

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Řízení soustavy motor – generátor multifunkčním průmyslovým regulátorem
KS 98 – 1

Tomáš Honců

Diplomová práce
2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Honců**
Osobní číslo: **I11428**
Studijní program: **N2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Řízení soustavy motor - generátor multifunkčním průmyslovým regulátorem 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 dynamické soustavě motor - generátor v laboratoři.

Teoretická část:

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 a k laboratorní soustavě motor - generátor.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové 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] Aström, K., Hägglund, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2 vyd. Research Triangle Park (USA): Instrument Society of America, 1995. ISBN 1-55617-516-7.
- [3] Balátě, J. Automatické řízení. 2 vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-148-9.
- [4] 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.
- [5] 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 diplomové práce: **Ing. Libor Kupka, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **29. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2013**



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'S. Karamazov'.

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

L.S.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'D. Hone'.

Ing. Daniel Hone, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2012

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 dne 17. 5. 2013

Bc. Tomáš Honců

Poděkování

Mé poděkování především směřuje k vedoucímu diplomové práce panu Liborovi Kupkovi, který mi odpovídal na kladené otázky a připravil mi výborné podmínky pro realizaci diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za morální podporu.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na realizaci řízení reálné soustavy motor – generátor průmyslovým regulátorem KS 98 – 1. Nejprve jsou v teoretické části popsány hlavní funkce, programovací principy průmyslového regulátoru a nejpoužívanější regulační algoritmy. V praktické části je popsán průběh realizace řízení otáček soustavy motor – generátor včetně vyhodnocení naměřených výsledků. Pro znázornění dalších funkcí průmyslového regulátoru a jeho regulačních algoritmů je kromě řízení otáček soustavy motor – generátor ještě provedena také realizace řízení výstupní teploty průtokového ohřívače.

Klíčová slova

Průmyslový regulátor KS 98 – 1, motor – generátor, regulace, řídicí systémy, model soustavy

Title

Regulating of system engine - generator by multifunctional industrial regulator KS 98 – 1.

Annotation

The thesis is focused on the realization of control of real motor – generator system by an industrial controller KS 98 – 1. At first there is a description of main features, programming principles of the industrial controller and the most used control algorithms in the theoretical part. A process of realization of speed control of motor – generator including evaluation of the measured results is described in the practical part. To illustrate additional features of industrial controller and its algorithms is besides the speed control of motor – generator system does realization of control of outlet temperature of a water heater as well.

Keywords

Industrial controller KS 98 – 1, motor – generator, controller, control systems, model of system

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam symbolů	10
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	15
1 Úvod	16
2 Teorie řízení soustav	18
2.1 Základní pojmy.....	18
2.2 Soustavy	19
2.2.1 Matematický model ve formě diferenciálních rovnic.....	20
2.2.2 Přenosová funkce soustavy.....	20
2.2.3 Dynamické a statické chování soustav	21
3 Regulátory	22
3.1 Průmyslový regulátor KS 98 – 1	22
3.1.1 Vstupy a výstupy regulátoru KS 98 – 1.....	23
3.1.2 Čelní panel přístroje KS 98 – 1	25
3.1.3 Komunikace s PC	25
3.1.4 Čelní ovládací menu regulátoru.....	26
3.1.5 Verze regulátoru KS 98 – 1	26
3.2 Vývojové prostředí ET – KS	27
3.2.1 Základní princip.....	27
3.2.2 Bloky pro připojení k reálné soustavě	29
3.2.3 Bloky pro zobrazování veličin.....	31
3.2.4 Bloky pro regulaci	33
3.2.5 Simulační program SIM KS 98 – 1	35
3.3 Regulační algoritmy	35
3.3.1 Regulační algoritmy se spojitou akční veličinou.....	35
3.3.2 Regulační algoritmy s nespojitou akční veličinou.....	38
3.3.3 Optimální nastavení parametrů regulátoru	40
3.3.4 Posouzení kvality regulace	41
4 Řízení soustavy motor – generátor	41
4.1 Popis soustavy	42

4.2 Model soustavy.....	44
4.2.1 Matematicko-fyzikální analýza	44
4.2.2 Experimentální identifikace.....	47
4.2.3 Dynamické a statické chování soustavy	48
4.2.4 Řízení modelu soustavy.....	51
4.3 Řízení reálné soustavy přístrojem KS 98 – 1	58
4.3.1 Zapojení a popis úlohy	58
4.3.2 Program pro zpracování veličin a pro ovládání poruchy.....	59
4.3.3 Programová struktura v ET – KS	60
4.3.4 Experimentální měření	67
4.3.5 Vyhodnocení a kvalita regulace	72
5 Řízení soustavy průtokový ohříváč.....	74
5.1 Popis a model soustavy	74
5.1.1 Model soustavy.....	76
5.1.2 Dynamické a statické chování soustavy	79
5.2 Řízení modelu soustavy.....	81
5.2.1 Řízení v Simulinku	81
5.2.2 Řízení v ET – KS.....	82
5.2.3 Vyhodnocení a kvalita regulace	86
6 Závěr.....	88
Literatura	90
Přílohy	91
Příloha A.....	A
Příloha B.....	B

Seznam zkratek

ŘP	Řídicí prvek
MIMO	Několik vstupů – Několik výstupů
SISO	Jeden vstup – jeden výstup
LCD	Displej z tekutých krystalů
PC	Osobní počítač
D/A	Digitální/Analogový
A/D	Analogový/Digitální
LED	Dioda emitující světlo
USB	Univerzální datová sběrnice
ET	Inženýrský nástroj
PID	Proporcionální, integrační, derivační
ITAE	Integrál času násobící absolutní hodnotu odchylky
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud
LabView	Virtuální laboratorní nástroj inženýrských prací
TIC	Indikace a regulace teploty
LI	Indikace hladiny
RV	Regulovaná veličina
A/M	Automatické/manuální
LR	Elektronická zátěž
PS	Zdroj DC motoru řízený napětím z měřicí karty
M	DC motor s permanentními magnety P2TV553
EC	Spojka motoru a generátoru
D	DC generátor tvořený DC motorem s permanentními magnety P2TV553
SM	Tachodynamo K5A7-00
LR	Elektronická zátěž
S	Soustava
R	Regulátor
R_INP	Odporový modul
TC_INP	Modul čítače
U_INP	Vstupní napěťový modul
U_OUT	Výstupní napěťový modul
I_OUT	Výstupní proudový modul
F_INP	Vstupní frekvenční modul
DIDO	Binární vstupně-výstupní modul
INP1, INP3	Analogové vstupy průmyslového regulátoru
INP4, INP5	Analogové vstupy průmyslového regulátoru
OUT1-OUT4	Výstupy z průmyslového regulátoru
di1-di12	Digitální vstupy průmyslového regulátoru
do1-do6	Digitální výstupy průmyslového regulátoru
X1	Analogový vstup bloku AINP1

d1	Binární vstup bloku AINP1
y1	Binární výstup bloku regulátoru
y2	Přídavný binární výstup bloku regulátoru
N0	Svorka pro řídicí napětí motoru
N1	Svorka pro řídicí napětí zátěže
A0	Svorka pro výstupní napětí ze soustavy
A1	Svorka pro odečtení elektrického proudu, který prochází zátěží
S1	Kontakt pro ovládání zátěže
S2	Kontakt pro ovládání zátěže
P	Proporcionální složka
I	Integrační složka
D	Derivační složka

Seznam symbolů

B_M	Koeficient rotačního tlumení motoru
J_M	Moment setrvačnosti motoru
k_M	Konstanta motoru
L_M	Indukčnost vinutí motoru
R_M	Odpor motoru
φ_M	Úhel natočení motoru
ω_M	Otáčky motoru
φ_D	Úhel natočení generátoru
ω_D	Otáčky generátoru
M_d	Brzdňý moment vyvolaný poruchou
K_{MD}	Konstanta generátoru
L_D	Indukčnost vinutí generátoru
R_D	Odpor generátoru
J_D	Moment setrvačnosti generátoru
B_D	Koeficient rotačního tlumení generátoru
J_{SM}	Moment setrvačnosti tachodynamama
B_{SM}	Koeficient rotačního tlumení tachodynamama
k_{SM}	Převodní konstanta tachodynamama
U_i, U_{id}	Napětí indukované na vinutí rotoru
i_M	Proud motoru
U_M	Řídicí napětí motoru
i_d	Proud odebíraný z generátoru
U_D	Výstupní napětí na generátoru
U_d	Napětí na vstupu měřicí karty
$U_{dž}$	Napětí pomocí kterého je manuálně nastaven elektrický proud zátěží
U_r	Řídicí napětí zdroje motoru
U_{SM}	Napětí na svorkách tachodynamama
U_D	Napětí na svorkách generátoru
U_{out}	Napětí na výstupu soustavy
w	Žádaná veličina
e	Regulační odchylka
y	Regulovaná veličina
d	Poruchová veličina
u	Akční veličina
t	Čas
a, b	Konstanty
n, m	Řády derivací
$G(s)$	Obraz přenosové funkce
$Y(s)$	Obraz polynomu výstupu
$U(s)$	Obraz polynomu vstupní funkce
Z	Zesílení

W	Žádaná veličina průmyslového regulátoru KS 98 – 1
Y	Akční veličina průmyslového regulátoru KS 98 – 1
X	Regulovaná veličina průmyslového regulátoru KS 98 – 1
X_p	Pásmo proporcionality
T_n	Integrační časová konstanta bloku regulátoru
T_v	Derivační časová konstanta bloku regulátoru
$ParNo$	Číslo sady parametrů
T_i	Integrační časová konstanta
T_d	Derivační časová konstanta
r_0	Zesílení proporcionální složky
r_1	Zesílení integrační složky
r_2	Zesílení derivační složky
r_{0s}	Zesílení proporcionální složky (sériový tvar)
T_{ds}	Zesílení derivační složky (sériový tvar)
T_{is}	Zesílení integrační složky (sériový tvar)
F_p	Váha žádané veličiny u proporcionální složky
F_d	Váha žádané veličiny u derivační složky
u_2	Akční veličina 2
u_1	Akční veličina 1
$G_{zv}(s)$	Přenos zpětné vazby
K_{zv}	Zesílení zpětné vazby
T_{zv}	Časová konstanta zpětné vazby
T_u	Doba průtahu
T_g	Doba náběhu
F_k	Kritická frekvence
T_k	Kritická perioda
r_k	Kritické zesílení
W_p	Žádaná hodnota programátoru
W_{ext}	Externí žádaná hodnota průmyslového regulátoru
bW_p	Váha žádané veličiny proporcionální složky průmyslového regulátoru
cW_d	Váha žádané veličiny derivační složky průmyslového regulátoru
P	Příkon
F	Průtok
c	Měrná tepelná kapacita
T_{in}	Vstupní teplota průtokového ohříváče
m	Hmotnost
T	Výstupní teplota průtokového ohříváče
T_0	Okolní teplota
S	Prostupná plocha
K	Koeficient prostupnosti
F_{in}	Vstupní průtok
F_{out}	Výstupní průtok
V	Objem

h	Výška hladiny
g	Gravitační zrychlení
a	Výtokový koeficient
d_c	Průměr clonky
d_n	Průměr nádrže
U_{cerp}	Řídicí napětí čerpadla
t_{vzd}	Teplota vzduchu
$U_{\text{r_ohr}}$	Řídicí napětí ohřívače
$t_1, T1$	Výstupní teplota 1
$t_2, T2$	Výstupní teplota 2
X_{sd}	Spínací diference
$X0$	hodnota oscilace
XW	regulační odchylka
K_p	Zesílení regulátoru

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Blokové schéma dopředného řízení	19
Obrázek 2 – Blokové schéma zpětnovazebního obvodu	19
Obrázek 3 – Přehled různých typů přechodových charakteristik	21
Obrázek 4 – Multifunkční regulátor KS 98 – 1	22
Obrázek 5 – Zapojení jednotlivých vstupů a výstupů na svorkovnici přístroje KS 98	24
Obrázek 6 – Čelní panel KS 98 – 1 [5].....	25
Obrázek 7 – Zobrazení komunikace PC s KS 98 – 1	26
Obrázek 8 – Hlavní menu regulátoru	26
Obrázek 9 – Základní nastavení verze přístroje v ET – KS	27
Obrázek 10 – Nastavení komunikace přístroje KS 98 – 1.....	28
Obrázek 11 – Jednoduchý program v ET – KS	29
Obrázek 12 – Blok <i>AINPI</i>	29
Obrázek 13 – Blokové schéma bloku <i>AINPI</i>	30
Obrázek 14 – Blok <i>OUTI</i>	30
Obrázek 15 – Blok <i>I_OUT</i>	31
Obrázek 16 – Zobrazovací stránka <i>VBAR</i> na čelním panelu KS 98 – 1	31
Obrázek 17 – Zobrazovací stránka <i>VTREND</i> na čelním panelu KS 98 – 1.....	32
Obrázek 18 – Implementace bloků <i>VTREND</i> , <i>LIREAD</i> , <i>VBAR</i>	32
Obrázek 19 – Blok <i>CONTR</i>	33
Obrázek 20 – Okno pro zadávání parametrů bloku <i>CONTR</i>	34
Obrázek 21 – Vstupní struktura regulátoru <i>CONTR</i>	34
Obrázek 22 – Okno simulačního programu SIM KS 98 – 1	35
Obrázek 23 – Blokové schéma s P regulátorem v Simulinku	36
Obrázek 24 – Paralelní struktura spojitého PID regulátoru Simulinku.....	36
Obrázek 25 – Modifikace paralelní struktury PID regulátoru v Simulinku	37
Obrázek 26 – Sériová struktura PID regulátoru v Simulinku.....	37
Obrázek 27 – Blokové schéma dvoustavového regulátoru bez zpětné vazby	39
Obrázek 28 – Soustava motor – generátor.....	42
Obrázek 29 – Blokové schéma soustavy motor – generátor	43
Obrázek 30 – Náhradní schéma soustavy.....	44
Obrázek 31 – Model soustavy ve vývojovém prostředí Simulink	46
Obrázek 32 – Testovací a výstupní data pro experimentální identifikaci	48
Obrázek 33 – Odezvy výstupu na napěťový skok na vstupu	49
Obrázek 34 – Porovnání statických charakteristik	50
Obrázek 35 – Porovnání funkce soustavy s modelem.....	51
Obrázek 36 – Zapouzdřený model soustavy motor – generátor.....	52
Obrázek 37 – Přechodová charakteristika pro zjištění T_u a T_g	52
Obrázek 38 – Schéma pro řízení modelu soustavy motor – generátor.....	53
Obrázek 39 – Seřízení PID regulátoru podle Z-N	54
Obrázek 40 – Modifikace PID regulátoru s vážením žádané hodnoty	55
Obrázek 41 – Modifikace PID regulátoru	55

