přizpůsobit změnám vlastností (parametrů) regulované soustavy při zachování kvality regulace. Dále pak učící se systémy, které kromě identifikace soustavy umí také efektivně měnit algoritmus řízení (pořadí jednotlivých operací). Učící se systémy můžeme dále dělit podle míry informací, které má řídicí zařízení k dispozici na systémy pravděpodobnostní a systémy deterministické.

1.2 Historie

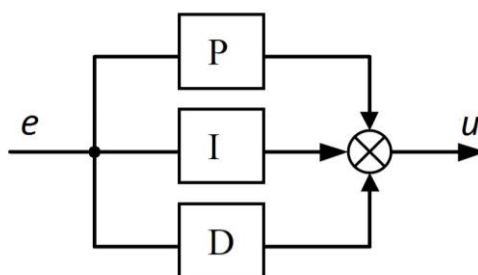
Regulátor je zařízení, které na základě zjištění skutečné hodnoty regulované veličiny, určí regulační odchylku a působí akční veličinou na regulovanou soustavu tak, aby odchylka byla minimální. K objasnění principu činnosti poslouží schéma URO na obrázku 1.2 a blokové schéma regulátoru.



Obrázek 1.3 - Blokové schéma regulátoru

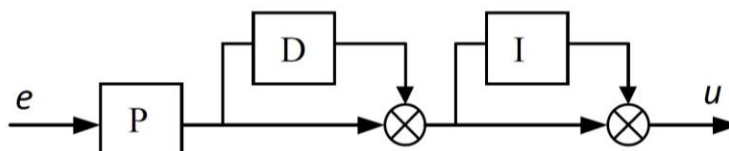
Klíčové samozřejmě je, aby byl celý obvod ve výsledku stabilní a měl požadované dynamické vlastnosti. Dynamické vlastnosti regulátoru i soustavy jsou popsány diferenciálními rovnicemi. S výhodou se využívá Laplaceovy transformace, která místo času zavádí tzv. Laplaceův operátor, což je komplexní proměnná. Nejčastěji se označuje s případně p . To umožňuje snadno převést obyčejné diferenciální rovnice n -tého řádu na algebraické rovnice n -tého stupně. Regulátor i soustava jsou pak charakterizovány tzv. operátorovým přenosem, který je definován jako poměr Laplaceova obrazu výstupu ku obrazu vstupu při nulových počátečních podmínkách.

Rozlišují se 3 základní typy spojitých regulátorů, které bývají také označovány jako jednoduché či jednosložkové. Dělí se tedy na proporcionální, integrační a derivační. V praxi se používá značení P, I nebo D regulátor. P složka je poměrně stabilní a rychle reaguje, nicméně pracuje s trvalou regulační odchylkou. Oproti tomu I regulátor je málo stabilní, ale úplně odstraňuje regulační odchylku. D regulátor se v praxi samostatně nikdy nepoužívá, neboť reaguje pouze na změny regulační odchylky nikoliv na odchylku jako takovou. Všechny složky mají svůj význam a jejich kombinací se docílí požadovaných vlastností. Tyto regulátory se nazývají sdružené. V rámci této práce se dále budu zabývat pouze problematikou PID regulátorů.



Obrázek 1.4 - Paralelní tvar PID [8]

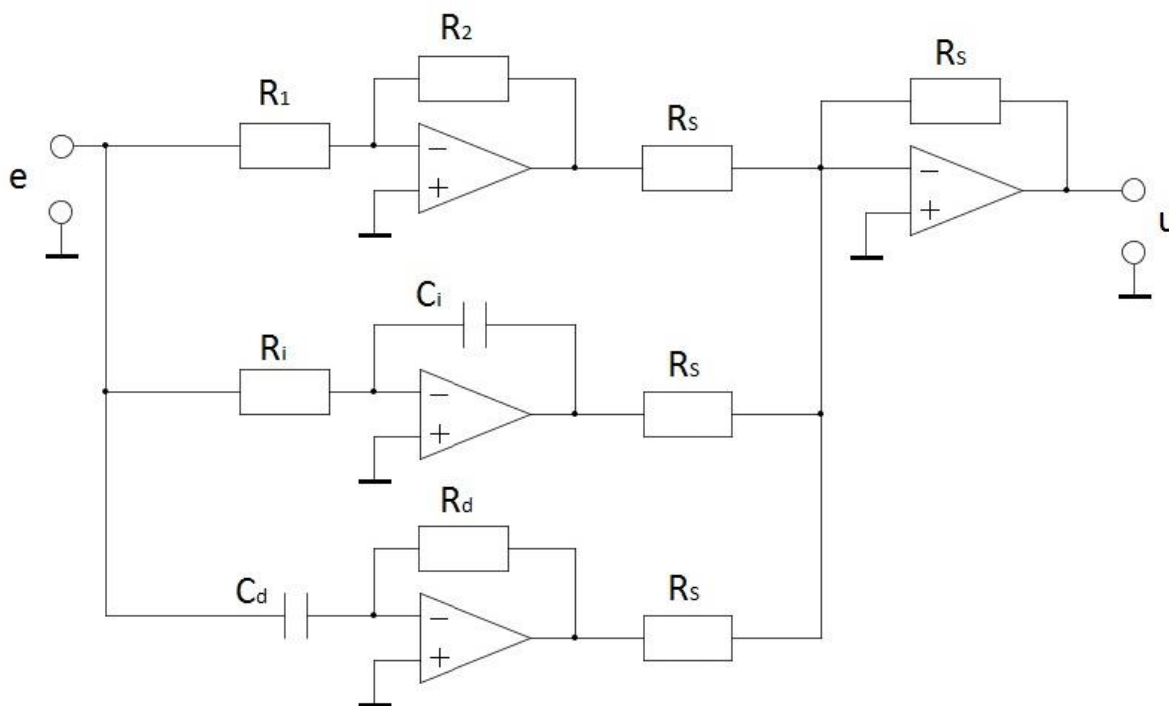
Regulátory prošly poměrně dlouhou cestou vývoje. Na počátku se konstruovaly výhradně spojitě regulátory a až později pak nespojitě 2-polohové a 3-polohové. Jako poslední se začaly rozvíjet konstrukčně složitější diskrétní (číslicové) regulátory. Co se týče konstrukce regulátorů, ať už sdružených nebo jednoduchých, je zde možnost aktivní nebo pasivní realizace. Pasivní spočívá v použití tzv. korekčních členů. Jedná se tedy o kombinaci odporů a kondenzátorů – klasické RC články.



Obrázek 1.5 - Sériový tvar PID s interakcí [8]

Při aktivní realizaci jsou použity operační zesilovače v integračním, derivačním či invertujícím zapojení. Jednotlivé parametry regulátoru se mohou, ale také vůbec nemusí ovlivňovat. Proto je nutné rozlišovat aktivní realizaci s interakcí a bez interakce. U regulátoru s interakcí se změnou jednoho parametru změní i ostatní, výhodou však je, že k realizaci stačí

pouze jeden operační zesilovač. Zapojení bez interakce je tedy složitější, ale nedochází k ovlivňování. Příklad aktivní realizace PID regulátoru bez interakce je na obrázku 1.6.



Obrázek 1.6 - Ukázka aktivní realizace PID regulátoru

1.3 Paralelní a sériový tvar rovnic

Regulátor je popsán operátorovým přenosem $G_R(p)$. Pro spojitý PID regulátor se vychází podle [1] z následující diferenciální rovnice v časové oblasti

$$u(t) = K_0 \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1.1)$$

kde K_0 (resp. r_0) je proporcionální zesílení regulátoru, T_I je integrační časová konstanta a T_D je derivační časová konstanta, u je akční zásah a e označuje regulační odchylku. Pro zjednodušení lze rovnici roznásobit a pro přehlednost zavést následující substituci podle jednotlivých složek regulátoru

$$P = K_0 \quad I = \frac{K_0}{T_I} \quad D = K_0 \cdot T_D \quad (1.2)$$

Výsledná rovnice je pak ve tvaru

$$u(t) = P \cdot e(t) + I \int_0^t e(\tau) d\tau + D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1.3)$$

kde konstanty P , I , D představují proporcionální, integrační a derivační zesílení regulátoru. Po aplikaci Laplaceovy transformace dostáváme algebraickou rovnici

$$U(p) = P \cdot E(p) + I \cdot \frac{1}{p} \cdot E(p) + D \cdot p \cdot E(p) \quad (1.4)$$

kde vystupují obrazy veličin v závislosti na komplexní proměnné p nikoliv původní veličiny. Jedná se o tzv. paralelní tvar bez interakce. Všechny složky se pouze sčítají a nijak se navzájem neovlivňují. Necháme-li rovnici v neroznásobeném tvaru tj.

$$U(p) = K_0 \left(E(p) + \frac{1}{T_I \cdot p} \cdot E(p) + T_D \cdot p \cdot E(p) \right) \quad (1.5)$$

pak volíme parametry K_0 , T_I a T_D , které už na sobě závisí. Rovnice v této formě se nazývá paralelní tvar s interakcí. V běžné praxi je používanější než roznásobená varianta. Sériový (někdy také nazývaný klasický) tvar rovnice PID je následující

$$U(p) = K_{0s} \left(1 + \frac{1}{T_{Is} \cdot p} \right) (1 + T_{Ds} \cdot p) E(p) \quad (1.6)$$

S tímto tvarem se můžeme setkat u průmyslových regulátorů nejčastěji. Podstatné je, že konstanty sériového přenosu nejsou stejné, jako je tomu u přenosu paralelního. Existují však vztahy pro přepočítání ze sériového tvaru na paralelní. Pro odvození je třeba na levou stranu rovnice umístit paralelní tvar a na pravé straně pak bude sériový tvar, přičemž celou rovnici podělíme $E(p)$, roznásobíme a dostáváme tedy

$$K_0 + \frac{K_0}{T_I \cdot p} + K_0 \cdot T_D \cdot p = K_{0s} + K_{0s} \cdot \frac{T_{Ds}}{T_{Is}} + \frac{K_{0s}}{T_{Is} \cdot p} + K_{0s} \cdot T_{Ds} \cdot p \quad (1.7)$$

Nyní je zřejmé, že musí být porovnány koeficienty u odpovídajících mocnin Laplaceova operátoru p a to následujícím způsobem

$$K_0 = K_{0s} + K_{0s} \frac{T_{Ds}}{T_{Is}} \quad (1.8)$$

$$\frac{K_0}{T_I} = \frac{K_{0s}}{T_{Is}} \Rightarrow T_I = K_0 \frac{T_{Is}}{K_{0s}} = \left(K_{0s} + K_{0s} \cdot \frac{T_{Ds}}{T_{Is}} \right) \frac{T_{Is}}{K_{0s}} = T_{Is} + T_{Ds} \quad (1.9)$$

$$K_0 \cdot T_D = K_{0s} \cdot T_{Ds} \Rightarrow T_D = \frac{K_{0s} \cdot T_{Ds}}{K_0} = \frac{K_{0s} \cdot T_{Ds}}{K_{0s} + K_{0s} \cdot \frac{T_{Ds}}{T_{Is}}} = \frac{T_{Is} \cdot T_{Ds}}{T_{Is} + T_{Ds}} \quad (1.10)$$

Jak uvádí Hlava, dáme-li do poměru konstantu T_I a T_D je patrné, že globální minimum této funkce je pouze jedno a to pro $T_{Is} = T_{Ds}$. Poměr T_I a T_D tedy nelze nastavit na číslo menší než 4. Navíc jakoukoliv změnou T_{Is} nebo T_{Ds} ovlivníme vždy hodnotu obou konstant T_I a T_D .

$$\frac{T_I}{T_D} = \left(2 + \frac{T_{Is}}{T_{Ds}} + \frac{T_{Ds}}{T_{Is}} \right) \quad (1.11)$$

1.4 Číslicové regulátory

Na číslicové regulátory je možné nahlížet jako na určitou aproximaci regulátorů spojitých. Na rozdíl od spojitých jsou popsány diferenčními rovnicemi nikoliv diferenciálními. Pro převod do diskrétní oblasti se používá Z-transformace. Velmi odlišná je také realizace, neboť velmi důležitým prvkem těchto regulátorů je číslicový počítač. Zpravidla se jedná o jednočipový počítač. Obecně je možné vnitřní strukturu regulátoru zjednodušeně popsat blokovým schématem na obrázku 1.8.

Mikroprocesor je tedy jakýmsi pomyslným srdcem regulátoru. Další neodmyslitelnou součástí jsou paměti EPROM, kam se ukládá program, EEPROM popř. Flash EEPROM pro uložení důležitých konstant a parametrů, které nesmí být vymazány ani po ztrátě napájení a paměť RAM. Jak už název napovídá, regulátor bude zpracovávat signály spojitého charakteru číslicově. K tomu je třeba vzorkování. Čím vyšší bude vzorkovací frekvence, tím přesněji samozřejmě signál aproximujeme. Ve spojitosti se vzorkováním se používá také pojem perioda vzorkování, což je převrácená hodnota vzorkovací frekvence. Pro správnou funkci je velmi důležité zajistit, aby byla vzorkovací frekvence konstantní. K tomu slouží tzv. časovací obvody, které jsou tvořeny oscilátorem, jenž je řízen velmi přesným krystalem. Dále je samozřejmě zapotřebí převodníků A/D a D/A. Před vlastním vzorkováním, musí být signál převeden do diskrétní podoby a výsledný akční zásah, který ovlivňuje regulovanou soustavu, musí být převeden D/A převodníkem zpět do spojitého tvaru. Mikroprocesor dále ještě obsahuje speciální obvody jako je např. Watchdog timer, který se stará o to, aby v programu nedošlo k nezacyklení, nebo k nežádoucím stavům. Zacyklení se také někdy

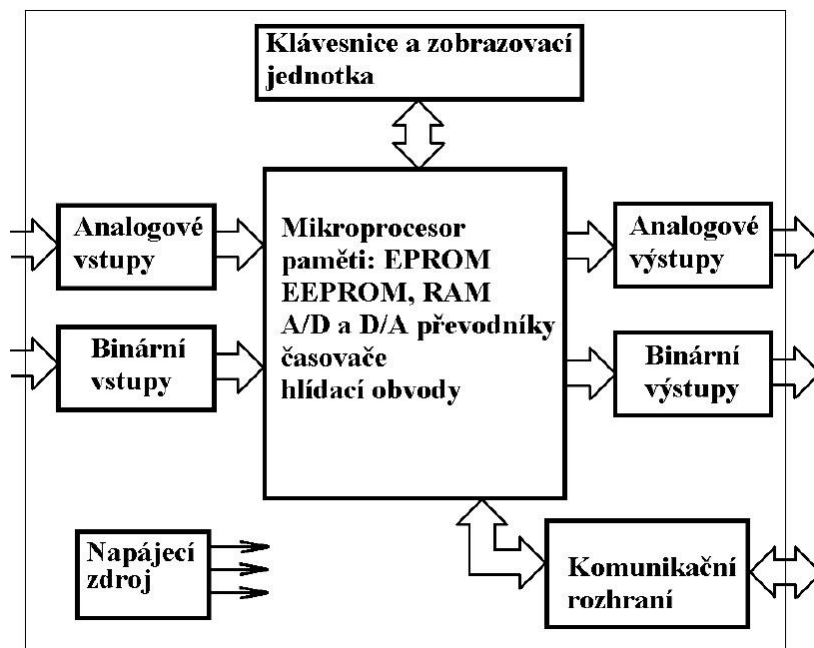
označuje deadlock. Jednočipové mikropočítače typicky všechny tyto součásti integrují na jednom čipu. Proto je výhodné je využívat pro potřeby číslicové regulace. Navíc v současnosti jsou velmi rozšířeny a cenově dostupné.