Obrázek 42 – Eliminace poruchy	56
Obrázek 43 – Sériová struktura PID regulátoru pro řízení soustavy.....	57
Obrázek 44 – Porovnání sériové a paralelní struktury PID regulátoru.....	57
Obrázek 45 – Rozmístění úlohy v laboratoři.....	58
Obrázek 46 – Schéma zapojení celého systému s přístrojem KS 98 – 1.....	59
Obrázek 47 – Program pro měření veličin a pro ovládání poruchy.....	60
Obrázek 48 – Základní programová struktura KS 98 – 1 pro řízení reálné soustavy.....	61
Obrázek 49 – Nastavení zobrazení trendů.....	63
Obrázek 50 – Zobrazení veličin pomocí bloku <i>LIREAD</i>	64
Obrázek 51 – Zadávání parametrů na čelním panelu KS 98 – 1.....	64
Obrázek 52 – Použití programátoru v aplikační struktuře.....	65
Obrázek 53 – Stránka Programátoru	66
Obrázek 54 – Implementace bloku <i>PIDMA</i>	66
Obrázek 55 – Průběh řízení soustavy motor – generátor.....	67
Obrázek 56 – Průběh logických stavů řízení soustavy motor – generátor	67
Obrázek 57 – Odezva na změnu žádané veličiny reálné soustavy motor – generátor.....	68
Obrázek 58 – Odezva reálné soustavy na poruchu.....	69
Obrázek 59 – Regulace pomocí bloku <i>PIDMA</i> s $bW_p = 0$, $cW_d = 0$	69
Obrázek 60 – Regulace pomocí bloku <i>PIDMA</i>	70
Obrázek 61 – Eliminace poruchy u bloku <i>PIDMA</i>	70
Obrázek 62 – Chod programátoru	71
Obrázek 63 – Výpočet kritéria ITAE v Simulinku.....	72
Obrázek 64 – Porovnání regulace reálné soustavy s regulací modelu soustavy	72
Obrázek 65 – Porovnání eliminace poruchy reálné soustavy a modelu soustavy.....	73
Obrázek 66 – Kvalita regulace dle kritéria ITAE pro blok <i>PIDMA</i>	73
Obrázek 67 – Model soustavy s průtokovými ohříváči.....	75
Obrázek 68 – Model průtokového ohříváče	77
Obrázek 69 – Model nádrže.....	78
Obrázek 70 – Celý model soustavy	78
Obrázek 71 – Přejímová charakteristika ohříváče vody	79
Obrázek 72 – Odezva výšky hladiny v nádrži na vstupní napěťový skok	79
Obrázek 73 – Statická charakteristika průtokového ohříváče	80
Obrázek 74 – Statická charakteristika čerpadla.....	80
Obrázek 75 – Obecný regulační obvod pro průtokový ohříváč.....	81
Obrázek 76 – Řízení teploty průtokového ohříváče	82
Obrázek 77 – Hlavní menu a definice parametrů	83
Obrázek 78 – Zobrazení teplot a hladiny.....	84
Obrázek 79 – Průběh regulace teplot v simulačním prostředí SIM KS	85
Obrázek 80 – Porovnání regulace v SIM KS s regulací v Simulinku	86
Obrázek 81 – Porovnání akčních veličin regulace teplot	87

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Příklady různých verzí přístroje KS 98 – 1	27
Tabulka 2 – Nastavení parametrů PID regulátoru pro ustálené kmity	40
Tabulka 3 – Nastavení parametrů – metoda přechodové charakteristiky.....	40
Tabulka 4 – Modifikace nastavení podle Zieglera a Nicholse	41
Tabulka 5 – Funkce a označení bloků soustavy	42
Tabulka 6 – Funkce elektronické zátěže.....	43
Tabulka 7 – Parametry modelu soustavy motor – generátor	47
Tabulka 8 – Data získaná z modelu soustavy a z reálné soustavy	50
Tabulka 9 – Potřebné parametry pro řízení soustavy	53
Tabulka 10 – Nastavení parametrů PID regulátoru pro aperiodický průběh.....	56
Tabulka 11 – Základní nastavení bloků v ET - KS	62
Tabulka 12 – Vlivy nastavení regulačních parametrů KS 98 – 1	63
Tabulka 13 – Indikace stavů.....	64
Tabulka 14 – Nastavení alarmů	65
Tabulka 15 – Nastavení bloku PIDMA	70
Tabulka 16 – Popis časové posloupnosti programátoru	71
Tabulka 17 – ITAE pro eliminaci poruchy.....	74
Tabulka 18 – Hodnoty ITAE pro změnu žádané hodnoty.....	74
Tabulka 19 – Parametry modelu soustavy průtokový ohřívač	75
Tabulka 20 – Hlavní menu řízení průtokového ohřívače v SIM KS 98.....	83
Tabulka 21 – Nastavení alarmů	84
Tabulka 22 – Regulační parametry pro průtokový ohřívač.....	86
Tabulka 23 – Hodnoty ITAE pro 2 druhy regulace.....	86

1 Úvod

Pro řízení dynamických soustav jsou v dnešní době používány různé řídicí systémy. Jednotlivé aplikace řídicích systémů se mohou lišit především podle složitosti řízených soustav. Pro složitější soustavy je vhodnější použít sofistikovanější řídicí systémy s více vstupy a výstupy. Naproti tomu pro jednoduché soustavy, které mají malý počet vstupů a výstupů, je postačující použít jednoduchý průmyslový regulátor, který se od složitějších řídicích systémů může lišit jak provedením, tak především nižší cenou.

Diplomová práce, která je rozdělena na teoretickou část a praktickou část, je zaměřena na řízení reálné soustavy prostřednictvím průmyslového regulátoru KS 98 – 1 od německé firmy PMA. V teoretické části je především popsán průmyslový regulátor KS 98 – 1 a jeho funkce, včetně jeho komunikace s PC. Součástí teoretické části je také popis vývojového prostředí ET – KS, který je dodán výrobcem společně s řídicím systémem. V tomto vývojovém prostředí jsou v praktické části realizovány regulační algoritmy určené pro řízení soustavy motor – generátor.

Reálná soustava, která má malý počet vstupů a výstupů, je složena ze stejnosměrného motoru, stejnosměrného generátoru, tachodynamu a z elektronické zátěže. V diplomové práci je tato velmi jednoduchá soustava, která je určena studentům pro účely experimentálních měření a v konkrétním případě pro ověření regulačních algoritmů, detailně popsána v kapitole zabývající se modelem soustavy.

Pro určení modelu soustavy je provedena matematicko-fyzikální analýza, která využívá fyzikální závislosti a matematické nástroje k sestavení matematického modelu. Matematický model reálné soustavy motor – generátor je převzat z odborné literatury. Zjištěný matematický model bude použit pro účel sestavení simulačního modelu. Pro kontrolu a zjištění parametrů přenosové funkce soustavy je provedena experimentální identifikace modelu soustavy simplexovou metodou s využitím naměřeného signálu z výstupu soustavy.

S využitím simulačního modelu, který by měl do jisté míry popisovat chování soustavy, je provedena realizace řízení modelu soustavy motor – generátor ve vývojovém prostředí Simulink, kde je sestaven i simulační model soustavy. S využitím znalostí o základních regulačních algoritmech je vytvořen zpětnovazební regulační obvod obsahující řídicí prvek s parametry, které jsou optimálně nastaveny metodou podle Zieglera a Nicholse.

Reálná soustava motor – generátor je řízena průmyslovým regulátorem KS 98 – 1. Elektronická zátěž ve formě odporu je připojena na svorky generátoru a svým připojením zvyšuje brzdný moment generátoru. Zátěž představuje pro řízení otáček motoru poruchovou veličinu, kterou je nutné implementací regulátoru eliminovat. Poruchová veličina ve většině případů bývá pro regulační proces vnější veličinou, kterou nelze ovlivnit a která ovlivňuje regulovanou veličinu v náhodném čase. Vnější poruchová veličina, která je ve formě elektronické zátěže, je ovládána prostřednictvím aplikace v LabView.

Průmyslový regulátor KS 98 – 1 je primárně určen např. pro tepelné soustavy nebo soustavy, kdy je řízena hladina média v nádrži (tzn. pro soustavy s poměrně velkou dobou náběhu odezvy výstupní veličiny soustavy). Z tohoto důvodu bude zajímavé sledovat kvalitu a průběh regulace v případě velmi rychlé soustavy motor – generátor. Kvalita regulace je v práci posuzována pomocí integrálního kritéria ITAE.

2 Teorie řízení soustav

Řízení je cílevědomá činnost, při níž se hodnotí a zpracovávají informace o řízeném objektu nebo procesu i informace o dějích vně tohoto procesu a podle nich se ovládají příslušná zařízení tak, aby bylo dosaženo předepsaného cíle. V následujících odstavcích jsou ve stručnosti uvedeny základní pojmy užívané v teorii řízení.

2.1 Základní pojmy

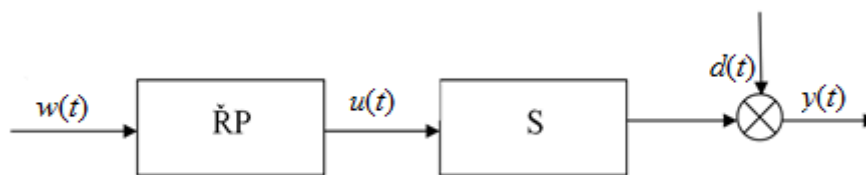
Mezi základní pojmy v oblasti řízení soustav patří:

- Regulační obvod – Je to systém tvořený řízenou soustavou a řídicím systémem.
- Řízená soustava – Prvek s vstupy i s výstupy, na který působí řídicí systém.
- Řídicí systém (regulátor) – Blok s různou strukturou, který působí na soustavu akční veličinou, kterou vytváří, aby zajistil pokud možno co nejmenší odchylku regulované veličiny od žádané veličiny.
- Regulovaná veličina $y(t)$ – Je to veličina, která vystupuje z regulované soustavy. Zároveň je však tato hodnota přivedena na vstup regulátoru, kde se odečítá od žádané veličiny. Cílem regulace je tuto veličinu udržovat na hodnotě žádané veličiny.
- Žádaná veličina $w(t)$ – Hodnota, kterou volí podle vlastní potřeby sám uživatel, neboli hodnota, na které má být regulovaná veličina udržována.
- Regulační odchylka $e(t)$ – Tuto veličinu lze popsat vzorcem $e(t) = w(t) - y(t)$. Vstupuje do regulátoru a vzniká přímo při samotné regulaci nebo při zásahu poruchové veličiny do soustavy.
- Poruchová veličina $d(t)$ – Odpovídá neúmyslné a nepředvídatelné změně regulované veličiny.
- Akční veličina $u(t)$ – Veličina, kterou vytváří řídicí systém a přivádí se na vstup soustavy. V každém kroku procesu ji řídicí systém (regulátor) definuje tak, aby regulační odchylka byla co nejmenší.

Existují dva základní typy řízení:

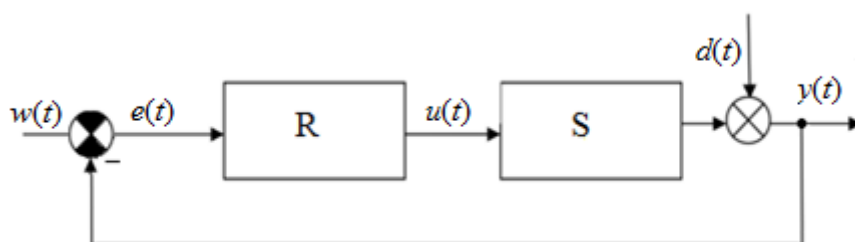
- Dopředné řízení,
- zpětnovazební řízení.

U dopředného řízení neexistuje zpětná vazba, která by poskytovala řídicímu prvku (regulátoru) průběžné informace o odchylkách řízené veličiny od požadované veličiny. Řídicí prvek, který vyvolává akční veličinu, působí na soustavu přímo, aniž by zjišťoval její stav před akčním zásahem. V průmyslových aplikacích minimalizuje dopředný řídicí prvek vlivy poruchového signálu pouze tehdy, je-li dopředu známa hodnota tohoto poruchového signálu, která by později ovlivnila hodnotu řízeného signálu [1].



Obrázek 1 – Blokové schéma dopředného řízení

Běžnějším případem řízení je zpětnovazební řízení. V každém intervalu řízení je vyhodnocena hodnota odchylky řízené veličiny od hodnoty žádané veličiny. Podle hodnoty odchylky řídicí prvek – regulátor nastavuje akční zásah tak, aby řízená veličina byla rovna žádané veličině.



Obrázek 2 – Blokové schéma zpětnovazebního obvodu

2.2 Soustavy

Soustava je objekt, který v regulačním obvodu produkuje veličinu, která je předmětem regulace. Ovšem velice často se stává, že lze řídit i několik regulovaných veličin najednou, a ty jsou odečítány na libovolném počtu výstupů ze soustavy. Tyto soustavy, které mají libovolný počet výstupů i vstupů, jsou označeny jako tzv. *MIMO* systémy (*Multi Input – Multi Output*). Naopak soustavy pouze s jedním vstupem a s jedním výstupem označujeme *SISO* systémy (*Single Input – Single Output*) [2].

Soustava může být zadána několika způsoby, které charakterizují její chování a vlastnosti.

Základní dělení popisů soustav [2]:

- Vnější popis soustav:
 - Lineární diferenciální rovnice.
 - Poloha pólů a nul přenosu.
 - Přenosová funkce.
 - Impulsní funkce.
 - Kmitočtový přenos.
- Vnitřní popis soustav:
 - Stavový popis soustavy.

Podle typů matematických modelů rozeznáváme tyto způsoby vyjádření soustavy [2]:

- Model soustavy ve formě diferenciálních rovnic.

- Model ve formě stavového popisu dynamické soustavy.
- Model ve formě popisu soustavy přenosovými funkcemi.

2.2.1 Matematický model ve formě diferenciálních rovnic

Při vytváření matematického modelu se vychází z fyzikálního modelu soustavy, kdy jsou známy všechny fyzikální závislosti mezi jednotlivými subjekty zkoumané soustavy. Využívá se znalost fyzikálních i matematických zákonů. Vytváření matematických modelů se realizuje na základě bilancí energií v systému. Změna množství energie v uzavřené soustavě se musí rovnat rozdílu energie, která do systému vstupuje a energie, která ze systému vystupuje, přičemž je tento rozdíl přičtený k energii, která v systému vzniká nebo zaniká.

$$\frac{\Delta}{\Delta t} = \text{vstup} - \text{výstup} \pm \text{zdroj} \quad (2.1)$$

Ve formě lineárních diferenciálních rovnic lze popsat soustavy, které jsou lineární i nelineární. U nelineárních soustav je však nutné zanedbat vyskytující se nelinearity.

Obecně lze matematický model ve formě lineárních diferenciálních rovnic zapsat takto [3]:

$$y^n + a_{n-1}y^{n-1} + \dots + a_1y' + a_0y = b_mu^m + b_{m-1}u^{m-1} + \dots + b_1u' + b_0u \quad (2.2)$$

kde $a_i, i = 0, 1, \dots, n$ a $b_j, j = 0, 1, \dots, m$ – konstanty,
 y – výstupy $y(t)$,
 u – vstupy $u(t)$,
 n, m – řády derivací.

Mezi řády derivací na levé a pravé straně rovnice platí podmínka $m \leq n$ [3]. Rovnice (2.2) vyjadřuje vztah mezi vstupem $u(t)$ a výstupem $y(t)$ pomocí lineární diferenciální rovnice s konstantními parametry a počátečními podmínkami rovny [3]:

$$y(0)^i = y_0^i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad u(0)^j = u_0^j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (2.3)$$

Zapsáním matematického modelu ve tvaru podle rovnice (2.2), je získán základní podklad pro určení přenosové funkce soustavy.

2.2.2 Přenosová funkce soustavy

Důležitým nástrojem pro sestavení přenosové funkce soustavy z diferenciálních rovnic je Laplaceova transformace, která převádí, v případě oblasti řízení, signál vstupu i výstupu z časové oblasti do oblasti komplexní. Výhodou této transformace je, že složité operace, které je nutné vykonávat při analýze soustavy, mohou být nahrazeny jednoduchými algebraickými operacemi. Realizací Laplaceovy transformace je získán obraz signálu z časové oblasti do komplexní [4].

Přenos je obecně definován jako poměr výstupu k vstupu. Analogicky je přenosová funkce definována jako podíl Laplaceových obrazů výstupů a vstupů soustavy při nulových počátečních podmínkách (rovnice (2.4)) [4].

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.4)$$

Kořeny polynomu jmenovatele přenosu $a(s)$ se nazývají póly přenosu. Kořeny polynomu čitatele přenosu $b(s)$ se nazývají nuly přenosu. Řád přenosu soustavy n je dán stupněm polynomu jmenovatele přenosu. Zesílení soustavy pak lze definovat jako [4]:

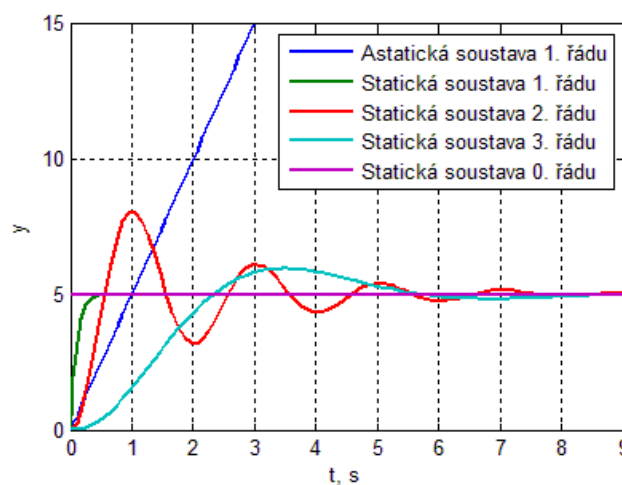
$$Z = \frac{b_0}{a_0} \quad (2.5)$$

V případě, že struktura soustavy je neznámá, lze přenosovou funkci získat metodou experimentální identifikace. Postačující podmínkou užití této metody je znalost dynamického nebo statického chování soustavy.

2.2.3 Dynamické a statické chování soustav

Dynamické chování soustav určuje přechodová charakteristika, která zobrazuje odezvu na výstupu soustavy, je-li přivedena skoková změna veličiny na vstup soustavy. Přechodová charakteristika znázorňuje časovou závislost výstupní veličiny soustavy. Každá soustava má různou podobu přechodové charakteristiky, která je závislá na řádu soustavy.

V případě, kdy odezní přechodový děj a výstupní veličina je ustálena na hodnotě, která se již v budoucnu nemění, se jedná o soustavu statickou. V opačném případě, kdy se nepodaří dosáhnout ustáleného stavu výstupní veličiny a hodnota výstupní veličiny se neustále zvyšuje až do nekonečna, se jedná o soustavu astatickou [4].



Obrázek 3 – Přehled různých typů přechodových charakteristik

Na obrázku 3 je znázorněno několik přechodových charakteristik pro různé soustavy, které jsou definovány určitými přenosovými funkcemi. Řád polynomu jmenovatele přenosové funkce určuje i řád celé soustavy.

Po uplynutí přechodového jevu se výstup ustálí na určité ustálené hodnotě. Závislost této ustálené hodnoty na výstupu a signálu, který je do soustavy přiveden, popisuje statická charakteristika. V případě analýzy statické charakteristiky je zkoumána především její linearita. Podle linearity statické charakteristiky rozlišujeme soustavy:

- Lineární,
- nelineární.

U lineárních soustav, na rozdíl od nelineárních soustav, lze matematický model vyjádřit pomocí lineárních diferenciálních rovnic. Výhodou lineárních soustav je především jejich dobrá říditelnost [4].

3 Regulátory

Pro ovládání regulované veličiny soustavy jsou používány řídicí bloky označované jako regulátory. Obvykle se skládají z měřicího členu, vlastního členu regulátoru a z akčního členu. Slovo regulátor je velice obecný pojem. V praxi je možné se setkat s různými druhy regulátorů. Zohledňuje se především druh a princip napájení, spojitost výstupního signálu regulátoru, druh regulované veličiny, tvar a vlastnosti přenášeného signálu.

3.1 Průmyslový regulátor KS 98 – 1

KS 98 – 1 je multifunkční regulátor, který integruje téměř všechny automatizační funkce do jednoho přístroje. Velkou výhodou aplikací, které umožňuje regulátor vykonávat, je schopnost adaptace automatizačních systémů na rozmanitý počet a typ požadovaných vstupů a výstupů. Libovolné řídicí struktury lze z PC prostřednictvím komunikační linky nahrávat přímo do regulátoru [5].



Obrázek 4 – Multifunkční regulátor KS 98 – 1 [5]

Hlavní výhody implementace regulátoru KS 98 – 1 [5]:

- Jsou-li požadované vstupy přímo součástí regulátoru, není třeba používat další přídavné převodníky signálů.
- Rozsáhlá knihovna funkčních bloků.
- Decentralizovaná řešení snižují náklady a zvyšují transparentnost systémů.
- Jednoduchý inženýrský nástroj umožňuje uživateli i bez hlubších znalostí programování vytvořit libovolnou strukturu podle jeho potřeb.

3.1.1 Vstupy a výstupy regulátoru KS 98 – 1 [5]

Pro připojení soustavy k regulátoru jsou na svorkovnici, která je nainstalována na zadní stěně přístroje, k dispozici následující vstupy:

- Analogový vstup INP1 – univerzální pro:
 - Termočlánky.
 - Odporový teploměr.
 - Odpor.
 - Stejnoseměrný proud 0–20 mA nebo 4–20 mA.
 - Stejnoseměrné napětí 0–10 V nebo 2–10 V.
- Analogový vstup INP5 pro:
 - Vstup diferenciálního zesilovače. Pro proudový i napěťový signál hodnoty stejné jako u INP1.
- Analogový vstup INP6 pro:
 - Odporový vysílač.
 - Stejnoseměrný proud 0–20 mA nebo 4–20 mA
- Přídavné vstupy INP3 a INP4 pro:
 - Galvanicky oddělené vstupy diferenciálního zesilovače. Pro proudový i napěťový signál hodnoty stejné jako u INP1.
- Binární vstupy di1–di12

Výstupy, které jsou k dispozici na svorkovnici:

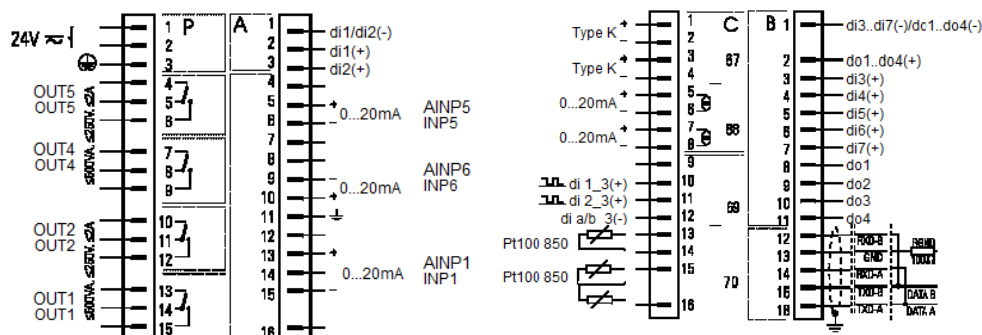
- Výstupy OUT1, OUT2 jsou podle verze řešeny jako:
 - Reléové výstupy.
 - Proudové výstupy 0–20 mA nebo 4–20 mA.
 - Binární výstupy.
- Výstup OUT3 jako:
 - Přídavný proudový výstup na desce C.
- Výstup OUT4 jako:
 - Reléový výstup.
- Řídicí výstupy do1–do6.

Kromě klasických vstupů a výstupů na standardních deskách přístroje A a B je v přístroji nainstalována přídavná modulární deska C s možností připojení modulů, které nabízejí další vstupy a výstupy pro speciální využití. Tato modulární deska obsahuje A/D

převodník, obvod pro zpracování signálu a D/A převodník. Doba převodu u A/D převodníku je 20 ms a doba cyklu u D/A převodníku je 100 ms [5].