Obrázek 1.7 – Průmyslový regulátor KS98-1 [6]

Jak správně uvádí [2], u integrovaných A/D převodníků se často pracuje s napěťovými vstupními signály, jejichž největší nevýhodou je velká citlivost na rušení a nevhodnost přenosu na delší vzdálenosti, což může být v některých průmyslových aplikacích nezbytné. Navíc je třeba počítat s tím, že různé druhy snímačů mohou mít rozdílný rozsah výstupního napěťového signálu. Je zde sice možnost zvolit si hned z několika variant vstupních napěťových úrovní, ani to však nemusí být dostačující. K tomuto účelu bývají k regulátoru přiřazeny navíc ještě tzv. přizpůsobovací obvody. Mnohem výhodnější někdy bývá použití proudových vstupů nejčastěji s unifikovaným rozsahem 4 – 20 mA. Spodní úroveň 4 mA má výhodu zejména v případě, kdy dojde k poruše a proud klesne pod tuto hodnotu. Toto je pak automaticky vyhodnoceno regulátorem jako porucha snímače nebo přerušení vedení. Je možné se setkat i s dalšími vstupy. Příkladem toho mohou být frekvenční vstupy případně vstupy pro připojení termočlánků či odporových teplotních čidel a mnoho dalších.

Co se týče analogových výstupů, možnosti volby rozsahů jsou omezenější. Pro proudové je to nejčastěji 4 - 20 mA popř. 0 - 20 mA. U napěťových výstupů, které se ale moc nepoužívají, je to rozsah 0 - 5 V a 0 - 10 V. Regulátor obsahuje i binární výstupy, což jsou vlastně kontakty elektromechanických relé ve spínacím, rozpínacím nebo přepínacím provedení.



Obrázek 1.8 - Blokové schéma číslicového regulátoru [2]

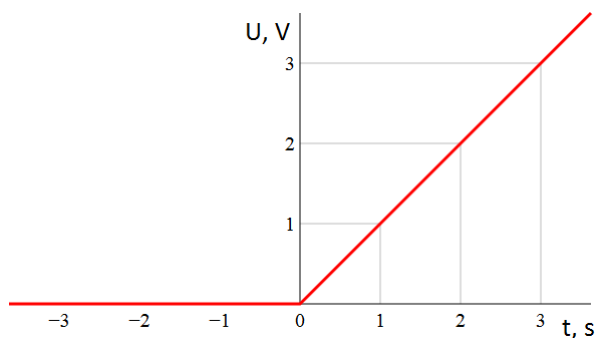
„Důležitou součástí regulátoru je také komunikační rozhraní, které jej umožňuje provozovat nikoliv jen jako izolované zařízení, ale také jako součást rozsáhlejšího distribuovaného řídicího systému. Konkrétní podoba a použitelnost tohoto rozhraní bývá ovšem velmi různá. Často vybavení regulátoru komunikačním rozhraním znamená pouze, že je na něm k dispozici konektor pro připojení rozhraní TIA/EIA 422 nebo 485, přičemž však protokol, podle něhož komunikace probíhá, není popsán. V tomto případě je komunikace omezena pouze na možnost spojení s jinými zařízeními popř. programovým vybavením téhož výrobce a její praktická použitelnost je proto jen omezená. Regulátory však také mohou být vybaveny i podstatně lépe a umožňovat připojení k nějaké standardizované průmyslové sběrnici (CAN, Profibus DP apod.) nebo být konfigurovatelné i pro připojení k několika různým typům těchto sběrnic“ [2].

1.5 Rampování

Regulátor může sice reagovat na vstupní signál ve formě skokové změny, nemusí to však být pouze tento tvar. Vstupem může být funkce rampy. Označuje se též jako náběhová funkce. Je to reálná funkce $f(x)$ definovaná vztahem

$$x \cdot H(x) = f(x) = \begin{cases} f(x) = 0, & \text{pro } x < 0 \\ f(x) = x, & \text{pro } x \geq 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

Derivací takovéto funkce je pak Heavisideova skoková funkce $H(x)$ známější jako jednotkový skok. Regulátory pak zpravidla mají několik různých náběhových a doběhových funkcí, ze kterých je možno volit tu nejvhodnější pro konkrétní aplikaci. V Simulinku je též možné realizovat náběhovou funkci blokem ramp, který se nachází v záložce sources.



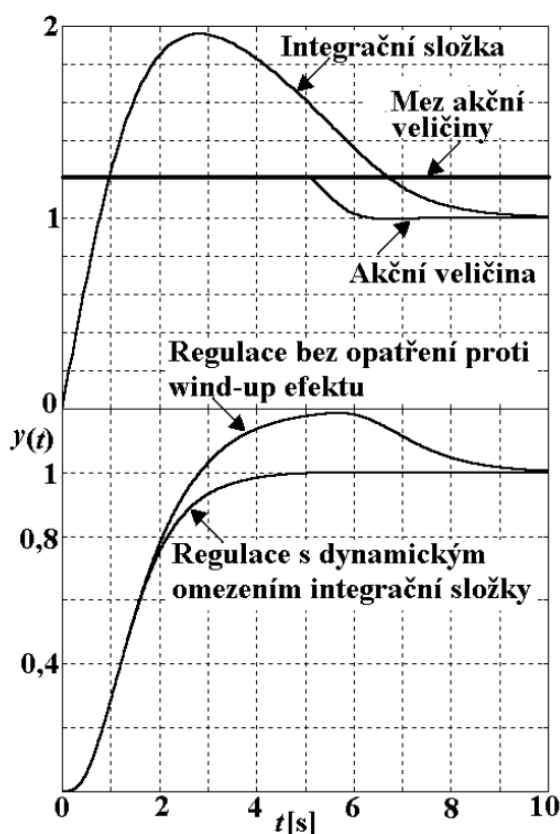
Obrázek 1.9 - Ilustrační graf rampové funkce [5]

1.6 Wind-up

Pokud jde o číslicové regulátory, je nutné se zabývat problematikou omezení akčního zásahu. Nikdy totiž není možné realizovat libovolně velkou hodnotu na výstupu regulátoru a ani použité akční členy toto nedovolují. I pokud se AČ přestaví z jedné krajní polohy do druhé, které jednoznačně vymezují pracovní rozsah, další ještě větší akční zásah už následně nemůže být realizován. Navíc použitý regulátor má k dispozici funkce pro hlídání maximální dovolené hodnoty proudu na výstupu. Toto omezení může velmi negativně ovlivňovat požadovanou kvalitu regulačního pochodu. Co se týče proporcionální a derivační složky regulátoru, tento limit pouze mírně prodlouží dobu regulace oproti řešení v teoretické rovině. Majoritní změny však způsobuje integrační část, proto se také wind-up někdy označuje jako unášení integrační složky. Problém je, že číslicově realizovaná integrační složka může růst téměř bez omezení. Záleží pouze na formě, ve které regulátor hodnotu zpracovává a na paměti která je dostupná. U analogových integračních členů byla maximální

hodnota limitována saturačním napětím OZ. Při velké regulační odchylce může akční veličina překročit mez dříve, než bude odchylka nulová. Vychází to z principu funkce samotného I regulátoru, jehož hlavním úkolem je absolutně odstranit odchylku od žádané hodnoty. Další narůstání integrační složky se pak na výstupu samozřejmě neprojeví. Až ve chvíli, kdy regulační odchylka změní své znaménko, dochází k odintegrování. I složka se zmenšuje, ale dokud neklesne pod realizovatelné maximum, výstup regulátoru je stále stejně velký, což ale následně způsobí velký překmit. To může způsobit dokonce i nestabilitu obvodu nebo v lepším případě bude regulační pochod kmitavý s dlouhou dobou ustálení. Unášení integrační složky je znázorněno na obrázku 1.10. V praxi se mohou grafy měnit. To závisí na volbě soustavy, zda je požadovaná hodnota blízko meze akční veličiny a mnoha dalších skutečnostech.

Každý regulátor by pak měl být proti wind-up nějakým způsobem vybaven. Existuje hned několik možností, jak k tomuto problému přistupovat. U polohového tvaru se jeví jako



Obrázek 1.10 - Wind-up efekt [2]

výsledků jako poslední zmíněná metoda, je nulování přírůstků převyšujících limit akční veličiny. Unášení integrační složky představuje velký problém zejména při kaskádním zapojení regulačních obvodů, kde není jeho eliminace zdaleka tak triviální.

nejjednodušší řešení omezení výstupu integračního členu tak, jak to umožňuje rozsah hodnot skutečného výstupu. Další z používaných metod se nazývá dynamické omezení integrační složky. Ta dosahuje mnohem uspokojivějších výsledků. Není třeba zaznamenávat všechny předchozí hodnoty. Integrační složka se dopočítává rekurzivně. Její růst se zastaví na předchozí hodnotě $I(k) \leftarrow I(k-1)$, je-li vypočtený akční zásah mimo meze realizovatelnosti. U přírůstkového tvaru, kde je přírůstek vyhodnocován vně regulátoru je ochrana proti wind-up efektu řešena zcela automaticky. Akční člen nevykoná větší zásah než je maximální. Jednou z dalších možností, která dosahuje podobných

1.7 Automatické nastavení parametrů

Existuje několik metod nastavování regulátoru, které jsou založeny na jednoduchých experimentech s regulovanou soustavou. V poslední době byla snaha tento proces nastavování a provádění jednoduchého experimentu automatizovat. Nyní jsou pro samočinné nastavení vybaveny téměř všechny průmyslové regulátory. Každý výrobce implementuje svůj algoritmus, přičemž regulátor musí být schopen nastavit parametry pro všechny regulační algoritmy, které je schopen realizovat. Samočinná konfigurace parametrů bývá v literatuře označována také jako self-tuning nebo též autotuning. Jedná se tedy o jednorázové nastavení při uvádění do provozu nebo následně na povel operátora. To je rozdíl oproti adaptivnímu řízení, kdy se regulátor přizpůsobuje průběžně všem změnám. Nelze však vymezit striktní hranice mezi adaptivními algoritmy a samooptimalizací. Nadále se budu zabývat algoritmy pro samočinně se nastavující PID regulátory.

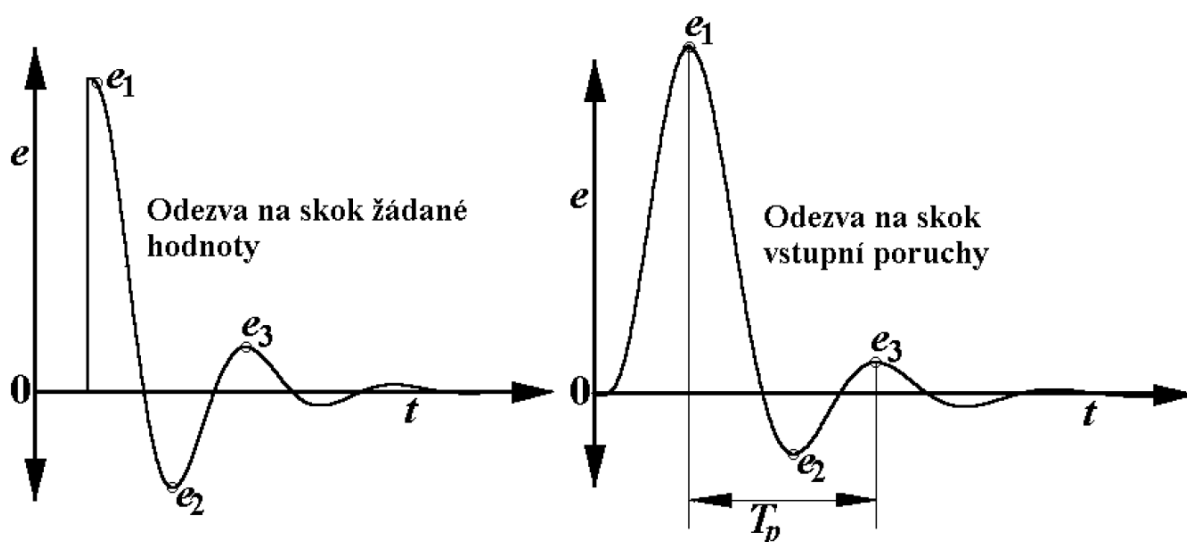
Obecně je možné tyto metody dělit podle toho, pracují-li v otevřené nebo uzavřené smyčce. V případě otevřené smyčky je proveden identifikační experiment přímo na regulované soustavě a zpětná vazba je rozpojena, z čehož vyplývá, že regulace neprobíhá. Cílem je vlastně zjištění přechodové charakteristiky soustavy. Aby toto bylo vůbec možné, nejdříve je třeba ustálit výstup soustavy v ručním režimu a udržovat jej na konstantní hodnotě v okolí předpokládaného pracovního bodu. Následně je proveden skok, jehož velikost buď zadává uživatel v procentech rozsahu nebo je vypočítána na základě vyhodnocení šumu. Výsledkem celého procesu pak může být zjištění doby náběhu i průtahu a různé typy modelů. Parametry regulátoru jsou pak stanoveny na základě tohoto vyhodnocení. Z přechodové charakteristiky je možné určit mj. i periodu vzorkování regulátoru. U uzavřené smyčky je regulační funkce do jisté míry zachována a tato metoda staví zejména na odezvách na změny, které nastávají za běžného provozu. Tím se myslí změny žádané hodnoty a odezvy na působící poruchy. Zpětná vazba je zachována a regulace probíhá.