Moduly, které mohou být připojeny na modulární desku C:

- Modul pro odporové vstupy R_INP jako:
 - Odporový teploměr (2 kanály pro použití, ovšem při 3 a 4 vodičovým připojení lze použít pouze 1 kanál).
 - Odpor / potenciometr (0–160 Ω, 0–450 Ω, 0–1600 Ω, 0–4500 Ω).
- Modul TC_INP pro:
 - Termočlánky.
 - Vstupní signál v mV.
 - Vstupní signál v mA.
- Napěťový modul U_INP pro:
 - Vstupní napětí -50–1500 mV nebo 0–10V.
- Výstupní napěťový modul U_OUT pro:
 - Výstupní napěťový signál 0–10 V, 2–10 V nebo -10–10 V.
- Výstupní proudový modul I_OUT pro:
 - Výstupní proudový signál 0–20 mA, 4–20 mA nebo -20–20 mA.
- Binární vstupně/výstupní modul DIDO pro:
 - Logické vstupy a výstupy
- Modul F_INP pro:
 - Řídicí vstup (2 kanály).
 - Pulsní čítač (2 kanály).
 - Měření frekvence (2 kanály).
 - Čítač nahoru/dolů (1 kanál).
 - Kvadrurní čítač (1 kanál).



Obrázek 5 – Zapojení jednotlivých vstupů a výstupů na svorkovnici přístroje KS 98

Na obrázku 5 je znázorněn příklad zapojení na zadní svorkovnici přístroje. Každá svorkovnice u různých typů přístroje KS 98 – 1 může být rozdílná. Rozdíl spočívá hlavně v dodávaných modulech na desce C. Přístroj obsahuje 4 desky P, A, B a C. Na desce P je vyvedeno napájení přístroje a výstupy z přístroje. Výstupy mohou mít jak spojitý charakter, tak i nespojitý charakter ve formě relé. Deska A je primárně určená pro připojení vstupů. Je důležité si ovšem uvědomit, že to, co je pro regulátor vstup, je z hlediska

pohledu na libovolnou soustavu výstup. K desce A mohou být připojeny jak klasické vstupy s unifikovanými signály (0–10 V, 0–20 mA, 2–10 V, 4–20 mA), tak i binární vstupní signály. V neposlední řadě je možné k této desce připojovat i odpory a termočlánky. Deska B obsahuje binární vstupy a výstupy a jsou zde umístěny také porty pro připojení přístroje na sběrnici CANopen nebo Profibus. Nejzajímavější deskou, z pohledu požadavků uživatele, je deska C. Modulární deska C může být provedena v několika různých variantách podle zakoupených přídatných modulů. Proto i zapojení na zadní svorkovnici může být odlišné. V případě na obrázku 5 jsou k modulární desce C připojeny 2 termočlánky typu K, 2 unifikované proudové signály, 2 čítače a 2 snímače teploty typu Pt.

3.1.2 Čelní panel přístroje KS 98 – 1

Jestliže provedení svorkovnice se podle typu přístroje KS 98 může i výrazně lišit, provedení čelního panelu je u všech typů stejné. Přístroj KS 98 – 1 je znázorněn na obrázku 6.

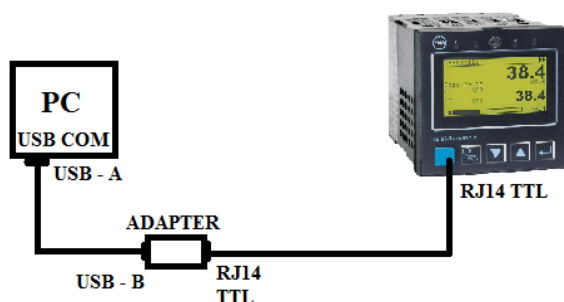


1 – Ovládací prvky pro pohyb po ovládací stránce (nahoru/dolů), 2 – Tlačítko potvrzení (*enter*) slouží k potvrzení hodnoty/funkce nebo při dlouhém přidržení k návratu na předchozí ovládací menu, 3 – Komunikační linka pro připojení k PC, 4 – Tlačítko *ruka/automat* slouží k přepínání automatické a ruční regulace nebo k ovládání programátoru, 5 – Zajišťovací šroub sloužící k připevnění modulu v regulátoru, 6 – Dvoubarevný LCD displej, 7 – Informační LED indikátory.

Obrázek 6 – Čelní panel KS 98 – 1 [5]

3.1.3 Komunikace s PC

Jedna z výhod přístroje KS 98 – 1 je realizovatelnost různé programové struktury ve vývojovém prostředí, které je dodáno od výrobce regulátoru současně s výrobkem. Pro připojení osobního počítače k přístroji slouží adapter, který má na svém vstupu konektor USB a na svém výstupu konektor RJ14. Prostřednictvím adapteru je PC připojeno k tzv. *Blue portu* na čelním panelu přístroje [5]. Celé blokové schéma je znázorněno na obrázku 7.

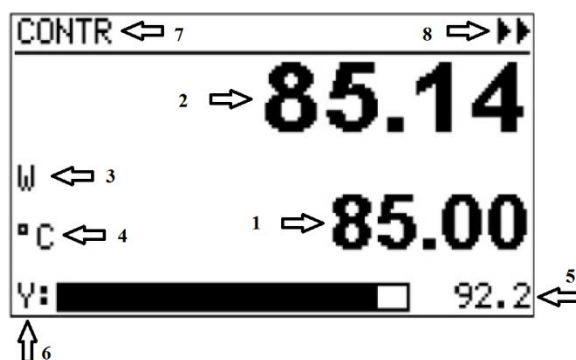


Obrázek 7 – Zobrazení komunikace PC s KS 98 – 1

Přístroj je prostřednictvím konektoru USB připojen na komunikační port COM3.

3.1.4 Čelní ovládací menu regulátoru

Pro řízení regulované veličiny je možné ve vývojovém prostředí použít 3 dostupné bloky *CONTR*, *CONTR+* a *PIDMA*. Na obrázku 8 je popsáno ovládací menu regulátoru pro blok *CONTR*. Rozdíl mezi jednotlivými regulačními bloky, je popsáno později.



1 – Hodnota žádané veličiny *W*, %, 2 – Hodnota regulované veličiny *Y*, %, 3 – Zdroj žádané veličiny, 4 – Fyzikální jednotka, 5 – Hodnota akční veličiny *X*, %, 6 – Sloupcový graf akční veličiny *X*, 7 – Název ovládací stránky, 8 – Přejít na stránku optimalizace.

Obrázek 8 – Hlavní menu regulátoru

U regulátorů KS 98 – 1 je provedeno odlišné označení jednotlivých veličin. Akční veličina je označena *Y*, regulovaná veličina *X*, regulační odchylka *XW* a žádaná hodnota je označena písmenem *W*.

3.1.5 Verze regulátoru KS 98 – 1

Jak již bylo popsáno v předešlých kapitolách, existuje několik verzí přístroje KS 98 – 1. Přístroje jsou dodávány uživateli s různými konfiguracemi, které ovlivňují především požadavky zákazníka na napájení přístroje, provedení výstupů, komunikaci s jinými přístroji a na provedení modulární desky *C*. Jednotlivé verze přístroje jsou od sebe rozeznávány především jejich osmimístným výrobním číslem.

Tabulka 1 – Příklady různých verzí přístroje KS 98 – 1

Verze	KS 98 - 101 - 24000	KS 98 - 104 - 21000	KS 98 - 145 - 34000
Napájení	24 V DC	90 - 250 V AC	24 V DC
Výstupy	4 relé	2 relé + 2 AOUT	2 relé + 2 AOUT
Komunikace	RS 422/485 + hodiny	RS 422/485 + hodiny	PROFIBUS + di/do
Deska C	Objednané moduly	INP3, INP4, OUT3	Objednané moduly
Provedení	Základní KS 98	Základní KS 98	Se sběrnicí CANopen

V tabulce 1 jsou pro příklad uvedeny 3 verze přístroje KS 98. Barevně je vyznačen přístroj, který je k dispozici pro praktickou část diplomové práce a který zakoupila pro laboratorní účely Univerzita Pardubice.

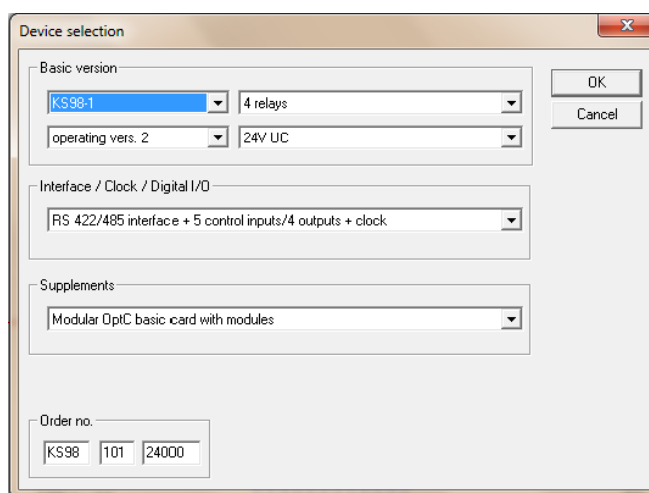
3.2 Vývojové prostředí ET – KS

Při zakoupení přístroje KS 98 – 1 výrobce dodává vývojový software, v kterém lze jednoduše požadovanou funkci přístroje naprogramovat.

3.2.1 Základní princip

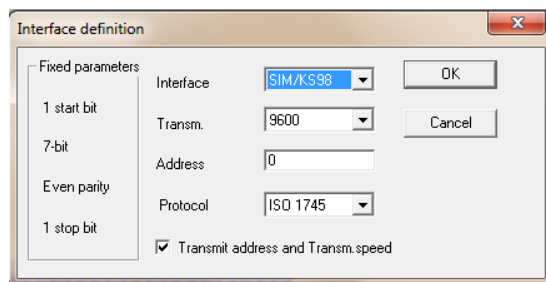
Vývojové prostředí ET – KS poskytuje uživateli komplexní nástroj pro tvorbu funkčních schémat, které lze nahrávat prostřednictvím adapteru, který je připojen na tzv. *Blueport*, přímo do přístroje [5].

Před tím než uživatel začne tvořit programovou strukturu, je velice důležité správné nastavení verze přístroje a druhu komunikace, buď mezi vývojovým prostředím, nainstalovaným v počítači, a přístrojem KS 98, nebo mezi vývojovým prostředím a simulačním programem SIM KS 98 – 1 (viz kapitola 3.2.5).



Obrázek 9 – Základní nastavení verze přístroje v ET – KS

Nejdůležitější zadávací pole pro definici verze přístroje je na obrázku 9 pole s názvem *Order no.*, kde je zadáno osmimístné číslo, které jednoznačně určuje danou verzi přístroje [5]. V případě kdy je zadáno toto číslo, ostatní pole se již nastavovat nemusí.



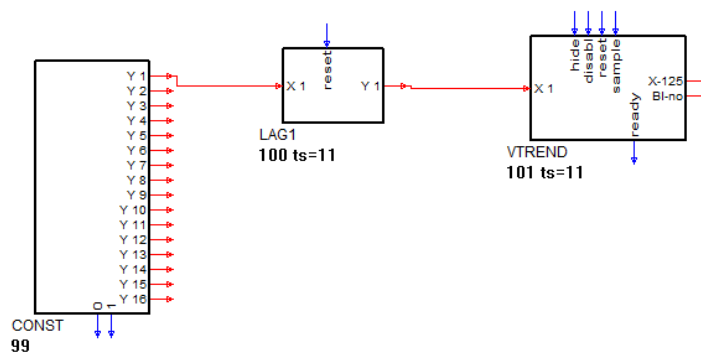
Obrázek 10 – Nastavení komunikace přístroje KS 98 – 1

Na obrázku 10 je pro uživatele nejpodstatnější pole s názvem *Interface*. Zde je zadáváno rozhraní, mezi kterým se uskutečňuje komunikace. V případě, že je počítač připojen k přístroji prostřednictvím adapteru, je zvoleno komunikační rozhraní COM3. V jiném případě, je využito simulační prostředí SIM KS 98. I tato volba musí být nastavena v položce *Interface*. Další volbou v zadávacím okně může být i komunikace prostřednictvím sběrnice *Profibus* [5].

Celá programová struktura v prostředí ET – KS je naprogramována na bázi grafického programování. V principu to znamená, že jednotlivé vstupy a výstupy jsou propojeny s různými funkčními bloky a jejich libovolná kombinace určuje celkovou požadovanou funkci celého programu.

Mezi funkční bloky ve vývojovém prostředí ET – KS patří bloky pro [5]:

- Výpočty (*ADSU* – sčítání/odčítání, *MUDI* – násobení/dělení, *SQRT* – odmocnina, atd.)
- Nelineární funkce (*LINEAR* – linearizace, *GAP*, *CHAR*).
- Trigonometrické funkce (*COS*, *SIN*, *TAN*, *ARCSIN*, atd.)
- Logické funkce (*AND*, *OR*, *NOT*, *EXOR* – exkluzivní *OR*, *FLIP* – klopný obvod D, atd.)
- Zpracování signálu (*ABIN* – převod analog/bin, *MEAN* – střední hodnota, atd.)
- Časové funkce (*LAG1* – filtr 1. řádu, *LEAD* – derivace, *INTE* – integrál, atd.)
- Výběr a ukládání dat (*EXTR* – výběr extrémní hodnoty, *PEAK* – paměť špičkových hodnot, *2OF3* – stř. hodnota s výběrem 2 ze 3, atd.)
- Omezení a porovnání (*ALARM* – zpracování alarmu, *EQUAL* – porovnání 2 hodnot, atd.)
- Zobrazování (*VPARA* – zadávání parametrů, *VTREND* – zobrazení trendu, *LIREAD* – zobrazení průběhů, atd.)
- Programování (*APROG* – analogový programátor, *DPROG* – digitální programátor, atd.)
- Řízení (*CONTR* – regulátor 1, *CONTR+* – regulátor 2, *PIDMA* – PID regulátor).