1.7.1 Metoda EXACT (EXpert Adaptive Controller Tuning)

Jedná se o metodu, která se používá v některých regulátorech firmy Foxboro. Je příkladem samooptimalizace v uzavřené smyčce. Regulátor s přenosem v sériovém tvaru má implementován algoritmus, který začne reagovat v případě odchýlení regulační odchylky v ustáleném stavu (odchylka je nulová) o více než je dvojnásobek hladiny šumu. U vzniklých kmitů jsou detekovány první 3 vrcholy, které mohou být popsány periodou kmitů, tlumením a překmitem podle vztahu 1.13.

$$d = \left| \frac{e_3 - e_2}{e_1 - e_2} \right|, d \in \langle 0,1;1 \rangle; \quad z = \left| \frac{e_2}{e_1} \right|, z \in \langle 0;1 \rangle \quad (1.13)$$

Uživatel může nastavovat pouze hodnotu tlumení a překmitu, čímž ovlivňuje regulační pochod. Obě hodnoty se mohou pohybovat pouze v daných intervalech, přičemž doporučené hodnoty jsou $d_{\text{MAX}} = 0,5$ a $z_{\text{MAX}} = 0,3$. Algoritmus má určitá omezení způsobená vzájemnou závislostí obou parametrů, nicméně nastavuje překmit i tlumení tak, aby se jejich hodnoty co nejvíce blížili daným maximům. Vzhledem k periodě kmitů ještě nastavuje poměr časových konstant PID. Algoritmus používá pravidla heuristické povahy. Samotnému samooptimalizačnímu algoritmu je ještě předřazena tzv. přednastavovací fáze (Pre-Tuning). Ta slouží k vyhodnocení přechodové odezvy použité regulované soustavy, z níž je určeno předběžné nastavení regulátoru. To umožňuje zajistit stabilitu regulačního pochodu na jeho počátku.



Obrázek 1.11 - Kmity při použití metody EXACT [2]

1.7.2 Samočinné nastavení regulačních parametrů regulátoru KS98-1

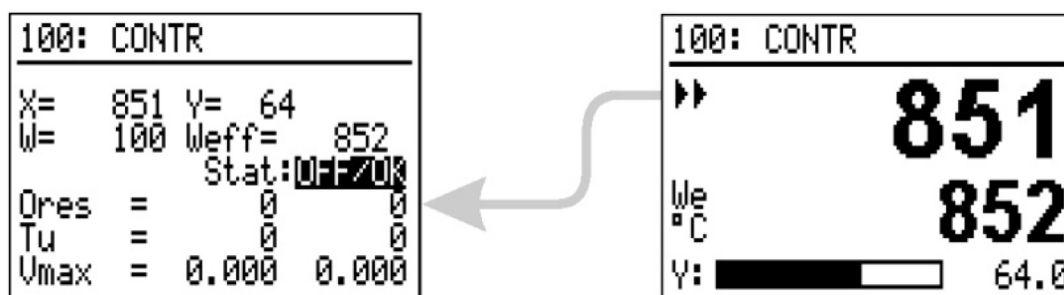
KS98-1 spadá do kategorie regulátorů, které používají k vyhledávání konstant regulátoru principu otevřené smyčky. K nalezení konstant soužijí samooptimalizační funkce regulátoru, která může být efektivně aplikována na statické soustavy bez dominantního dopravního zpoždění. Autotuning je možné provádět i u kaskádního zapojení. Po spuštění samooptimalizace se zjišťuje odezva regulované veličiny na skokovou změnu akčního zásahu. Z odezvy se určí doba průtahu a maximální rychlost změny. Dle těchto hodnot a vybraného regulačního algoritmu a se určí optimální regulační parametry pro rychlé vyrovnaní

na žádanou hodnotu bez překmitu . Nejprve je tedy nutné vybrat regulační algoritmus, což se provede nastavením parametrů T_n a T_u dle tabulky 1.1.

Tabulka 1.1 - Nastavení konstant regulátoru [3]

	T_n	T_u
P	0	0
PD	0	> 0
PI	> 0	0
PID	> 0	> 0

Parametry, které nebudou při optimalizaci uvažovány se nastaví na hodnotu 0. Další nutnou podmínkou je rezervace žádané hodnoty. Odstup regulované veličiny a žádané hodnoty musí být větší než 10 % ze zadaného rozsahu $W_0 - W_{100}$. Odstup může být zajištěn automaticky případně manuálně změnou žádané hodnoty či akčního zásahu. Při detekci ustáleného stavu (PIR) se automaticky sníží akční veličina.



Obrázek 1.12 - Přejít na stránku samooptimalizace [3]

Optimalizace se spouští z ovládací stránky na obrázku 1.12. Na tuto stránku je možné přejít z ovládací stránky bloku použitého regulátoru. V zadávacím poli je na počátku stav Stat: OFF/OK. Přepnutím na Stat: Start se spustí režim samooptimalizace. Během optimalizace může dojít k několika problémům. V takovém případě je na displeji vypsáno chybové hlášení, podle kterého je možné si dohledat v manuálu od výrobce, co daná chyba znamená, co ji způsobilo a jak je možné jí předcházet. Samooptimalizaci je samozřejmě možné kdykoliv ukončit stisknutím tlačítka pro přepnutí z automatického do ručního řízení na čelním panelu regulátoru. Další možností je na příslušné ovládací stránce nastavit Stat: Stop.

1.8 Optimalizace parametrů

K nalezení optimálních parametrů sdruženého PID regulátoru se v praxi používají nejružnější metody a pravidla. Některé jsou si velmi podobné a ve výsledku se jen mírně liší aplikovanými tabulkovými hodnotami. Zvolil jsem nastavování regulátoru podle Zieglera a Nicholse. Je to jedna z vůbec prvních metod k nastavení regulátoru. Ve své době byla průlomová, neboť dříve se při seřizování nepostupovalo systematicky a vše probíhalo víceméně na základě metody pokus omyl. Přestože se jedná o poměrně starý postup, který se však osvědčil, dodnes se používá. Tato pravidla se dále dělí na 2 skupiny podle toho, jakým způsobem se získají potřebné konstanty regulátoru.

1.8.1 Metoda kritického zesílení (kritické frekvence)

Také je někdy označována jako metoda ustálených kmitů. Směrodatné parametry, podle kterých se dopočítávají všechny 3 konstanty regulátoru, jsou tzv. kritická frekvence (popř. periody) a zesílení soustavy při této frekvenci. Ke zjištění hodnot obou parametrů je třeba vyřadit I a D složku. Pracuje se tedy s URO, který obsahuje jednoduchý P regulátor. Proporcionální zesílení se zvětšuje tak dlouho až je dosažena mez stability a nastanou netlumené kmity. Kritické zesílení je pak převrácenou hodnotou zesílení soustavy. Kritická frekvence je rovna frekvenci kmitů. Hodnoty konstant regulátoru se pak dopočítávají podle tabulky 1.2.

Tabulka 1.2 – Metoda ustálených kmitů [1]

Regulátor	r_0	T_I	T_D
P	$0,5 r_k$	-	-
PI	$0,45 r_k$	$0,85 T_k$	-
PID	$0,6 r_k$	$0,5 T_k$	$0,125 T_k$

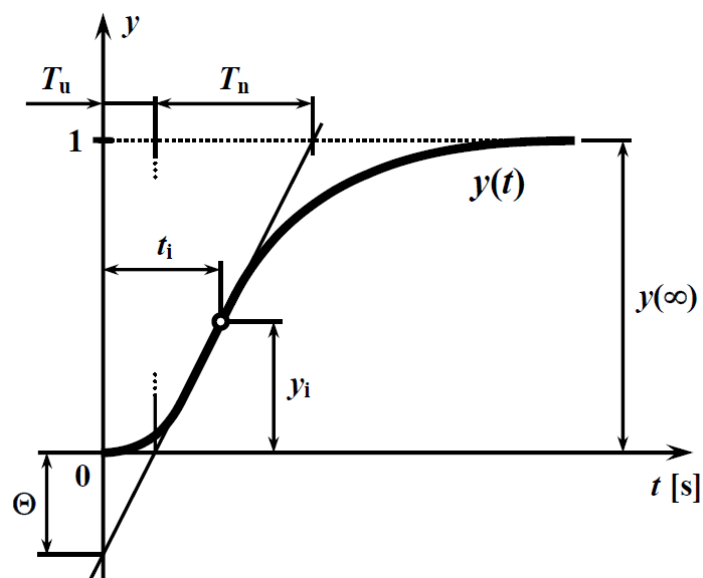
1.8.2 Metoda přechodové odezvy

Existence druhého postupu je částečně také podmíněna tím, že ne vždy je v praxi možné uvést systém na mez stability. Ať už je to z důvodu technologických či jiných provozních omezení. Pak je vhodné využít tuto metodu, jejímž základem je zjištění statického zesílení a tzv. normalizovaného zpoždění, které je definováno vztahem 1.14. Je tedy nezbytné u daného systému zjistit dobu náběhu a průtahu. Toho bylo docíleno v prostředí Matlab za použití skriptu `modifikovany_PID_ZN.m`, který byl převzat z [1]. Všechny potřebné parametry přechodových dějů jsou naznačeny na obrázku 1.13. Konstanty se stanoví dle tabulky 1.3.

$$\Theta = \frac{T_u}{T_n} \quad (1.14)$$

Tabulka 1.3 – Metoda přechodové odezvy [1]

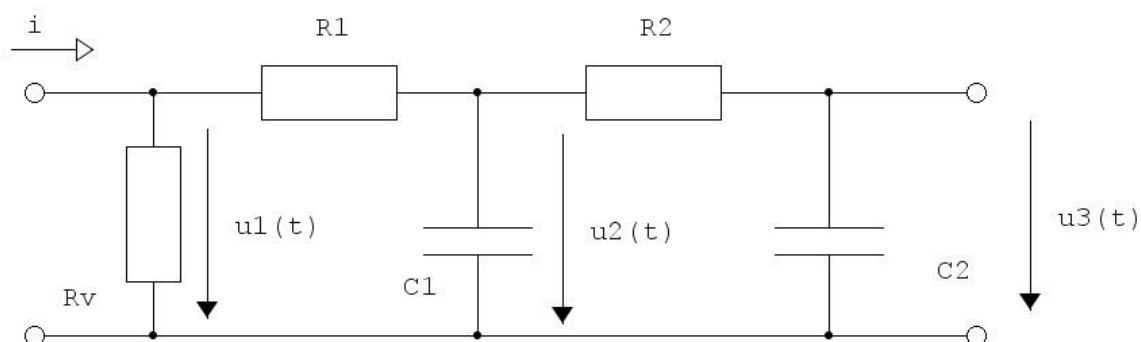
Regulátor	r_0	T_I	T_D
P	$1/(K \Theta)$	-	-
PI	$0,9/(K \Theta)$	$3 T_u$	-
PID	$1,2/(K \Theta)$	$2 T_u$	$0,5 T_u$



Obrázek 1.13 - Přechodový děj pro nekmitavé stat. systémy s vyznačenými parametry [1]

1.9 Volba soustavy

Pro potřeby ověření regulačního pochodu na reálném modelu jsem zvolil statickou soustavu 2. řádu bez dopravního zpoždění. Soustava je realizovaná pomocí dvou RC členů. Schéma zapojení je na obrázku 1.14.