Obrázek 11 – Jednoduchý program v ET – KS

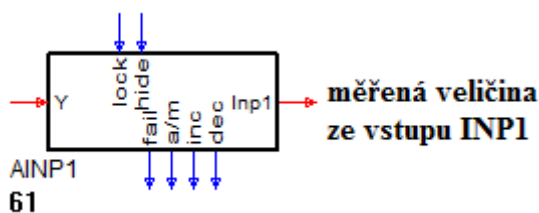
Na obrázku 11 je znázorněna programová struktura pro zobrazení přechodové charakteristiky soustavy, která je zadána pomocí přenosové funkce v bloku *LAG1*. Blok *CONST* je určen pro zadávání konstant ve vývojovém prostředí.

3.2.2 Bloky pro připojení k reálné soustavě

Reálná soustava je připojena na svorkovnici přístroje KS 98. Ve vývojovém prostředí ET – KS existují bloky, které se vstupy a výstupy na svorkovnici dokáží pracovat.

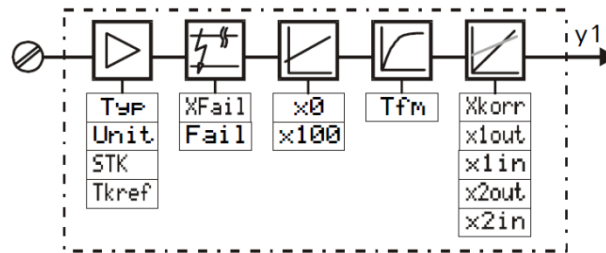
Blok AINP1 (analogový vstup 1)

Analogový vstup 1 je určen pro přímé připojení termočlánku, odporového teploměru, odporového vysílače a standartních signálů. Funkční blok *AINP1* slouží k nastavení parametrů vstupu *INP1* na svorkovnici. Signál je prostřednictvím tohoto bloku zpracováván každých 200 ms. Na výstupu bloku je zpracována veličina vycházející z výstupu soustavy [5].



Obrázek 12 – Blok *AINP1*

Měření veličiny na vstupu *INP1* probíhá sledem několika vnitřních bloků pro zpracování veličiny a její další použití (např. pro regulaci). Vnitřní struktura bloku *AINP1* je znázorněna na obrázku 13.



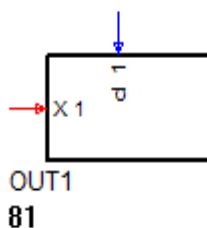
Obrázek 13 – Blokové schéma bloku AINP1 [5]

Zpracování měřené veličiny je provedeno podle následujících kroků [5]:

- Linearizace.
- Úprava měřítka (proudové a napěťové signály jsou převedeny na fyzikální rozměr).
- Filtrace (kromě analogového filtru je v cestě signálu umístěn i digitální filtr s nastavitelným koeficientem).
- Vzorkování (signál je vzorkován s periodou 100 ms).
- Korekce.
- Teplotní kompenzace.

Blok OUT1 a OUT2 (procesní výstupy 1 a 2)

Bloky *OUT1* a *OUT2* jsou určeny pro konfiguraci výstupů z přístroje, které jsou vyvedeny na svorkovnici. Ze svorkovnice signál dále pokračuje na vstup soustavy. Podle verze přístroje KS 98 jsou výstupy *OUT1* a *OUT2* spínací (reléové) nebo spojitě (analogové) [5].



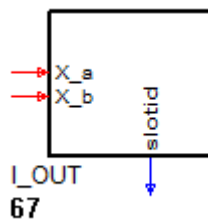
Obrázek 14 – Blok *OUT1*

Blok *OUT1* je znázorněn na obrázku 14. Vstup *X1* slouží pro spojitý výstup z regulátoru ve formě unifikovaných signálů. Binární vstup *d1* je určen pro spínací výstup z přístroje. Signál je zpracováván každých 100 ms [5].

V případě, že je přístroj dodán pouze se spínacími výstupy a uživatel potřebuje soustavu řídit spojitými signály, je k dispozici ještě také modulární deska C, kde mohou být umístěny moduly pro výstupní napěťové a proudové signály z přístroje.

Blok I_OUT (analogový výstup 0–20 mA, 2–20 mA nebo -20–20 mA)

Blokem *I_OUT* je konfigurován výstupní proudový modul na modulární desce C.



Obrázek 15 – Blok *I_OUT*

Blok kromě přepínače, který přepíná mezi jednotlivými unifikovanými signály a bloku, který upravuje měřítko výstupní veličiny, obsahuje celkem 2 kanály pro připojení 2 výstupních veličin z přístroje.

Z důvodu výkonového omezení lze použít pouze jeden modul *I_OUT*, protože modul *I_OUT* má výkonový faktor 70 %. Teoreticky by celkový výkonový faktor neměl překročit 100 %. Z toho vyplývá, že lze použít například jeden modul *I_OUT* a jeden modul *U_OUT*, který má výkonový faktor pouze 25 %. Takto lze *U_OUT* použít samozřejmě pouze tehdy, je-li na modulární desce k dispozici [5].

3.2.3 Bloky pro zobrazování veličin

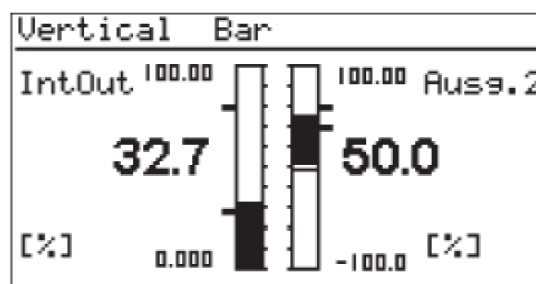
Průběhy jednotlivých veličin lze zobrazovat na čelním panelu ve formě různých zobrazovacích nástrojů nebo přímo ve vývojovém prostředí ET – KS.

Blok LIREAD (čtení dat)

Blok *LIREAD* umožňuje zobrazení trendů jednotlivých signálů přímo ve vývojovém prostředí ET – KS. Podmínkou použití je nahrání struktury do přístroje nebo do simulačního programu SIM KS 98 – 1. Do funkčního bloku lze přivést 7 analogových hodnot a 12 binárních hodnot (5). Vyvolání funkce trendu ve vývojovém prostředí ET – KS je provedeno volbou v hlavním menu *Options* → *Trend*. Signál je při tomto zobrazení vzorkován s minimální periodou 1 s [5].

Blok VBAR (sloupcový graf)

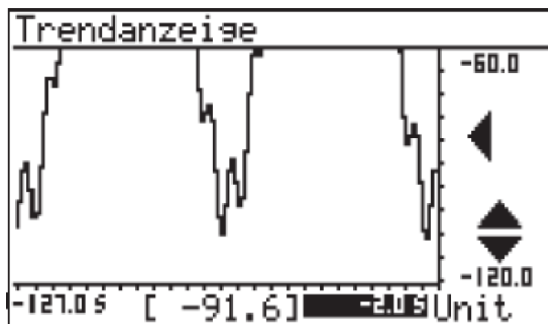
Blok umožňuje zobrazení na čelním panelu přístroje 2 analogových hodnot ve formě 2 sloupcových grafů a dalších 2 analogových hodnot v číselné formě. Další 4 vstupy jsou určeny pro definici různých omezení a limitů [5].



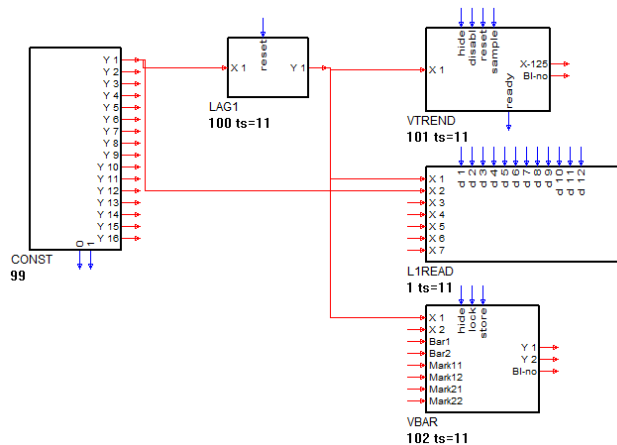
Obrázek 16 – Zobrazovací stránka *VBAR* na čelním panelu KS 98 – 1 [5]

Blok VTREND (zobrazení trendu)

Blok *VTREND* slouží k ukládání 125 analogových hodnot do posuvného registru, který je po naplnění vyprázdňen, a plnění registru začíná opět od 0. Jednotlivé hodnoty v registru jsou zobrazeny na čelním panelu jako funkce trendu [5].



Obrázek 17 – Zobrazovací stránka *VTREND* na čelním panelu KS 98 – 1 [5]



Obrázek 18 – Implementace bloků *VTREND*, *L1READ*, *VBAR*

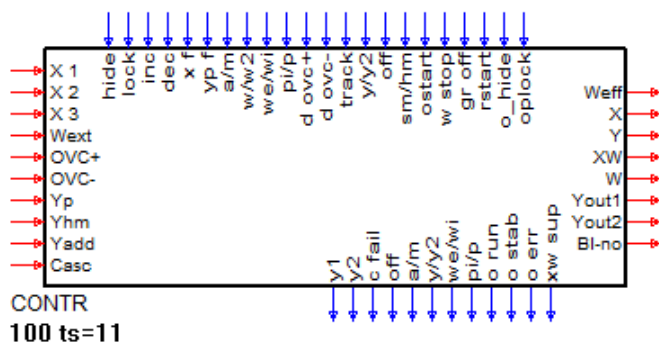
Na obrázku 18 jsou znázorněny 3 možnosti zobrazení veličin ve vývojovém prostředí ET – KS. V bloku *CONST* jsou deklarovány konstanty různých hodnot.

3.2.4 Bloky pro regulaci

Pro řízení regulované veličiny jsou v prostředí ET – KS k dispozici 3 základní bloky. Tyto bloky jsou multifunkční a dokážou realizovat různé regulační algoritmy. Bloky zpracovávají regulovanou veličinu každých 100 ms [5].

Bloky CONTR a CONTR+

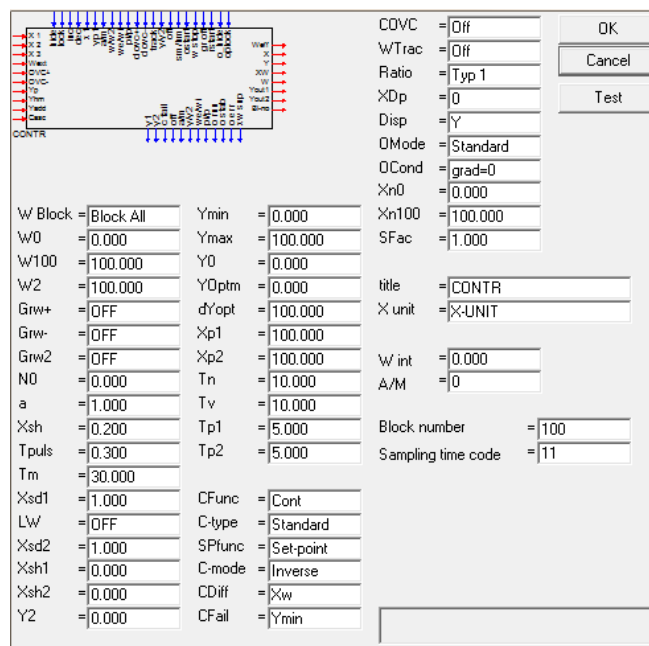
Blok *CONTR* obsahuje jednu sadu regulačních parametrů a má sériovou strukturu [5].



Obrázek 19 – Blok *CONTR*

Na obrázku 19 je zobrazen regulační blok *CONTR*. Blok má analogové i binární vstupy a výstupy. Z pohledu regulace jsou nejdůležitější vstupy a výstupy bloku X1, X, Y, y1 a y2. Na analogový vstup X1 je přivedena regulovaná veličina. Výstup Y představuje výslednou akční veličinu, která je následně přivedena prostřednictvím některého z výstupů regulátoru na vstup soustavy. Na výstupu X je zobrazena výsledná hodnota regulované veličiny. Na binárních výstupech y jsou obsaženy stavy spínacích výstupů například pro dvoustavovou regulaci [5].

Na obrázku 20 jsou zobrazeny jednotlivé parametry, které lze u bloku *CONTR* měnit. V okně *CFunc* lze vybírat z různých regulačních funkcí (např. *Signal 1* – reléový regulátor s jedním výstupem, *Signal 2* – reléový regulátor s 2 výstupy, *3-point* – 3-stavový regulátor, *Cont* – spojitý regulátor). Dále je nutné nastavit parametry, které jsou použity pro vykonání určité regulační funkce. Například pro spojitou regulační funkci *Cont* je především nutné nastavit parametry Xp1 (pásmo proporcionality 1), Xp2 (pásmo proporcionality 2), Tn (integrační čas) a Tv (derivační čas). Další parametry jsou používány pouze pro různé omezení signálů a pro jiné regulační funkce [5].