Obrázek 1.14 - Reálný model soustavy

kde i je výstupní proud z regulátoru, který je u použitého proudového výstupu v rozsahu 0 - 20 mA. S využitím Ohmova zákona jsem zvolil rezistor $R_v = 500 \Omega$, pomocí kterého bude výstupní proud regulátoru převeden na potřebný napěťový rozsah 0 - 10 V. Napětí $u_1(t)$ je vstupem do soustavy, který se označuje jako akční veličina. Rezistory R_1 , R_2 a kondenzátory C_1 , C_2 slouží k nastavení požadovaných časových konstant soustavy. Napětí $u_3(t)$ je výstupem ze soustavy a nazývá se regulovaná veličina. Nejprve je třeba si vyjádřit rovnice pro proudy, které platí v jednotlivých smyčkách. Všechny veličiny jsou samozřejmě závislé na čase, což pro jednoduchost nebudu dále uvažovat. Pro první smyčku pak platí

$$i_{R_1} + i_{C_1} = 0 \quad (1.15)$$

$$\frac{u_1 - u_2}{R_1} - C_1 \cdot \frac{du_2}{dt} = 0$$

$$u_1 - u_2 - R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_2}{dt} = 0$$

$$R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_2}{dt} + u_2 = u_1$$

Nyní je potřeba upravit druhou rovnici, tak aby bylo možné z ní vyjádřit napětí u_2 a jeho derivaci. Analogicky tedy provedeme odvození i pro druhou smyčku

$$i_{R_2} + i_{C_2} = 0 \quad (1.16)$$

$$\frac{u_2 - u_3}{R_2} - C_2 \cdot \frac{du_3}{dt} = 0$$

$$u_2 - u_3 - R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{du_3}{dt} = 0$$

$$R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{du_3}{dt} + u_3 = u_2$$

Rovnice se musí ještě derivovat, aby bylo možné následně dosadit do upravené rovnice první smyčky za u_2 i $\frac{du_2}{dt}$. Po derivaci je tvar rovnice následující

$$R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u_3}{dt^2} + \frac{du_3}{dt} = \frac{du_2}{dt}$$

Po dosazení už v rovnici bude vystupovat pouze akční veličina (napětí u_1) a regulovaná veličina (napětí u_3).

$$R_1 \cdot C_1 \cdot \left(R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u_3}{dt^2} + \frac{du_3}{dt} \right) + u_2 = u_1$$

$$R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u_3}{dt^2} + R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_3}{dt} + u_2 = u_1$$

$$R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u_3}{dt^2} + R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_3}{dt} + R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{du_3}{dt} + u_3 = u_1$$

$$R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{d^2 u_3}{dt^2} + (R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot \frac{du_3}{dt} + u_3 = u_1$$

Po úpravách je diferenciální rovnice popisující tento spojitý statický systém druhého řádu v potřebném tvaru. Následně se musí převést pomocí slovníku Laplaceovy transformace do operátorového tvaru, ze kterého vyjádříme operátorový přenos dle jeho definice.

$$R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot p^2 \cdot U_3(p) + (R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot p \cdot U_3(p) + U_3(p) = U_1(p)$$

$$U_3(p) \cdot (R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot p^2 + (R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot p + 1) = U_1(p)$$

$$G(p) = \frac{U_3(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot p^2 + (R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_2) \cdot p + 1}$$

Soustava 2. řádu má tedy 2 časové konstanty

$$\begin{aligned} T_1 &= R_1 \cdot C_1 \\ T_2 &= R_2 \cdot C_2 \end{aligned} \tag{1.17}$$

Zavedeme-li tuto substituci, dostáváme pak obecný tvar přenosu statického systému 2. řádu, což potvrzuje správnost celého odvození.

$$G(p) = \frac{1}{T_1 \cdot T_2 \cdot p^2 + (T_1 + T_2) \cdot p + 1} \tag{1.18}$$

K získání konkrétního přenosu zvolené soustavy už stačí jen dosadit hodnoty použitých pasivních součástek. V mém případě

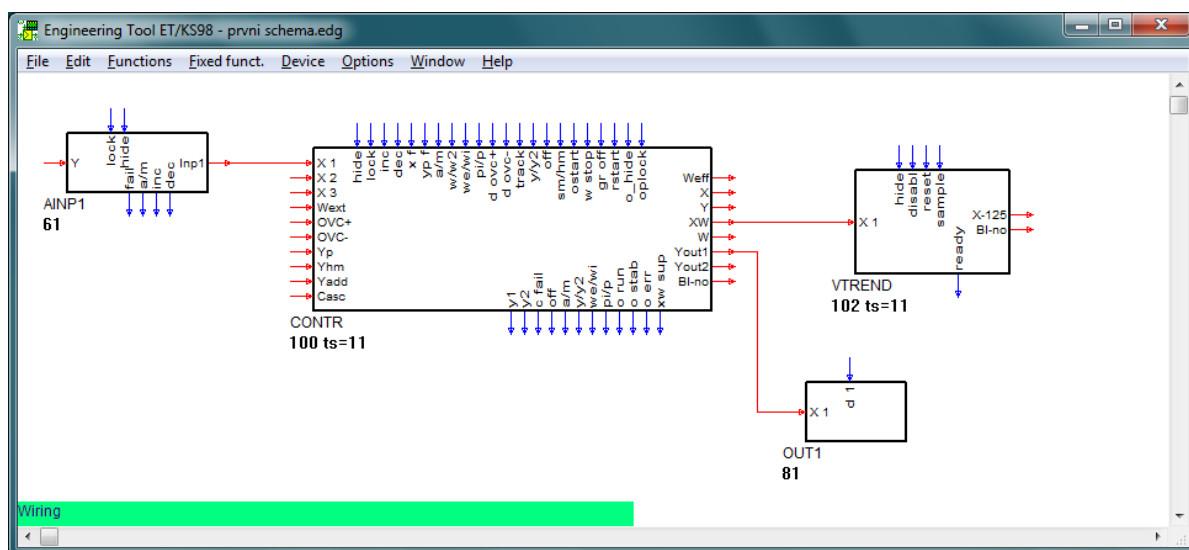
$$R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega \quad R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega \quad C_1 = C_2 = 1000 \text{ }\mu\text{F}$$

$$G(p) = \frac{1}{7,26 \cdot p^2 + 5,5 \cdot p + 1}$$

2 Praktická část

2.1 Inženýrský software ET/KS98

Jedná se o grafický editor funkčních bloků. Tento program slouží k návrhu algoritmu, podle kterého se následně bude odvíjet činnost regulátoru popř. simulátoru. Je dodáván přímo s regulátorem. Software je podporován výhradně systémem Windows, nicméně se mi podařilo spustit omezenou verzi přes emulátor i na systému Ubuntu 12.04 LTS bez jakýchkoliv větších problémů. Ve výchozím stavu je program v němčině, pro přepnutí jazyka stačí v menu Optionen zvolit možnost Sprache.



Obrázek 2.1 - Prostředí ET/KS98

Nyní budou popsány hlavní zásady pro práci v tomto prostředí. Na pracovní plochu editoru se umísťují funkční bloky. Ty se nachází v nabídkách Functions a Fixed functions. V menu Fixed functions jsou bloky, které mají pevně přiřazené číslo a lze je ve funkční struktuře použít pouze jednou. Naopak ve Functions se nachází bloky, kterých je možné použít vícekrát. Jsou zde nejrozumnější logické a matematické funkce, alarmy a omezení, grafy, regulátory a bloky pro komunikaci přes sběrnici CAN. Daný blok se vybere z příslušné

nabídky, což je indikováno v levém dolním rohu okna. Na pracovní plochu se pak vybraný blok umístí stisknutím pravého tlačítka myši. Opětovné stisknutí pravého tlačítka, tentokrát již na vložený blok, slouží k vyvolání okna s konfigurací pro použitý blok. Zde může uživatel zadat hodnoty parametrů u jednotlivých bloků. Tlačítko Test slouží k ověření, zda jsou všechny nastavené hodnoty ve správném rozsahu. Pokud tomu tak není, bude vypsána chybová hláška. Propojení jednotlivých bloků se děje kliknutím na požadovaný výstup a tažením myši ke vstupu. Analogové vstupy jsou označeny červenou barvou, binární modrou. Aby to bylo možné, je nejdříve zapotřebí se přepnout do tzv. Wiring režimu. Ten se aktivuje dvojklikem kdekoli na pracovní ploše editoru. Pokud chceme celou funkční strukturu blíže prozkoumat, je zde ještě možnost aktivace průzkumného Survey módu. Ten se spustí stiskem pravého tl. myši. Celé zapojení je zvětšeno a je tak možné zkontrolovat, jestli je vše zapojeno, jak má být. Survey režim se opouští stiskem pravého tl. „Drátovací“ režim se vypíná opětovným dvojklikem.

Bloky se dají přesouvat podržením levého tlačítka a tažením myši po pracovní ploše. S bloky se automaticky posouvají i již existující propojení. Typ regulátoru se definuje v Device - Device Selection. Nastavení se provádí stejně jako v simulátoru. Zvolením Device - Device parameter se otevře okno Instrument settings. Zde je možná podrobnější konfigurace přístroje. Osobně jsem použil jen rolovací nabídku Language, kde jsem zvolil english. To znamená, že po nahrání blokového schématu do regulátoru, bude úvodní obrazovka a všechny další ovládací stránky v angličtině. Stiskem klávesy F2 je možné zadat heslo, které pak bude vyžadováno při přenosu blokové struktury nebo např. při změně parametrů regulátoru. Podle [3] jsou k dispozici 4 režimy, které popisuje tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 - Přehled úrovní zabezpečení [3]

Password mode	Structure	Configuration	Parameter	Process data
Čtení a zápis procesních dat	ano	ano	ano	nejde
Čtení a zápis trendů a I/O	ano	ano	ano	nejde
Čtení a zápis parametrů a textů	ano	ano	nejde	nejde
Čtení a zápis konfigurace	ano	nejde	nejde	nejde
Čtení a zápis struktury	nejde	nejde	nejde	nejde

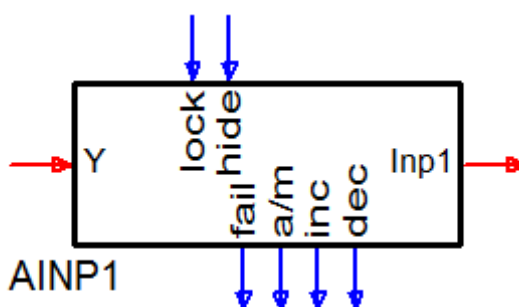
Další důležitá nastavení se provádějí v menu Options. Položka Communication otvírá okno s konfigurací. Hned na prvním řádku se nastavuje přes jaké rozhraní počítače bude inženýrský software komunikovat s regulátorem. V případě zvolení možnosti SIM/KS98 bude program komunikovat se simulátorem. Pokud je v projektu správně nastavený blok L1READ,

kliknutím na položku TREND se zobrazí hodnoty veličin přivedených na vstupy bloku. Je zde i možnost vizualizace ve formě grafu, který se dá velmi snadno exportovat pro další zpracování. Graf se vykresluje stiskem tlačítka START. Stiskem F3 je možné ověřit správnost zapojení. Případné chyby se zobrazí vybráním položky Error v nabídce Window. V téže nabídce se zatržením možnosti Connecting diagram zobrazí skutečné zapojení (svorkovnice) na zadní straně regulátoru pro danou funkční strukturu v programu. Nabídka File je stejná jako u dalších běžně používaných aplikací v prostředí Windows. Navíc se zde však objevuje velmi důležitá položka Project PC → KS98. Pokud je zvolena možnost Engineering, přenesou se kompletní funkční bloková struktura do regulátoru resp. simulátoru. Podobně editor umožňuje přehrát bloky zpět z regulátoru do ET/KS98. K tomu poslouží naopak možnost Project PC ← KS98. Vybráním Project info lze vepsat informace o aktuálním projektu včetně jména tvůrce a data vytvoření. Všechny tyto informace se potom přenesou do regulátoru společně s funkčními bloky. V poslední řadě je možné zobrazit přehled o tom kolik bylo použito bloků, jaké množství paměti bude vyhrazeno pro dané zapojení apod. To se provede v menu Help vybráním položky Statistic.

2.2 Funkční bloky

2.2.1 AINP1

Jedná se o první analogový vstup regulátoru, který (jak je uvedeno v manuálu) může sloužit k přímému připojení termočlánku, odporového teploměru, odporového vysílače nebo standardních signálů. Je možné jej vybrat v menu Fixed functions – Analog inputs.



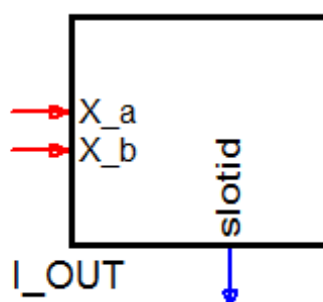
Obrázek 2.2 - Funkční blok AINP

Má své pevně přiřazené číslo 61. Umožňuje nakonfigurovat další parametry vstupu Inp1 jako je např. typ vstupního signálu. Blok má neměnný vzorkovací interval 200 ms. Inp1 představuje regulovanou veličinu y . Funkční blok AINP1 má v sobě zahrnutou celou řadu vnitřních bloků pro zpracování měřené hodnoty. Je možné využít hlídání vstupního obvodu,

úpravu měřítka (převod na fyzikální hodnotu), pomocná měření, filtr, vzorkovací interval, chybu linearizace, teplotní kompenzaci a korekci měřené hodnoty.

2.2.2 I_OUT

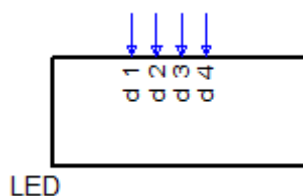
Tento funkční blok představuje 2-kanálový analogový proudový výstup. Slouží k vyvedení akčního zásahu u z regulátoru ve formě proudu. Má pevně přiřazené číslo 67. Blok je možné nalézt v nabídce Fixed functions – Modulare I/O 2. Lze u něj nastavit proudový rozsah 0 - 20 mA, 4 - 20 mA a ± 20 mA. Pro potřeby snadného převedení na 0 - 10 V využívám rozsah 0 - 20 mA.



Obrázek 2.3 - Funkční blok I_OUT

2.2.3 LED

Funkční blok s fixním číslem 96 je zařazen mezi přídavné funkce. Je umístěn v nabídce Fixed functions – Supplementary functions 1. Na čelním panelu regulátoru jsou umístěny celkem 4 LED diody, které mohou sloužit k indikaci překročení žádané hodnoty, mezních stavů, poruchy a mnoha dalších stavů. Blok je zpracováván každých 100 ms. Dioda se rozsvítí přivedením hodnoty 1 na příslušný binární vstup. Je možné ještě nastavit parametr Inv, který slouží k invertování logiky, tzn. při log. 1 nebude dioda svítit.

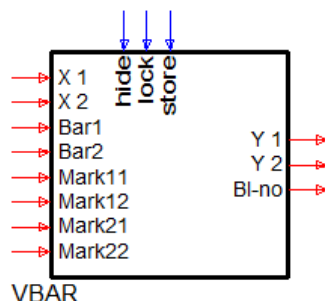


Obrázek 2.4 - Funkční blok LED

2.2.4 VBAR

Pokud je zapotřebí grafického znázornění průběhu některé z veličin včetně zobrazení její aktuální hodnoty, je vhodné použít funkční blok s názvem VBAR. Nachází se v záložce

Functions – Display and operation. Číslo bloku již není fixní jako u předchozích funkčních bloků. Slouží k zobrazení 2 analogových veličin přivedených na vstupy bloku ve formě sloupcového grafu.

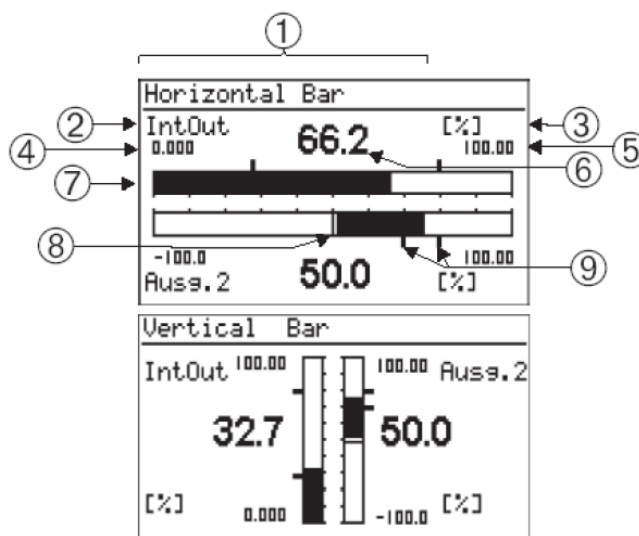


Obrázek 2.5 - Funkční blok VBAR

Je možné nakonfigurovat zda bude graf vertikální či horizontální, číselné hodnoty mohou zůstat skryty, nechceme-li je zobrazovat. Dále je možné nastavit zda bude bargraf jednosměrný či obousměrný. Tlačítka lze zadávat číselné hodnoty, i to však umožňuje VBAR zablokovat. S každou náběžnou hranou na vstupu store se ukládají hodnoty z analogových vstupů do paměti EEPROM. Je třeba dbát na to, aby nebyla vyčerpána kapacita paměti zbytečnými zápisy. V nastavení bloku je možné změnit popisky grafů, tj. veličiny a jednotky. Blok umožňuje kdekoliv v rozsahu zvolené stupnice umístit tzv. značky například pro snadnější orientaci. Na ovládací stránku bloku, která je na obrázku 2.6, se můžete snadno přepnout z nabídky ovládacích stránek regulátoru.

Na displeji se zobrazuje:

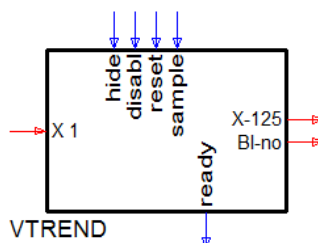
- ① Název ovládací stránky (16 znaků)
- ② Název analogové hodnoty x1
- ③ Rozměr hodnoty x1 (prvních šest znaků z 'Unit1')
- ④ Počátek rozsahu hodnoty x1
- ⑤ Konec rozsahu hodnoty x1
- ⑥ Procesní hodnota zobrazení / zadávání
- ⑦ Sloupcový graf hodnoty x1
- ⑧ Prostředek grafu x2 (počáteční bod)
- ⑨ Značky grafu hodnoty x2



Obrázek 2.6 - Ovládací stránka bloku VBAR [3]

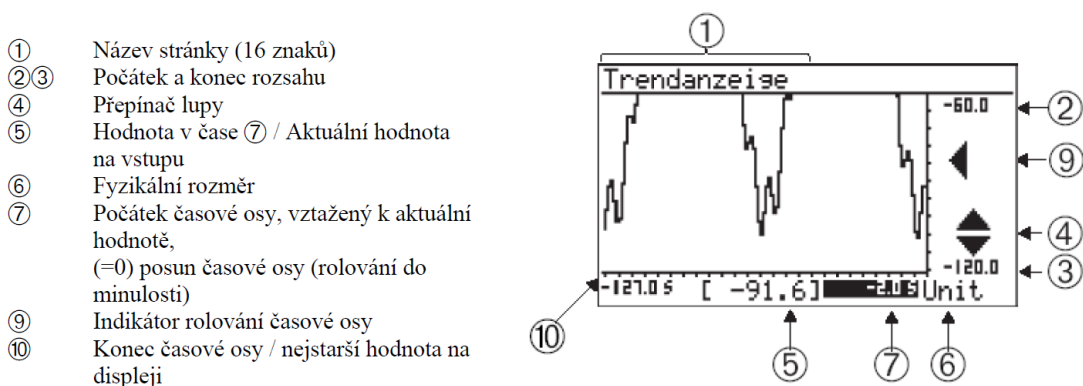
2.2.5 VTREND

Druhá varianta grafického zobrazení průběhu veličin, tentokrát ve formě klasického grafu, je použití funkčního bloku VTREND. Schématická značka z vývojového prostředí se nachází na obrázku 2.7. Stejně jako VBAR se nachází v nabídce Functions – Display and operation a nemá taktéž pevně přiřazené číslo bloku.



Obrázek 2.7 - Funkční blok VTREND

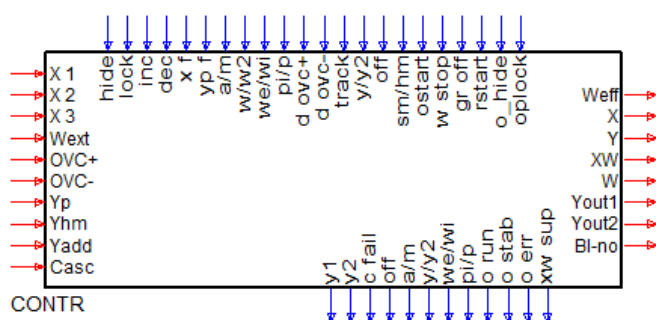
Funkce bloku spočívá v načítání hodnot z analogového vstupu do posuvného registru, kam je možné uložit 125 hodnot. Při zaplnění registru se přepisuje nejstarší uložená hodnota. Zaplnění registru je reprezentováno logickou hodnotou 1 na binárním výstupu ready. Hodnoty jsou vykreslovány na displeji s rozlišením osy X 125 bodů a 60 bodů u osy Y. Křivka je vykreslována na příslušné ovládací stránce. Záznam dat probíhá synchronně, přičemž nejmenší perioda vzorkování je 100 ms. Pro asynchronní vzorkování je třeba použít vstup sample. Na stránce, kde se vykresluje křivka, je možné využívat funkce lupy. Ty slouží k tomu, aby bylo možné se zaměřit na konkrétní menší rozsah osy Y. Průběh pak může být zřetelnější. Veškerá měněná nastavení na stránce trendu se po jejím opuštění zachovávají. Výhodou je, že při ztrátě napájení zůstávají data v paměti. U bloku lze též nastavit vzorkovací interval, počet desetinných míst u zobrazovaných hodnot a měřítko a popisky os. Změny popisků os nemají žádný vliv na trendová data. Při řazení bloků VTREND do kaskády je pro správnou funkčnost nutné dodržovat stejné rozsahy a vzorkovací frekvence.



Obrázek 2.8 - Ovládací stránka bloku VTREND [3]

2.2.6 CONTR

Pro potřeby regulace je nezbytný blok regulátoru. Prostředí ET/KS98 umožňuje zvolit jednu ze 3 možností. K dispozici jsou bloky CONTR, CONTR+ a PIDMA. CONTR je regulátor s jednou sadou regulačních parametrů, což je v podstatě jediný rozdíl oproti CONTR+, který má celkem 6 sad parametrů, mezi nimiž je možné libovolně přepínat. Oba zmíněné mají sériovou strukturu. Nemá pevné blokové číslo. Je umístěn v nabídce Functions – Controllers a znázorněn na obrázku 2.9.



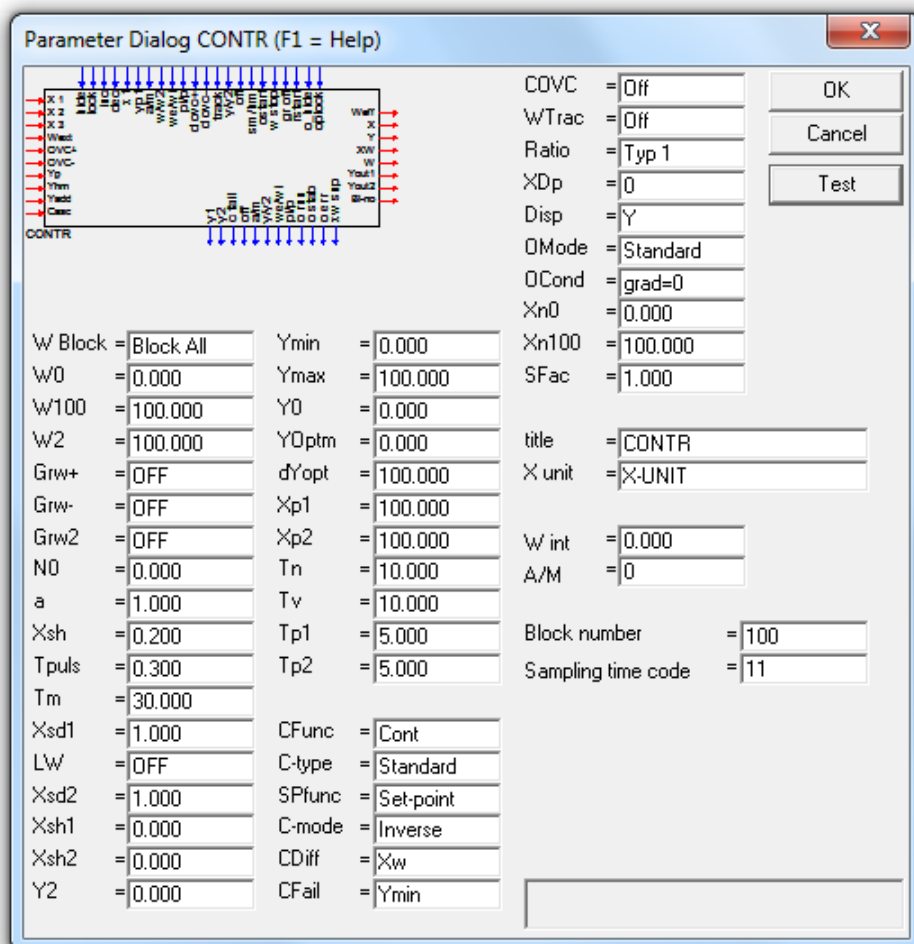
Obrázek 2.9 - Funkční blok CONTR

Podle [3] tento blok může realizovat následující regulační funkce:

- Reléový regulátor s jedním výstupem
- Reléový regulátor s dvěma výstupy
- Dvoustavový regulátor
- 3-stavový regulátor (topení i chlazení spínací)
- 3-stavový regulátor (top. spojitý/chlaz. spínací)
- 3-stavový regulátor (top. spínací/chlaz. spojitý)
- Regulátor trojúhelník-hvězda-vypnuto
- 3-stavový krokový regulátor
- 3-stavový krokový regulátor s ind. polohy Yp
- Spojitý regulátor
- Spojitý regulátor s rozděleným rozsahem
- Spojitý regulátor s indikací polohy Yp

K regulaci zvolené fyzické soustavy jsem zvolil spojitý regulátor. V simulátoru jsem pro ilustraci zkoušel dvoustavový regulátor. Blok je po importování nastaven ve výchozím

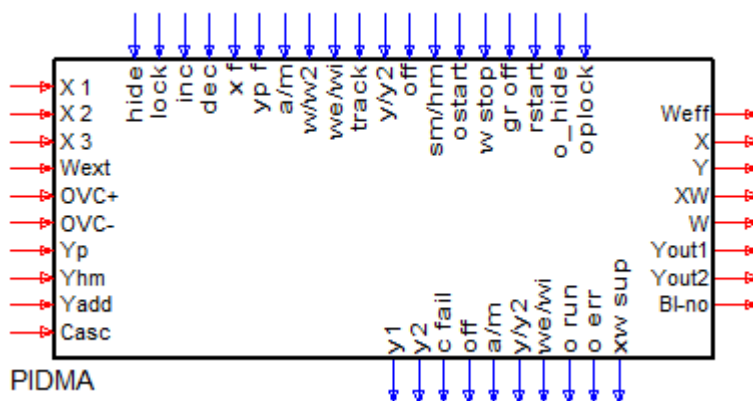
stavu jako spojitý regulátor. Akční veličina je vyvedena na analogový výstup Yout1 a jako analogový vstup pro regulovanou veličinu, z níž si regulátor dopočítá odchylku, byl použit vstup X1. Všechna nastavení se provádí v okně Parameter Dialog, které se vyvolá kliknutím pravým tlačítkem myši na blok regulátoru. Je možné zde nastavit tzv. neutrální pásmo, které je dáno intervalem od Xsh1 do Xsh2. Tyto hodnoty lze nastavovat samostatně a nezávisle na sobě. Nachází-li se regulovaná veličina v této zóně, regulační odchylka je vynulována. Samostatný proporcionální regulátor by akční veličinu v tomto rozsahu již nijak neměnil. Integrační a derivační složka sdružených regulátorů však může reagovat při změně žádané hodnoty nebo vzniku poruch. To vše samozřejmě závisí na příslušných časových konstantách. Při překročení neutrální hranice se pak opět zapojuje do formování akčního zásahu i proporcionální složka. Položkou C-mode se nastaví zda jde o přímý regulátor nebo inverzní.



Obrázek 2.10 - Okno pro nastavení parametrů regulátoru

2.2.7 PIDMA

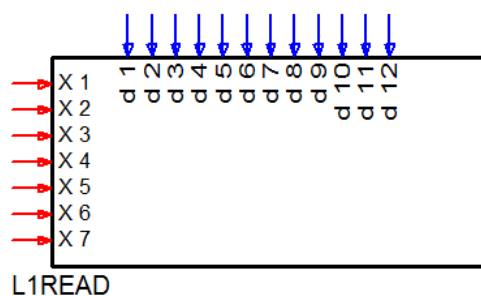
Tento funkční blok sice nebyl v práci prakticky použit, považuji však za nezbytné zmínit několik zásadních rozdílů oproti blokům CONTR a CONTR+. Hlavním rozdílem je paralelní struktura. Parametry jsou zadávány v neinteraktivním tvaru. Je vhodný pro obtížně regulovatelné procesy, kam se řadí regulace systémů s dominantním dopravním zpožděním a systémů vyšších řádů. Regulační blok má integrovaný expertní samooptimalizační algoritmus PMA Tune a také některé funkce navíc. Mimo jiné to je přepínání žádaných hodnot, regulace s omezením akční veličiny a gradient žádané hodnoty. Nabízí možnost regulace s dvěma stupni volnosti. Má nastavitelné zesílení derivační složky, které se pohybuje v rozmezí hodnot 2 - 10. Při volbě algoritmu pro třístavovou regulaci či spojitého regulátoru s rozděleným rozsahem se nerozlišují parametry pro topení a chlazení. Pomocí bloku nelze realizovat reléový regulátor. Navíc je zde možné blíže specifikovat použitou soustavu. Zda se jedná o statický či astatický systém. Místo pásma proporcionality se zde zadává jen zesílení proporcionální složky. Ostatní funkce zůstávají stejné jako u regulátoru se sériovou strukturou.