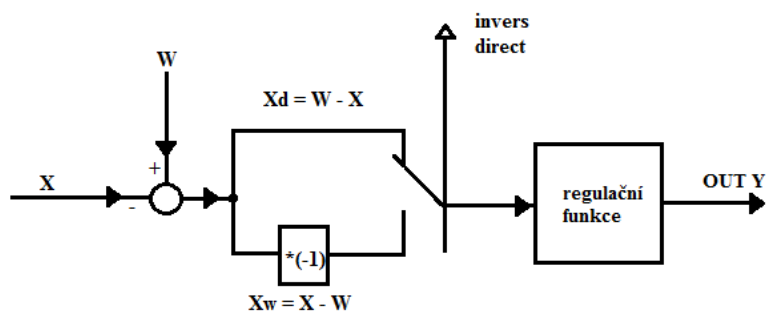


Obrázek 20 – Okno pro zadávání parametrů bloku *CONTR*

Parametrem *Cmode* lze přepínat mód měření regulační odchylky $e(t)$ [5]. Struktura přepínače je znázorněna na obrázku 21.

Stránka regulátoru *CONTR*, která je zobrazena na čelním panelu, je popsána na obrázku 8 v kapitole 3.1.

Stejně tak jako blok *CONTR* má i blok *CONTR+* sériovou strukturu. Rozdíl mezi bloky *CONTR* a *CONTR+* spočívá v počtu sad regulačních parametrů. Blok *CONTR+* jich má 6 [5]. V praxi to znamená, že analogovým vstupem *ParNo* bloku *CONTR+* je možné přepínat mezi jednotlivými sadami parametrů. Tímto způsobem lze řídit i soustavy, které nemusejí být zcela lineární.



Obrázek 21 – Vstupní struktura regulátoru *CONTR*

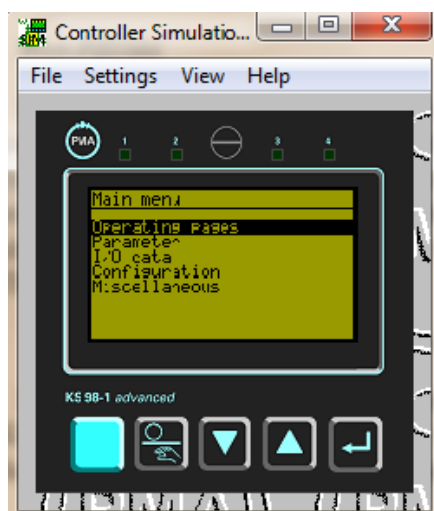
Blok *PIDMA*

Regulátor *PIDMA* má na rozdíl od předchozích regulačních bloků paralelní strukturu. Je určen pro obtížně regulovatelné procesy vyššího řádu nebo pro soustavy s velkým dopravním zpožděním. Další rozdíl představuje možnost snížení působení proporcionální a

derivační složky při změně žádané hodnoty a nastavitelné zesílení derivační složky. Všechny další regulační funkce jsou ovšem stejné s bloky *CONTR* a *CONTR+* [5].

3.2.5 Simulační program SIM KS 98 – 1

Pro ověření funkčnosti navržené struktury v ET – KS je určen simulační program SIM KS, který představuje virtuální přístroj ve formě programu. Chování tohoto programu by mělo být stejné jako chování reálného přístroje.



Obrázek 22 – Okno simulačního programu SIM KS 98 – 1

Podmínkou použití simulačního programu je správné nastavení verze přístroje a komunikace mezi vývojovým prostředím ET – KS a simulačním programem.

3.3 Regulační algoritmy

V této kapitole jsou popsány jednotlivé regulační funkce, které zajišťují správný a požadovaný průběh regulace. Obecně lze regulační funkce rozdělit na regulační funkce se spojitou akční veličinou a regulační funkce s nespojitou akční veličinou.

3.3.1 Regulační algoritmy se spojitou akční veličinou

Každý regulátor je složen z porovnávacího členu, kde se měří regulační odchylka, z panelu pro obsluhu a z hlavního, ústředního bloku, kde se zpracovává regulační odchylka, a podle regulační funkce je zvolen příslušný akční zásah. Spojitou časovou závislost mezi akční veličinou a regulační veličinou popisuje rovnice [6]:

$$u(t) = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.1)$$

Konstanta r_0 představuje celkové zesílení regulátoru. V praxi je ovšem možné se setkat s vyjádřením této konstanty pomocí pásma proporcionality [6]. Tento parametr se u průmyslových regulátorů zadává v procentech a jeho hodnotu lze určit podle rovnice:

$$\frac{X_p}{100} = \frac{1}{r_0} \quad (3.2)$$

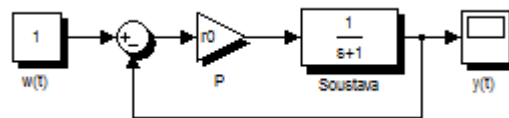
kde X_p – pásmo proporcionality, %

Pásmo proporcionality udává, jaká změna na vstupu regulátoru v procentech vyvolá 100% změnu na výstupu [6].

Písmeno P je určeno pro označení proporcionalní složky. Písmena I a D označují integrační a derivační složky regulátoru. Vzájemnou kombinací těchto složek vznikají libovolné regulační funkce. V praxi se ovšem nejčastěji používají regulátory typu P, PI, PD, PID [7].

Spojité P regulátor

P regulátor je určen pro jednoduché procesy. Vzniká sice trvalá regulační odchylka, ale na druhou stranu je P regulátor konstrukčně velmi jednoduchý. Jeho využití je spojeno se systémy, kde je možné zanedbat vzniklou regulační odchylku [7].

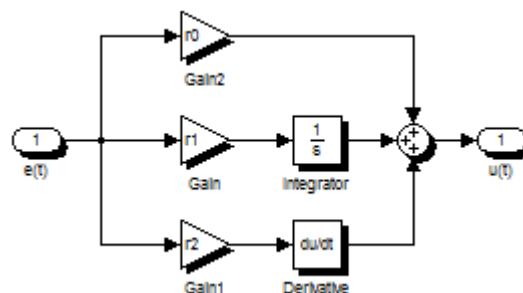


Obrázek 23 – Blokové schéma s P regulátorem v Simulinku

Na obrázku 23 je znázorněno řízení s použitím P regulátoru, který je realizován pomocí zesilovacího členu s proporcionalním zesílením r_0 .

Spojité PID regulátor (paralelní tvar)

PID regulátor je v současné době nejvyužívanějším prvkem v regulační technice. Je sestaven tak, aby pracoval bez trvalé regulační odchylky [1]. Je schopen dobře regulovat i velmi rychlé regulační procesy.

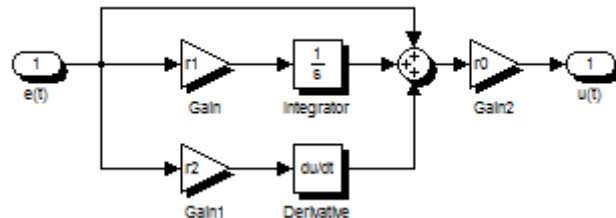


Obrázek 24 – Paralelní struktura spojitého PID regulátoru Simulinku

Na obrázku 24 je jedna z variant konstrukce vnitřní struktury PID regulátoru. Takto navržená struktura lze popsat rovnicí [6]:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + r_2 \frac{de(t)}{dt} \quad (3.3)$$

Rovnice (3.3) představuje jinou reprezentaci závislosti akční veličiny na regulační odchylce a platí, že $P = r_0$, $r_1 = I = r_0 / T_i$, $r_2 = D = r_0 T_d$ [6].

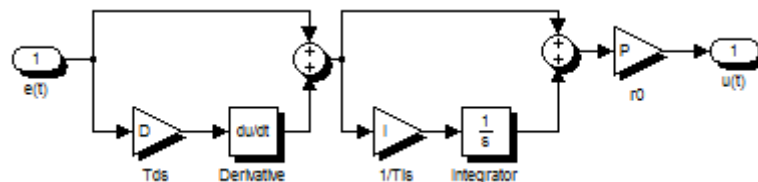


Obrázek 25 – Modifikace paralelní struktury PID regulátoru v Simulinku

Na obrázku 25 je znázorněna další z paralelních struktur PID regulátoru. Jedná se o tzv. ideální paralelní tvar s interakcí konstant. V tomto případě platí, že $P = r_0$, $r_1 = 1/T_i$ a $r_2 = T_d$. Pro přepočítání z konstant na obrázku 24 platí následující vztahy: $r_0 = r_0$, $T_i = r_0/r_1$, $T_d = r_2/r_0$. Algoritmus realizovaný podle obrázku 25 používá 31 % průmyslových PID regulátorů [6].

Spojitý PID regulátor (sériová struktura)

Průmyslové regulátory jsou nejčastěji realizovány pomocí sériové struktury. Sériová struktura PID regulátoru je zobrazena na obrázku 26 [6].



Obrázek 26 – Sériová struktura PID regulátoru v Simulinku

U sériového tvaru PID regulátoru existuje přepočítání konstant, kdy je možné z regulačních konstant sériového regulátoru zjistit regulační konstanty ideálního paralelního tvaru PID regulátoru [6]. Přepočítání jednotlivých konstant lze popsat rovnicemi [6]:

$$r_0 = r_{0s} \left(1 + \frac{T_{ds}}{T_{is}} \right) \quad (3.4)$$

$$T_i = r_0 \frac{T_{is}}{r_{0s}} \quad (3.5)$$

$$T_d = \frac{r_{0s} T_{ds}}{r_0} \quad (3.6)$$

Spojité PID regulátor s aproximovanou derivací

Modifikace PID regulátoru s aproximovanou derivací je využívána při rychlých změnách žádané hodnoty regulované veličiny, kdy při klasické struktuře PID regulátoru derivační složka reaguje na změnu nežádanými ostrými špičkami akční veličiny. Východiskem z tohoto problému je realizace struktury PID regulátoru tak, aby derivační složka byla odvozena pouze z okamžité hodnoty regulované veličiny [6]. Modifikovaný regulátor s aproximovanou derivací je popsán rovnicí [6]:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_0^t e(\tau) d\tau - r_2 \frac{dy(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Spojité PID regulátor s vážením žádané hodnoty

Tak jako lze u regulátoru s aproximovanou derivací odvozovat derivační složku, lze i u regulátoru s vážením žádané hodnoty odvozovat jak derivační tak dokonce i proporcionální složku z hodnoty regulované veličiny [6]. Závislost akční veličiny je popsána rovnicí [6]:

$$u(t) = r_0 \left[F_p w(t) - y(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} (F_d w(t) - y(t)) \right] \quad (3.8)$$

kde F_p – Váha proporcionální složky,

F_d – váha derivační složky.

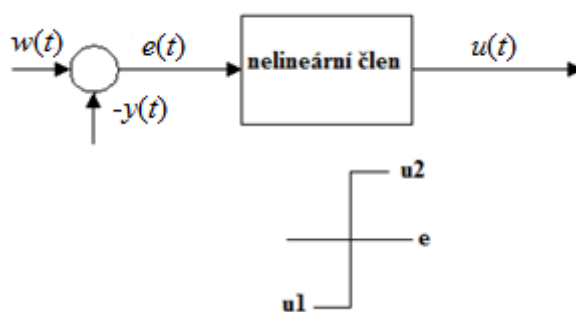
Koeficienty F_p a F_d jsou běžně nastavovány na hodnotu 1 nebo 0 (obecně to ale může být celý interval (0;1)). V případě, že jsou koeficienty F_p a F_d nastaveny na hodnotu 1, vykonává regulátor stejný algoritmus řízení jako regulátor v ideálním paralelním tvaru s interakcí konstant. V opačném případě, kdy jsou koeficienty F_p a F_d nastaveny na 0, je proporcionální i derivační složka odvozena pouze z hodnoty regulované veličiny. Hlavní výhodou implementace spojitěho PID regulátoru s vážením žádané hodnoty je především schopnost regulátoru uspokojivě reagovat na vzniklou poruchu, aniž by odezva na skokovou změnu žádané veličiny byla příliš kmitavá [6]. Regulátor je totiž možné nastavit dvěma způsoby. Regulátor může být nastaven tak, aby co nejlépe reagoval na možnou vzniklou poruchu nebo, aby zajišťoval co nejkvalitnější odezvu na skokovou změnu žádané veličiny. Modifikovaný regulátor zajišťuje kompromis mezi těmito dvěma možnými způsoby nastavení regulátoru.

3.3.2 Regulační algoritmy s nespojitou akční veličinou

Nespojitě regulátory se vyznačují tím, že výsledná akční veličina, která vychází z ústředního členu regulátoru, se nemění spojitě. Obvykle akční veličina u nespojitých regulátorů může nabývat 2 nebo 3 stavů.

Dvoustavový regulátor bez zpětné vazby

Základním prvkem dvoustavového regulátoru bez zpětné vazby je nelineární člen, jehož výstup nabývá 2 hodnot [8].