Obrázek 2.11 – Funkční blok PIDMA

2.2.8 L1READ

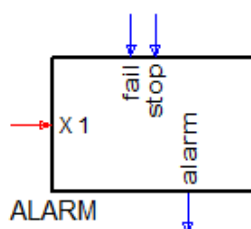
Jedná se o blok sloužící ke čtení dat. Pro zápis existuje ještě L1WRIT, který ale není v práci použit. Důležité je však zmínit, že celkem je možné použít dohromady maximálně 20 bloků typu L1READ nebo L1WRIT v libovolném poměru. Blokům je totiž možné přidělit libovolné číslo z rozmezí 1 - 20. Má 7 analogových vstupů a 12 binárních. Přes komunikační linku je možné údaje číst jednotlivě nebo blokově.



Obrázek 2.12 - Funkční blok L1READ

2.2.9 ALARM

Jak již název napovídá tento blok slouží ke zpracování alarmu. Je-li zapotřebí např. vymezit v jakém rozsahu se má pohybovat regulovaná veličina a upozornit na hodnoty mimo zadané meze, pak je nejlepší použít funkční blok ALARM, který nemá své pevně přiřazené číslo. Je tedy možné jej vybrat z nabídky Functions - Limits and limit values 2. Funkční blok je na obrázku 2.13. Na analogový vstup x1 je přiveden signál, který se bude testovat na překročení mezí. Binárním vstupem Stop je pak možné zablokovat alarm v nežádoucím případě. Překročení limitu se vyhodnocuje vzhledem k parametrům, které zadáváme v konfiguračním menu bloku. Jedná se o hodnotu dolní meze LimL a horní meze LimH. Dále je zde ještě možnost volby parametru Fcn, který ovlivňuje, jaké vstupy budou testovány. Alarm je pak zpracován na binární výstup alarm, kde hodnota 0 je stav bez poruchy a 1 signalizuje překročení mezí. Výstup se může propojit s blokem LED a při vyhodnocení alarmu se pak na čelním panelu regulátoru rozsvítí dioda.

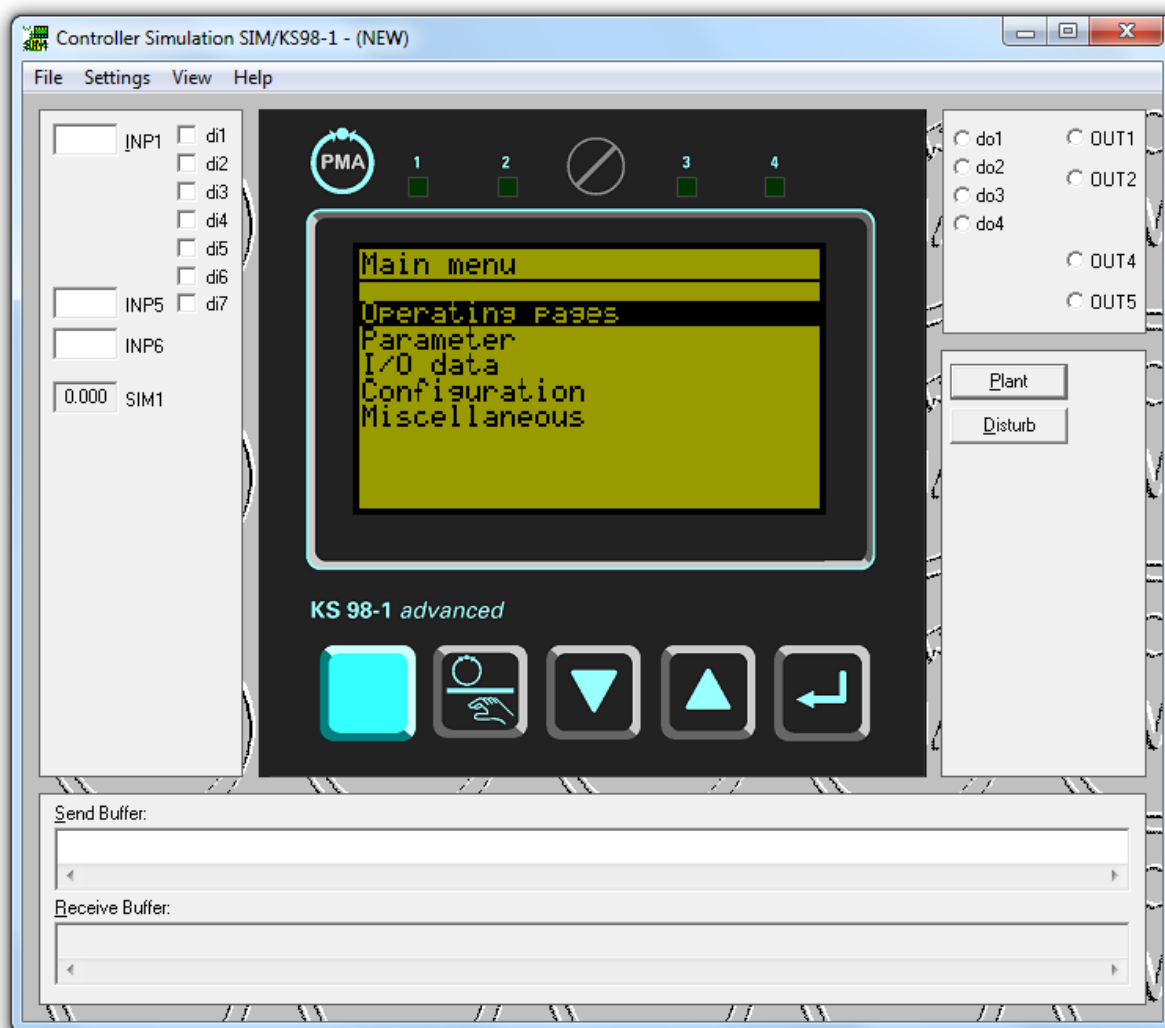


Obrázek 2.13 - Funkční blok ALARM

2.3 Simulační software SIM/KS98

Simulátor vznikl zejména z důvodu testování a dalšího ladění námi zkonstruovaného algoritmu v prostředí ET/KS98. Pomocí funkčních bloků se vytvoří vnitřní struktura

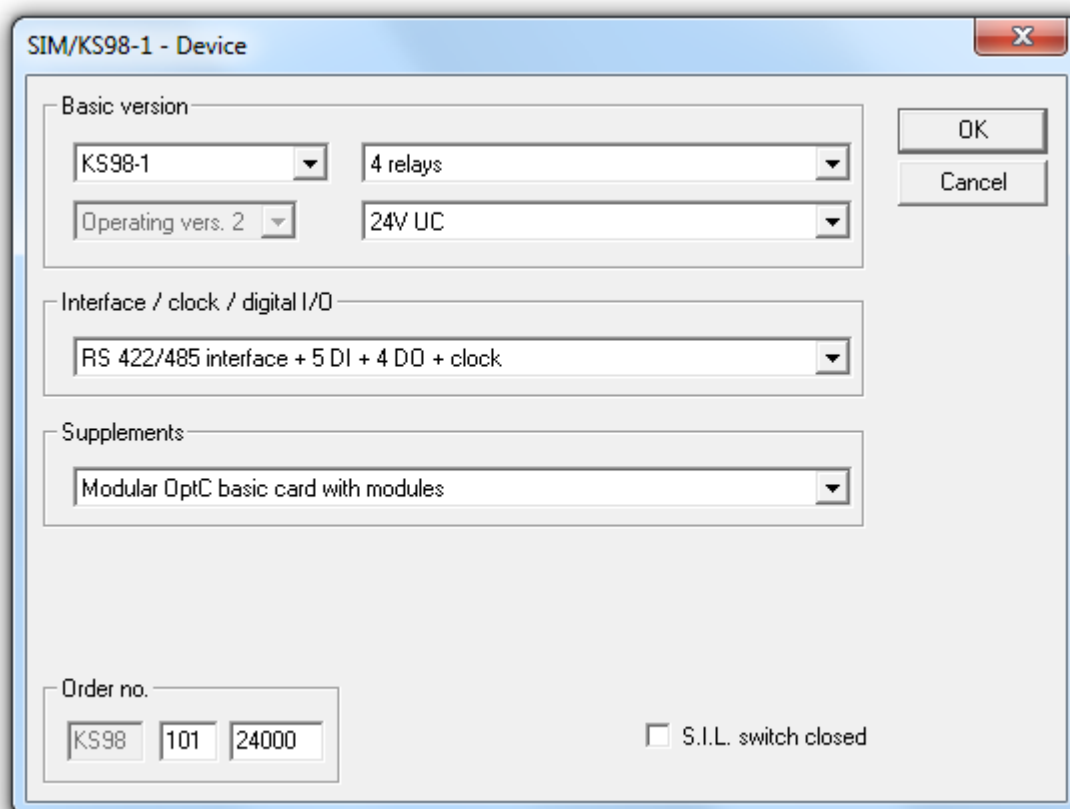
regulátoru a ta se přenese do simulátoru. Regulátor nemusí být k počítači vůbec připojen. Vše probíhá naprosto stejně jako by byl použit skutečný regulátor.



Obrázek 2.14 - Simulátor SIM/KS98

Po spuštění SIM/KS98 se zobrazí okno s čelním panelem regulátoru. Po instalaci je jako výchozí jazyk nastavena němčina. Volba jazyků se provádí v menu Einstellungen – Sprachauswahl, kde je možno vybrat si angličtinu, francouzštinu nebo němčinu. Další konfigurace bude popsána pro anglickou verzi programu. K dispozici jsou nabídky File, Settings, View a Help. S menu File se pracuje stejně jako ve všech standardních aplikacích v prostředí Windows. Je-li třeba otevřít projekt uložený na disku nebo vytvořit nový, pak se použije právě první ze všech zmíněných. Nejdůležitější z hlediska konfigurace simulátoru je nabídka Settings. Zde se nachází možnost Load last file on start. Je-li zatržena, umožní simulátoru po spuštění automaticky načíst poslední projekt z disku. Pro správnou funkčnost je

třeba nejprve nastavit, o jakou verzi regulátoru se vlastně jedná, což se provede zvolením možnosti Device. KS98-1 se totiž dodává v několika různých provedeních. Liší se zejména použitými vstupy, napájením a výbavou komunikační desky B a rozšiřující desky C. To vše je individuální podle toho pro jakou aplikaci bude regulátor použit. Na to vývojáři softwaru samozřejmě mysleli. V okně Device se vybírá konfigurace odpovídající použitému zařízení a v dolním levém rohu se průběžně s každou změnou mění verze přístroje, takže je možné si ihned ověřit, zda jsou zadané údaje správné.



Obrázek 2.15 - Nastavení verze přístroje v simulátoru

Ve výběrovém menu Settings se ještě nachází položka Turbo. Ta slouží ke spuštění tzv. turbo režimu, který zkracuje dobu při přenesení struktury z počítače do regulátoru (v tomto případě do simulátoru). Jinak jej lze vyvolat klávesovou zkratkou CTRL+T. Mnohem zajímavější je položka Trend, která vyvolá okno, ve kterém se zobrazují zvolené průběhy. Ty je možné exportovat do formátu, jenž se dá opravdu snadno zpracovat v některém z tabulkových editorů popř. v Matlabu. V menu View se nastavuje velikost okna zvolením možnosti Zoom. Pokud je použita komunikace přes sběrnici, zobrazení panelu pro komunikaci se provede zaškrtnutím Communication. Vybráním položky Input/Output se

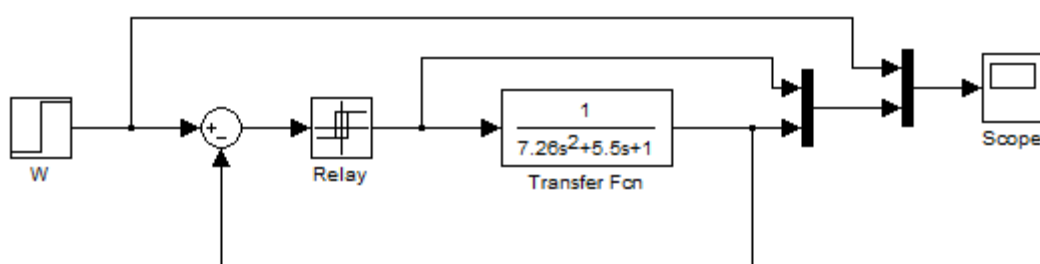
zobrazí vstupy regulátoru na levé straně okna a výstupy na straně pravé. Stisknutím tlačítka Plant vpravo se vyvolá okno s názvem Process parameters, které uživateli umožňuje zadat soustavu ve formě jejího přenosu. Poté můžeme ověřit správnost námi vytvořeného algoritmu v uzavřené smyčce. Nabídka Help pak slouží k nastavení licence a zobrazení informací o verzi simulátoru.

2.4 Regulační algoritmy

Tento multifunkční regulátor umožňuje realizovat celou řadu regulačních algoritmů od reléových regulátorů přes třístavovou regulaci až po klasickou spojitou. Výčet všech funkcí je zmíněn u popisu funkčního bloku CONTR v kapitole 2.2.6. Pro účely práce jsem vybral následující 2 algoritmy.

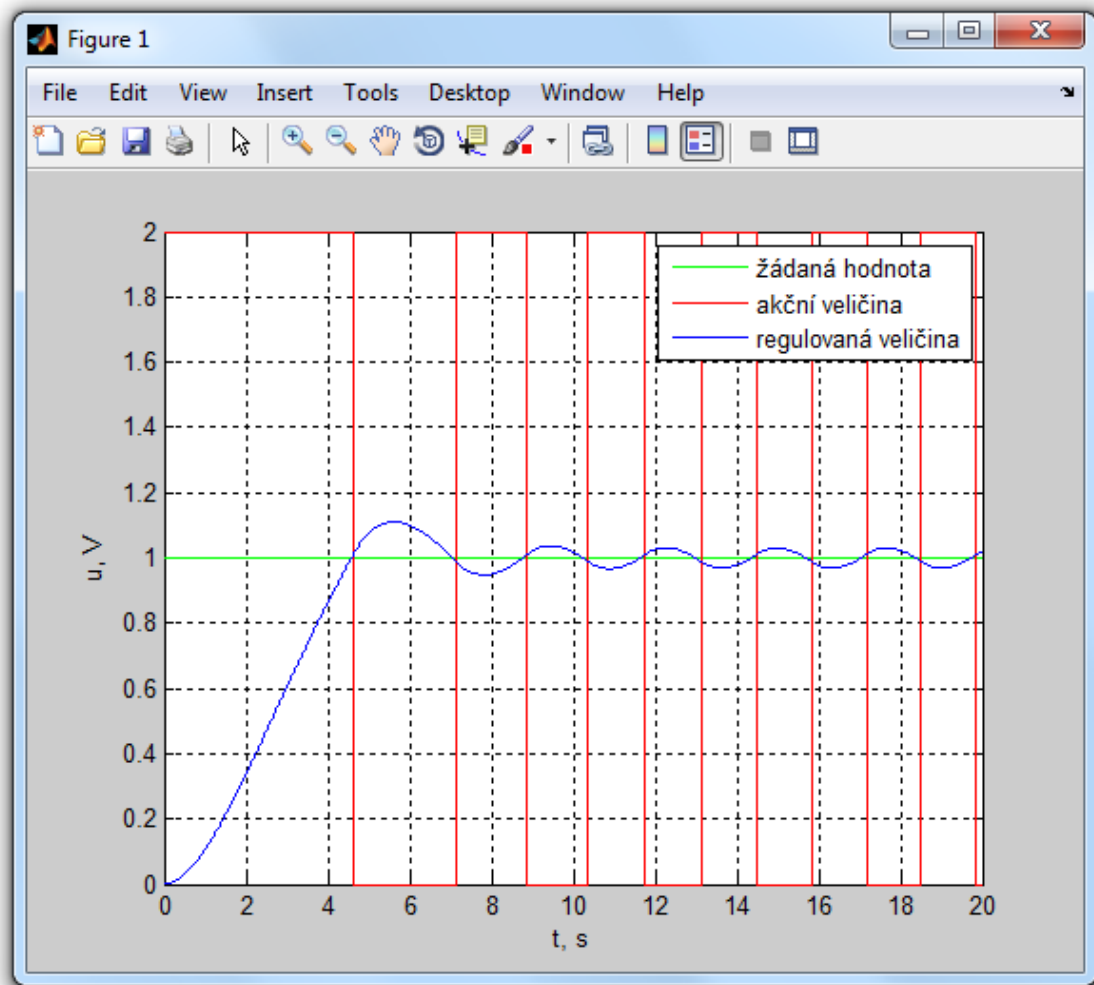
2.4.1 Reléový regulátor s jedním výstupem

Obecně se používá k regulaci procesů s malou rychlostí změny a krátkou dobou průtahu. Pro aplikaci algoritmu se v konfiguračním okně bloku regulátoru nastaví parametr CFunc tak, že je z rolovací nabídky vybrána položka Signal 1. K nastavení tzv. spínací difference slouží parametr Xsd1. Žádaná hodnota je tedy uprostřed intervalu, neboť meze spínání jsou symetrické. Obě meze jsou pevné a nastavují se již zmíněnou spínací diferencí. Frekvence spínání je malá, což je výhodou. Regulovaná veličina se tedy pohybuje kolem žádané hodnoty, nikdy se však neustálí. Akční zásah je z regulátoru vyveden na binární výstup Y1.

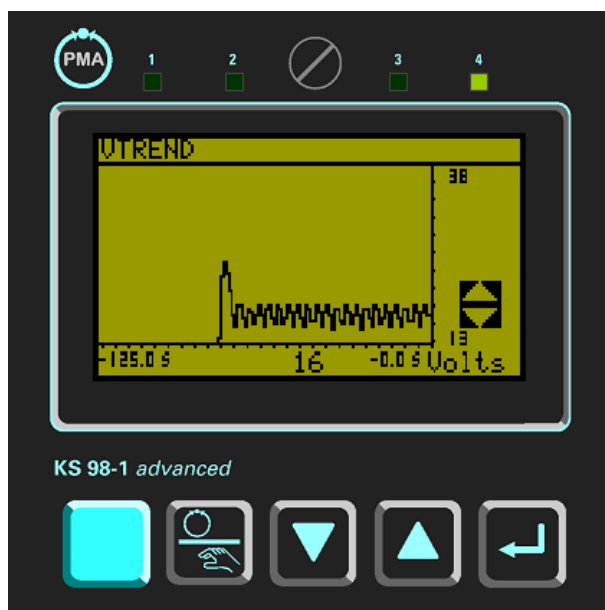


Obrázek 2.16 – Schéma obvodu s reléovým regulátorem v Simulinku

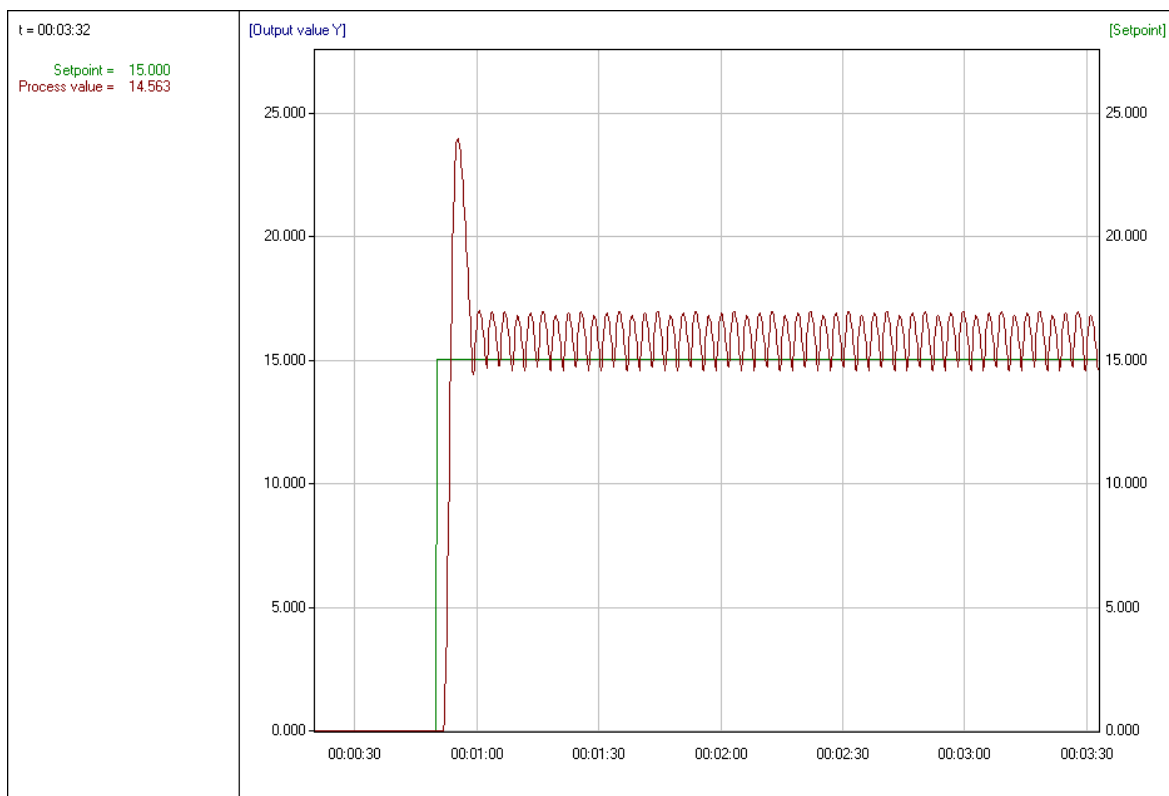
Blok Relay byl nastaven následovně. Hodnota switch on point je 0,01 a switch off point -0,01. Output when on je nastaven na hodnotu 2 a output when off na nulu, přičemž zůstává zatržena volba detekce průchodu nulou.



Obrázek 2.17 – Reléový regulační algoritmus



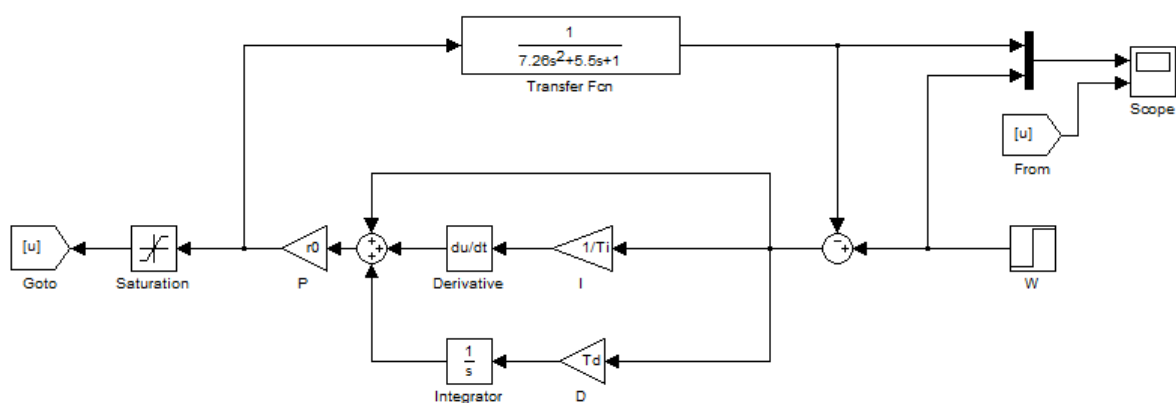
Obrázek 2.18 – Regulační pochod v simulátoru



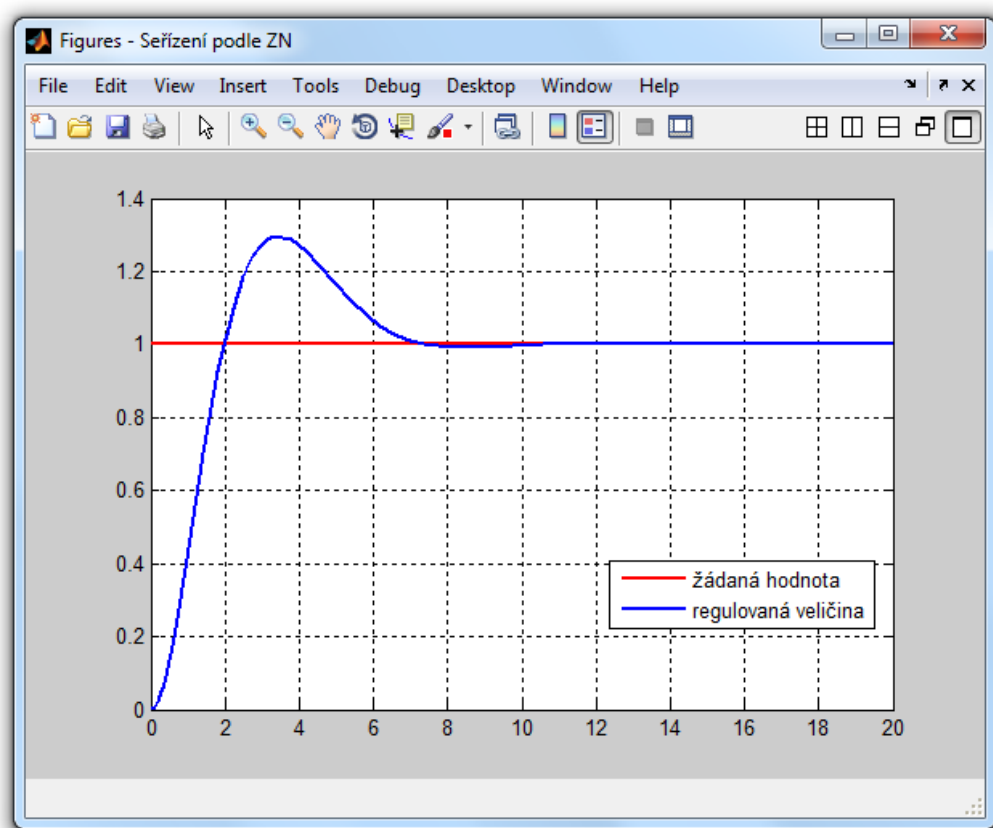
Obrázek 2.19 – Tentýž regulační pochod v okně trendu

2.4.2 Spojitý regulátor

Aby se omezil častý pohyb pohonu, je dobré nastavit neutrální pásmo co největší. Tím se ale sníží citlivost regulace. Je možné jej označovat i jako pásmo necitlivosti. Je nutné zvolit takovou šířku pásma, aby byl co nejvíce omezen pohyb akčního členu, ale zároveň musí být splněny požadavky uživatele na regulační pochod. Jde tedy o určitý kompromis, který musí každý operátor zvážit. Akční veličina je vedena z výstupu Yout1. Neutrální zóny jsou označeny jako Xsh1 a Xsh2. Lze je nastavit obě stejně, ale i každou samostatně. V intervalu ohraničeném mezními hodnotami neutrální zóny se automaticky nastaví regulační odchylka na nulovou hodnotu. Akční veličina se tím pádem nikde uvnitř pásma nemění. To platí pouze pro proporcionální složku sdruženého PID regulátoru. Složky I a D však mohou reagovat na předchozí změny žádané hodnoty nebo vzniklou poruchu, čímž se pochod může vychýlit z neutrálního pásma tím se opět aktivuje i P složka. Režim spojitě regulace se volí možností Cont v nabídce CFunc.