Obrázek 27 – Blokové schéma dvoustavového regulátoru bez zpětné vazby

Je-li regulační odchylka větší jak 0, potom žádaná veličina je větší než skutečná regulovaná veličina. Nelineární člen v tomto případě sepne výstup u_2 až do doby, dokud $e = 0$. Spínání jednotlivých výstupů je provedeno v časových periodách, které do jisté míry určují přesnost a kvalitu regulace. V opačném případě, kdy regulační odchylka je menší jak 0, nelineární člen sepne výstup u_1 [8].

Speciálním případem dvoustavového regulátoru bez zpětné vazby je použití relé jako nelineárního prvku, které podle hodnoty diference od žádané hodnoty spíná nebo naopak rozpojuje výstup z nelineárního prvku [8].

Problémem u dvoustavových regulátorů bez zpětné vazby je především kvalita jejich regulace u systémů s dopravním zpožděním. Normalizované dopravní zpoždění u běžně řízených procesů se pohybuje v rozmezí (0,05 až 0,3) s. Především z tohoto důvodu jsou využívány modifikované dvoustavové regulátory se zpožďující zpětnou vazbou [8].

Dvoustavový regulátor se zpožďující zpětnou vazbou

U modifikovaného dvoustavového regulátoru je zavedena záporná zpětná vazba z výstupu nelineárního členu zpět na jeho vstup. Chování regulátoru se zpětnou vazbou je analogické k chování PD regulátoru. Proto je běžně tento regulátor označován jako nespojitý PD regulátor. Zavedením zpožďující zpětné vazby se výrazně snižuje rozkmit regulované veličiny, avšak vzniká trvalá regulační odchylka [8].

Obrazový přenos zpožďující zpětné vazby je popsán rovnicí [8]:

$$G_{zv}(s) = \frac{K_{zv}}{T_{zv} s + 1} \quad (3.9)$$

Pro nastavení PD regulátoru se používají pravidla podle Oppelta. Jednotlivé koeficienty, včetně koeficientů zpětné vazby, jsou vypočítány podle rovnic [8]:

$$r_0 = \left(\frac{1}{2K} \right) \left(\frac{T_g}{T_u} \right), \quad T_d = 0,25 T_u \quad (3.10)$$

$$K_{zv} = \left(\frac{K}{1,2} \right) \left(\frac{T_u}{T_g} \right), \quad T_{zv} = 0,25 T_u \quad (3.11)$$

Třístavový regulátor

Třístavový nebo také třípolohový regulátor je použit tehdy, je-li nutné regulovanou veličinu aktivně měnit v obou směrech. V této konfiguraci lze spínat např. jak topení tak i chlazení současně. Zjednodušeně to znamená, že mezi dvěma krajními body akční veličiny je ještě jedna (třetí) hodnota akční veličiny, kterou lze při regulaci uplatnit [8].

3.3.3 Optimální nastavení parametrů regulátoru

V případě, že je již navržena struktura a typ regulátoru s přihlédnutím na požadovanou funkci a kvalitu regulace, je vhodné určit optimální hodnoty parametrů. Nastavování jednotlivých parametrů bylo v minulosti řešeno podle experimentů, z kterých následně vznikla konkrétní pravidla. Nejpoužívanější metodou nastavení parametrů je metoda podle Zieglera a Nicholse [8].

Pravidla Zieglera a Nicholse

Metoda nastavení parametrů podle Zieglera a Nicholse existuje ve dvou variantách. První varianta spočívá v uvedení celého obvodu na mez stability, kdy na výstupu ze soustavy jsou patrné netlumené kmity s konstantní amplitudou. Frekvence těchto kmitů je rovna kritické frekvenci ($F_k = 1/T_k$) a zesílení P (r_k) regulátoru je dáno převrácenou hodnotou zesílení soustavy na této frekvenci [8].

Tabulka 2 – Nastavení parametrů PID regulátoru pro ustálené kmity [8]

Regulátor	r_0	T_i	T_d
P	$0,5 r_k$		
PI	$0,45 r_k$	$0,85 T_k$	
PID	$0,6 r_k$	$0,5 T_k$	$0,125 T_k$

Metoda pro ustálené kmity je však použitelná v omezeném rozsahu, ať už z technologických nebo provozních důvodů. Hlavně i proto se velmi často využívá druhá metoda nastavování parametrů, která vychází ze znalosti přechodové charakteristiky soustavy. Na základě doby průtahu T_u , doby náběhu T_g a statického zesílení K lze pak podle tabulky 3 odvodit jednotlivé složky regulátoru [8].

Tabulka 3 – Nastavení parametrů – metoda přechodové charakteristiky [8]

Regulátor	r_0	T_i	T_d
P	$1/(K T_u/T_g)$		
PI	$0,9/(K T_u/T_g)$	$3T_u$	
PID	$1,2/(K T_u/T_g)$	$2T_u$	$0,5T_u$

Pravidla pro nastavení parametrů podle Zieglera a Nicholse jsou použita zpravidla tehdy, je-li nutné optimálně reagovat na případnou vzniklou poruchovou veličinu nebo v případě,

kdy je požadováno, aby regulovaná veličina byla udržována na žádané hodnotě, a to za jakýchkoliv okolností. Pravidla nejsou příliš vhodná pro optimální odezvu na změnu žádané veličiny [6]. V tomto případě není kvalita regulace příliš dobrá. Odezva na změnu žádané veličiny je zobrazena vždy s určitým překmitem. K lepší odezvě na změnu žádané hodnoty by měla vést modifikace pravidel Zieglera a Nicholse [8].

Tabulka 4 – Modifikace nastavení podle Zieglera a Nicholse [8]

Přechodová odezva	r_0	T_i	T_d
S malým překmitem	$0,33r_k$	$0,5T_k$	$0,33T_k$
S velkým překmitem	$0,2r_k$	$0,5T_k$	$0,33T_k$

V současné době množství různých metod nastavování parametrů neustále narůstá, neboť nastavení lze jednoduše provést experimentální metodou, kdy je sledován regulační pochod, a podle potřeby se snižují nebo zvyšují jednotlivé složky.

3.3.4 Posouzení kvality regulace

Kvalita regulace je určena odezvou regulované veličiny na skokovou změnu žádané veličiny a odezvou regulované veličiny na poruchovou veličinu. Posuzován je především tvar a doba ustálení regulované veličiny.

Kvalita regulačního procesu je vyhodnocena na základě regulační plochy. Čím je plocha menší, tím je regulace kvalitnější. Kvalita je závislá na odchylce regulované veličiny od žádané veličiny. Existuje několik sumačních kritérií, které v závislosti na odchylce vypočítají kritérium kvality regulačního procesu. Mezi nejpoužívanější kritérium kvality regulace patří integrální sumační kritérium ITAE [2]:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3.12)$$

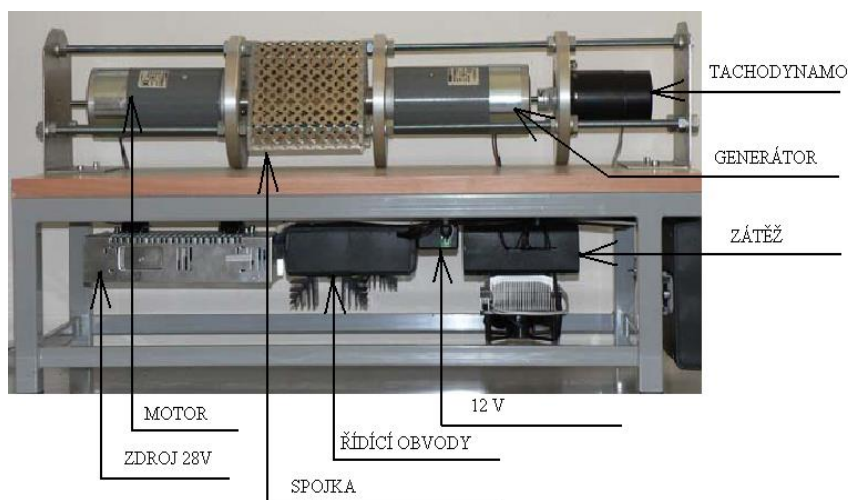
Tak jako u regulační plochy i pro parametr ITAE platí, že čím menší je parametr ITAE, tím je regulace kvalitnější [2]. V některých případech je sice parametr ITAE nízký, ale dochází k výraznému překmitu regulované veličiny. V tomto případě je kvalita posouzena s přihlédnutím na požadavky týkající se tvaru průběhu regulované veličiny.

4 Řízení soustavy motor – generátor

V této kapitole je zpracována praktická část diplomové práce. Pro znázornění jednotlivých regulačních funkcí nebo řídicích možností průmyslového regulátoru KS 98 – 1 je využita laboratorní reálná soustava motor – generátor. Výsledkem je pak především regulace otáček této soustavy.

4.1 Popis soustavy

Hlavní částí dynamické laboratorní soustavy je stejnosměrný motor, který je prostřednictvím pevné spojky spojen se stejnosměrným generátorem. Na svorky generátoru je připojena elektronická zátěž, která představuje možnou poruchu. Porucha působí na generátor zvýšením brzdného momentu, který způsobí náhlé snížení otáček. Stejnosměrný generátor generuje vlivem otáček motoru stejnosměrný proud, který je úměrný tomuto brzdnému momentu. Výsledné otáčky jsou snímány tachodynamem [9].

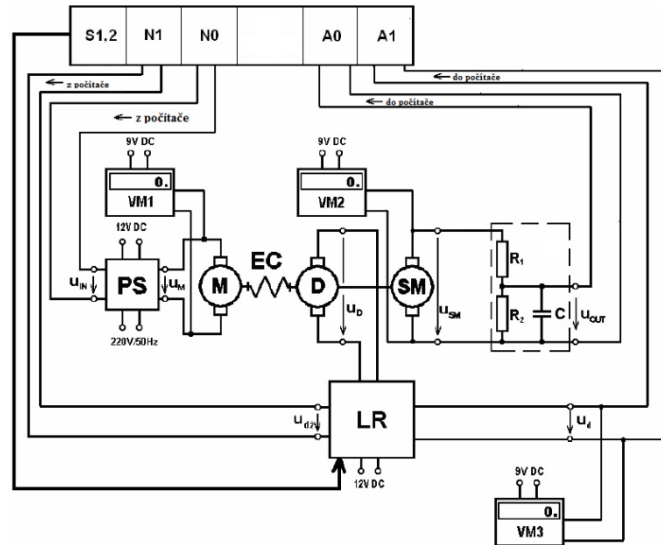


Obrázek 28 – Soustava motor – generátor

Soustava motor – generátor je zobrazena na obrázku 28. Zmíněné součásti soustavy jsou doplněny o další bloky potřebné k výsledné funkci soustavy. Napětí, kterým jsou řízeny otáčky motoru, je ve formě standardního unifikovaného signálu 0–10 V. Soustava obsahuje zdroj stejnosměrného motoru, který je řízen napětím 0–10 V na vstupu soustavy. Dále je součástí soustavy 12V zdroj, kterým jsou napájeny zbylé řídicí obvody.

Tabulka 5 – Funkce a označení bloků soustavy [9]

Označení signálu	Označení veličiny	Rozsah veličiny	Význam
N0	U_r	0–10 V	Vstupní budící napětí motoru
N1	$U_{dž}$	0–10 V	Nastavení proudu zátěží
A0	U_{out}	0–10 V	Výstupní napětí – otáčky
A1	U_d	0–10 V	Napětí na výstupu zátěže
S1		(0;5) V	Spínání kontaktu 1
S2		(0;5) V	Spínání kontaktu 2



PS – zdroj stejnosměrného motoru, M – stejnosměrný motor s permanentními magnety, EC – pevná spojka, D – stejnosměrný generátor, SM – tachodynamo K5A7-00 s převodní konstantou 20 V/ ot. min⁻¹, LR – elektronická zátěž.

Obrázek 29 – Blokové schéma soustavy motor – generátor [9]

Tabulka 6 – Funkce elektronické zátěže [9]

S1	S2	Funkce elektronické zátěže
0	0	Zátěž je odpojena
1	0	Zátěž se chová jako odpor na 100 % přednastaveného maxima
0	1	Zátěž se chová jako odpor na 50 % přednastaveného maxima
1	1	Proud zátěži je nastavován manuálně

Napětím U_f jsou ze svorkovnice řízeny otáčky motoru. Otáčky motoru jsou naopak na výstupu snímány napětím U_{out} , které je dáno napětím na svorkách tachodynama, snížené působením vstupního děliče na vstupu měřicí karty. Otáčky motoru jsou prostřednictvím tachodynama převedeny na napětí U_{SM} . Platí zde přepočty pro napětí U_{SM} a U_{out} [9]:

$$U_{out} = U_{SM} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.1)$$

$$k_{SM} = 1,2 = \frac{U_{SM}}{ot. s^{-1}} \quad (4.2)$$

Je-li například na výstupu napětí $U_{out} = 0,72$ V, je podle rovnic (4.1) a (4.2) napětí $U_{SM} = 4,8$ V, což odpovídá otáčkám motoru rovných 4 ot.s⁻¹.