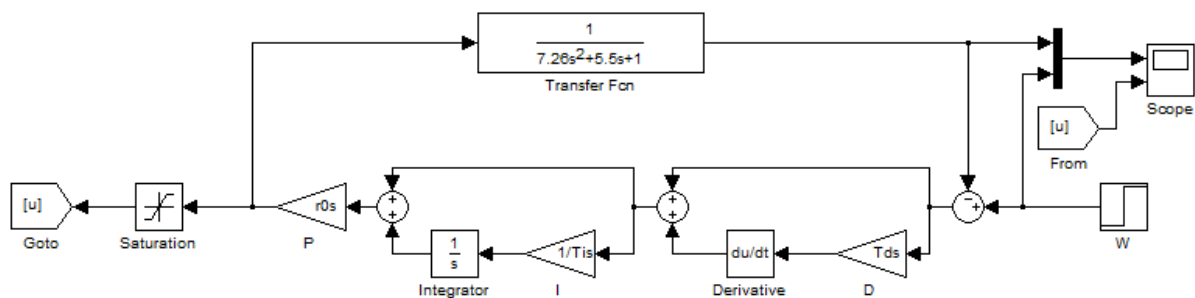


Obrázek 2.20 – Simulační schéma pro paralelní tvar přenosu

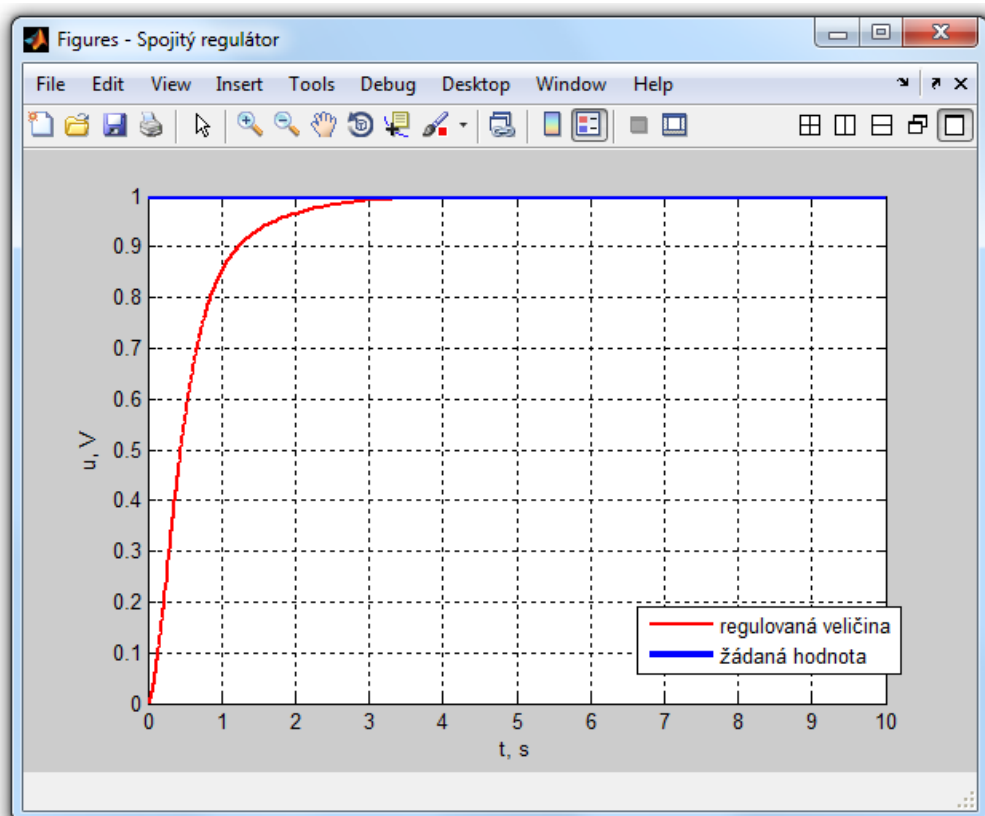


Obrázek 2.21 – Optimalizace parametrů podle metody ZN na základě skriptu (paralelní tvar)

Simulace paralelního tvaru probíhala s nastavením konstant regulátoru dle skriptu modifikovaný PID ZN.m. Byly použity hodnoty $r_0 = 9,88$, $T_I = 1,50$ a $T_D = 0,38$.

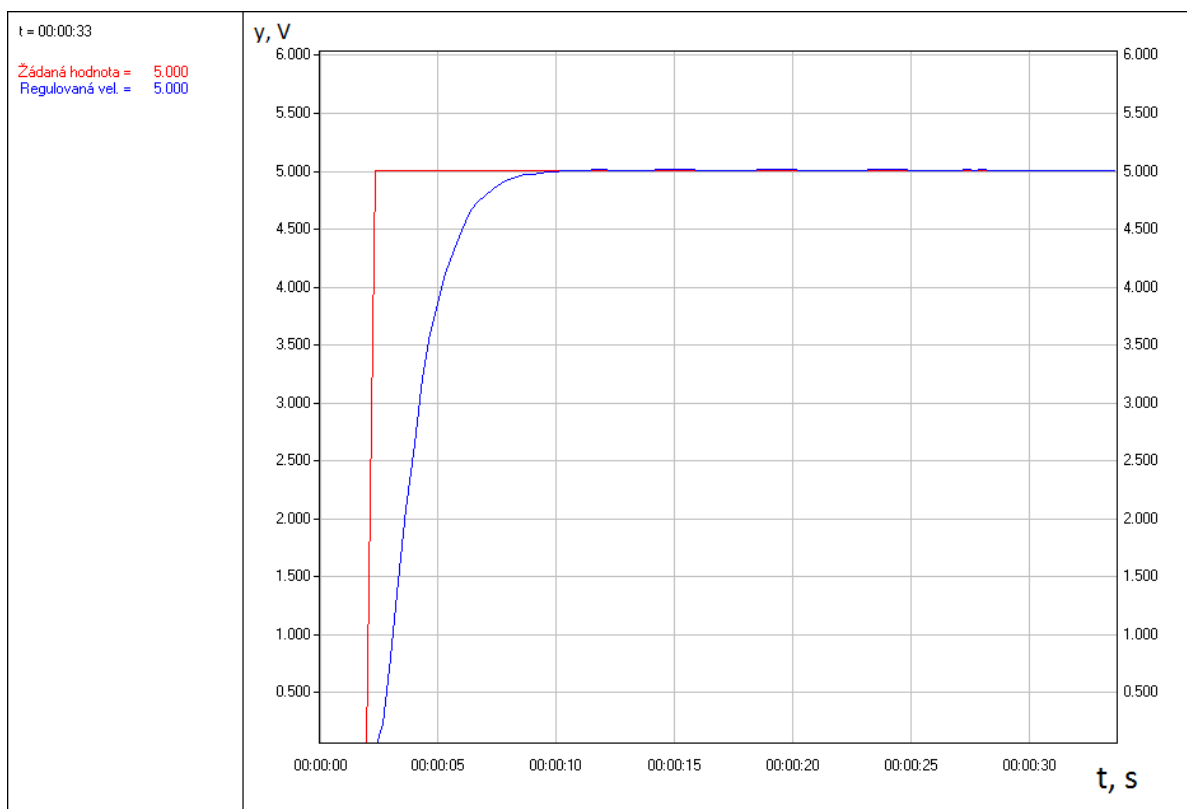


Obrázek 2.22 - Simulační schéma pro sériový tvar přenosu



Obrázek 2.23 – Regulace na žádanou hodnotu bez překmitu (sériový tvar)

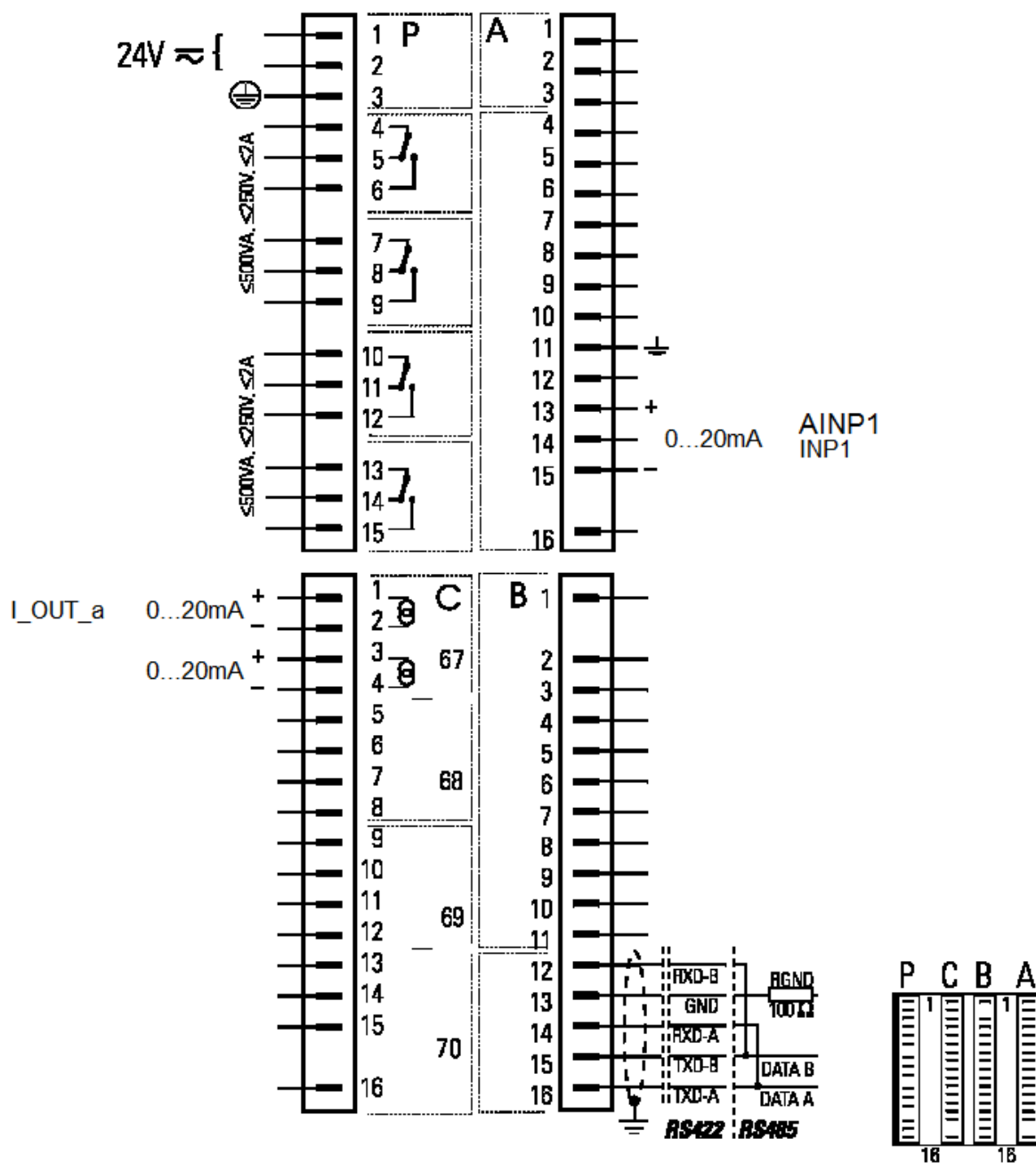
Simulace probíhala s nastavením konstant regulátoru $r0_s = 65$, $T_{Is} = 0,5$ a $T_{Ds} = 0,6$.



Obrázek 2.24 - Regulační pochod bez překmitu na skutečné soustavě

2.5 Skutečné zapojení

Connecting diagram



Obrázek 2.25 – Svorkovnice na zadní straně regulátoru

Během programování je regulátor připojen k počítači přes USB. Co se týče připojení soustavy, schéma pro zapojení vygenerované v ET/KS98-1 je na obrázku 2.25.

Závěr

Cílem práce bylo prozkoumat možnosti využití průmyslového regulátoru KS98-1. Přestože je regulátor navržen pro tepelné soustavy s možností rozdílných parametrů pro topení a chlazení, nebyla použita žádná tepelná soustava. Pro zvolenou statickou regulovanou soustavu 2. řádu byly simulovány regulační pochody. Shodných výsledků bylo dosaženo i při praktické realizaci. Teoreticky je popsán vliv unášení integrační složky, samočinné nastavení regulátoru i vztahy mezi jednotlivými tvary přenosu regulátoru. Na ukázkou byly zvoleny dva regulační algoritmy. V rámci práce bohužel není prostor na zkoumání všech algoritmů, které KS98-1 může realizovat. Inženýrský software obsahuje celou řadu funkčních bloků pro matematické i logické funkce a mnoho dalších, které však nebyly použity. Pro práci byly využity zejména bloky regulátorů, vstupy i výstupy a v neposlední řadě bloky určené k vykreslování grafů. K seřízení regulátoru podle ZN byl převzat skript, který přesně určil parametry regulátoru a mimo jiné i dobu průtahu $T_u = 0,75$ s a dobu náběhu $T_n = 7,43$ s. Zprvu bylo matoucí jiné značení veličin, tj. akční veličina je označena Y, regulační veličina XW a regulovaná veličina se skrývá pod písmenem X. Bylo dosaženo uspokojivých výsledků a na základě příznivých zkušeností s ovládáním bych regulátor KS98-1 doporučil firmám, které se zabývají řízením zejména technologických procesů.

Literatura

- [1] KUPKA, L., Janeček, J. *Matlab & Simulink: řešené příklady*. 1. vyd. Lanškroun: TG tisk a SOŠ a SOU, 2007. ISBN 978-80-239-9532-9.
- [2] HLAVA, J. *Prostředky automatického řízení II: analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02221-8.
- [3] *Multifunkční regulátor KS 98-1: Příručka uživatele* [online]. Plzeň, 2006 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS98-1N.pdf>
- [4] Ramp Function. *Wolfram MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Resource* [online]. 2013 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://mathworld.wolfram.com/RampFunction.html>
- [5] Ramp function. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2008 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ramp_function.svg
- [6] The universal genius KS 98-1 advanced. *PMA* [online]. 2008 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://pma-xtra.de/en/press/ks98-1.html>
- [7] PMA A COMPANY OF WEST CONTROL SOLUTIONS. *Katalogový list* [online]. Plzeň, 2011 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS98-1.pdf>
- [8] SCHLEGEL, M. *Průmyslové PID regulátory: Teorie pro praxi* [online]. Plzeň, 2001 [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://zcu.arcao.com/kky/zky/Prago1.pdf>