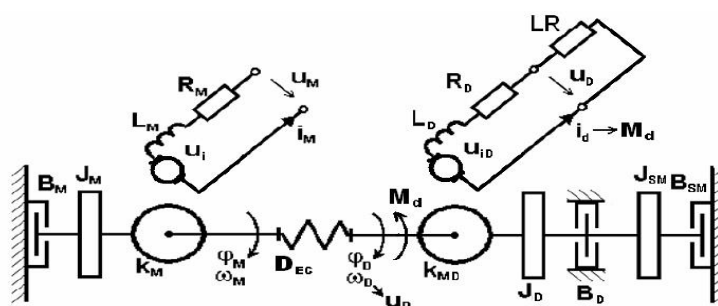
Poruchu lze manuálně nastavovat několika způsoby. Ovládat poruchu lze přepínačem S1 a S2. Jednotlivé funkce přepínačů popisuje tabulka 6, kde jsou znázorněny logické stavy spínačů pro sepnutý stav a pro vypnutý stav. Ke každé kombinaci je uvedena funkce zátěže. Proud, který protéká zátěží, je snímán na výstupu A1 prostřednictvím napětí U_d . Platí zde přibližný přepočty 1 V = 1 A [9].

4.2 Model soustavy

Každou reálnou soustavu je možné nahradit určitým modelem, který svým chováním aproximuje chování skutečné soustavy. U modelování je důležitá především matematicko-fyzikální analýza. S modelem lze dále pracovat tak jako s reálnou soustavou. Například je možné ho použít při návrhu regulátoru pro řízení otáček, aniž by bylo nutné využívat reálnou soustavu.

4.2.1 Matematicko-fyzikální analýza

Při matematicko-fyzikální analýze je nutné znát vnitřní strukturu a parametry soustavy. Jednotlivé prvky soustavy lze zjednodušit a nahradit je mechanickými a elektronickými prvky s určitými fyzikálními vlastnostmi. Zjednodušené mechanické a elektronické schéma soustavy je znázorněno na obrázku 30.



Obrázek 30 – Náhradní schéma soustavy

Základem matematicko-fyzikální analýzy je bilancování energií, z kterého jsou následně sestaveny diferenciální rovnice s konstantními parametry. Výpočet matematického modelu soustavy je převzat z dokumentace [9], popisující soustavu motor – generátor.

Úhel natočení motoru φ_M je závislý jak na koeficientu rotačního tlumení B , tak samozřejmě i na momentu setrvačnosti J . Pohyb hřídele vyvolává hnací moment motoru M_M , který je omezován brzdným momentem způsobujícím poruchu. Brzdný moment M_d je vyvoláván proudem odebíraným ze svorek generátoru. Celou soustavu lze popsat základní rovnicí:

$$(J_M + J_D + J_{SM})\ddot{\varphi}_M + (B_M + B_D + B_{SM})\dot{\varphi} = M_M - M_d \quad (4.3)$$

$$M_M = k_M i_M \quad (4.4)$$

Hnací moment motoru je závislý na konstantě motoru k_M a na proudu i_M , který motorem protéká. Proud motorem lze popsat diferenciální rovnicí (4.4).

$$U_M = R_M i_M + L_M \dot{i}_M + k_M \dot{\varphi}_M \quad (4.5)$$

Užitím L-transformace je rovnice (4.5) převedena do prostoru obrazů. Uvažujeme-li nulové počáteční podmínky.

$$U_M(s) = R_M I_M(s) + s L_M I_M(s) + s k_M \Phi_M(s) \quad (4.6)$$

Z rovnice (4.6) lze pak jednoduchou úpravou vyjádřit obraz proudu i_M :

$$I_M(s) = \frac{U_M(s) - s k_M \Phi_M(s)}{R_M + s L_M} \quad (4.7)$$

Proud je dosazen do rovnice (4.4), která má následující výsledný tvar:

$$M_M = k_M \frac{U_M(s) - s k_M \Phi_M(s)}{R_M + s L_M} \quad (4.8)$$

Brzdňý moment generátoru je vyjádřen rovnicí:

$$M_d = k_D i_d \quad (4.9)$$

Rovnice (4.8) pro moment motoru a rovnice (4.9) pro brzdňý moment generátoru je zpět dosazena do základní rovnice (4.3), která je přepsána do tvaru obrazů pomocí Laplaceovy transformace. Výsledná rovnice po transformaci a po dosazení má tvar:

$$J \Phi(s) s^2 + B \Phi(s) s = k_M \frac{U_M(s) - s k_M \Phi_M(s)}{R_M + s L_M} - k_D i_d \quad (4.10)$$

V úvahu přichází zjednodušení, kdy derivace úhlu natočení hřídele je rovna úhlové rychlosti:

$$\Phi(s) s = \Omega_D(s) \cong \omega_D(t) \quad (4.11)$$

Výsledný vztah pro otáčky je ve tvaru:

$$\Omega_D(s) = \frac{k_M U_M(s) - (L_M s + R_M) k_D i_d}{(J s + B)(L_M s + R_M) + k_M^2} \quad (4.12)$$

Pro nulový brzdňý moment M_d (tzn. v době, kdy na soustavu nepůsobí porucha) budou otáčky ve tvaru rovnice:

$$\Omega_D(s) = \frac{k_M U_M(s)}{(J s + B)(L_M s + R_M) + k_M^2} \quad (4.13)$$

Přenosová funkce pro otáčky motoru má následující tvar:

$$F_{OT}(s) = \frac{k_M}{(J s + B)(L_M s + R_M) + k_M^2} \quad (4.14)$$

Vzhledem k tomu, že je motor spojen s generátorem prostřednictvím pevné spojky, jsou otáčky motoru rovny otáčkám generátoru.

V případě, kdy proud i_d vyvolává brzdný moment, který snižuje otáčky motoru, platí následující přenosová funkce pro otáčky:

$$F_{ZAT}(s) = \frac{-(L_M s + R_M)}{(J s + B)(L_M s + R_M) + k_M^2} \quad (4.15)$$

Proud odebíraný ze stejnosměrného generátoru je získán z diferenciální rovnice (4.16) popisující vnitřní strukturu generátoru.

$$U_i = (R_D + LR)i_d + L_D \dot{i}_d \quad (4.16)$$

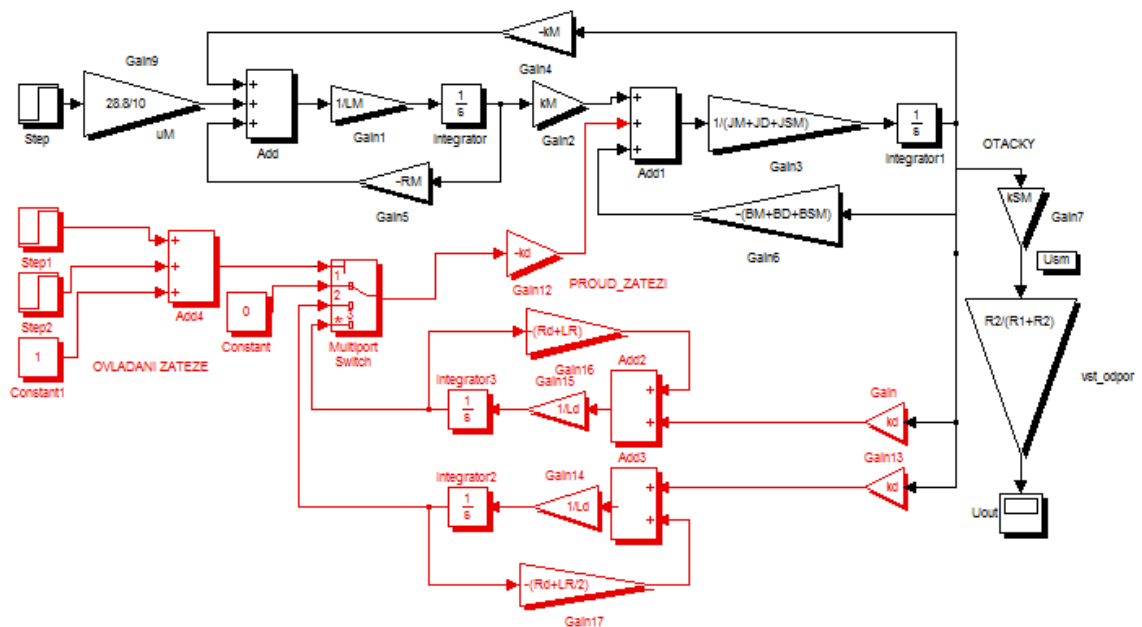
$$k_M \dot{\Phi}_D = (R_D + LR)i_d + L_D \dot{i}_d \quad (4.17)$$

Pomocí Laplaceovy transformace rovnice (4.17) lze odvodit vztah pro zatěžovací proud, který je závislý na otáčkách generátoru:

$$k_D \Phi_D(s) = (R_D + LR)I_D(s) + L_D I_D(s)s \quad (4.18)$$

$$I_D(s) = \frac{k_D \Phi_D(s)}{L_D s + (R_D + LR)} \quad (4.19)$$

Matematicko-fyzikální analýza poskytuje základní podklad k tomu, aby mohl být sestaven model ve vývojovém prostředí Simulink. Na obrázku 31 je znázorněn výsledný model soustavy motor – generátor.



Obrázek 31 – Model soustavy ve vývojovém prostředí Simulink

Na vstupu modelu je řídicí napětí U_r v rozsahu 0–10 V převedeno na napětí motoru U_M , přičemž platí že [9]:

$$U_M = U_r \cdot 2,88 \quad (4.20)$$

Na výstupu je do schématu zařazen blok pro převod otáček v jednotkách ot. s^{-1} na napětí U_{SM} . V cestě signálu je ještě také vstupní odpor měřicí karty. Zelenou barvou je označena část schématu, která slouží pro ovládání možné poruchy.

Tabulka 7 – Parametry modelu soustavy motor – generátor [9]

Označení	Název	Hodnota	Jednotka
k_M	Konstanta motoru	0,72	$\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$
k_{SM}	Převodní konstanta tachodynamy	20	$\text{V}/\text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$
J_M	Moment setrvačnosti motoru	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J_D	Moment setrvačnosti dynama	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
J_{SM}	Moment setrvačnosti tachodynamy	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
B_M	Viskózní tlumení motoru	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
B_D	Viskózní tlumení dynama	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
B_{SM}	Viskózní tlumení tachodynamy	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$
R_M	Odpor kotvy motoru	0,605	Ω
L_M	Indukčnost kotvy motoru	$1,6 \cdot 10^{-3}$	H
LR	Odpor zátěže generátoru	6,6	Ω
k_D	Konstanta generátoru	0,72	$\text{V} \cdot \text{s}^{-1}$
L_D	Indukčnost kotvy generátoru	$1,6 \cdot 10^{-3}$	H
R_1	Odpor děliče na vstupu karty	656,3	$\text{k} \cdot \Omega$
R_2	Odpor děliče na vstupu karty	114,7	$\text{k} \cdot \Omega$

4.2.2 Experimentální identifikace

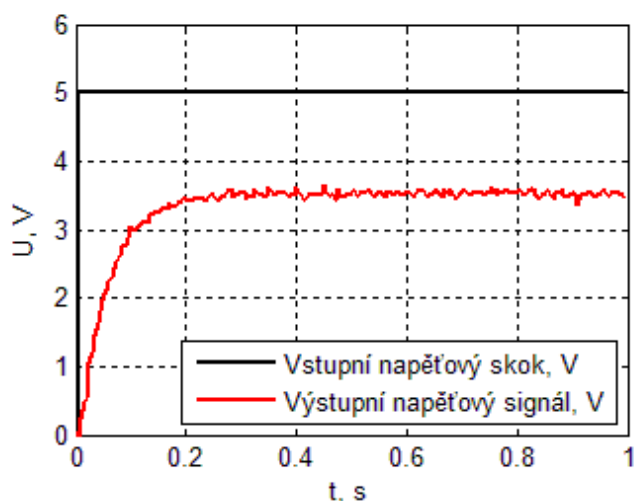
U experimentální identifikace je sestaven matematický model soustavy experimentálním způsobem s využitím dynamických vlastností soustavy. V praxi to znamená, že vhodné testovací signály jsou přivedeny na vstup a na výstupu je zaznamenána odezva na testovací signál. Experimentální identifikace je využita v případě, že není známa vnitřní struktura a parametry soustavy [3].

Nejprve je nutné zvolit strukturu přenosové funkce, která popisuje dynamické chování soustavy. V případě soustavy motor – generátor je zkoumána přenosová funkce, která zaznamenává odezvu otáček ve formě napětí U_{OUT} na vstupní napěťový skok řídicího napětí U_r . Pro dynamické chování výstupu motoru je zvolena následující struktura přenosové funkce:

$$F(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (4.21)$$

Úkolem experimentální identifikace je určit všechny parametry v přenosové funkci, která je definovaná rovnicí 4.21.

Experimentální data pro zjištění matematického modelu jsou zobrazena na obrázku 32. Výstupní signál je získán ve formě napětí, které odpovídá příslušným otáčkám motoru.



Obrázek 32 – Testovací a výstupní data pro experimentální identifikaci

Jako způsob řešení je použita simplexová metoda optimalizace. V Matlabu je vytvořen skript, který aproximuje výstupní napěťový signál a vytvoří vektor, ve kterém jsou uloženy jednotlivé koeficienty přenosové funkce. Na obrázku 33 je znázorněna zmíněná aproximace.

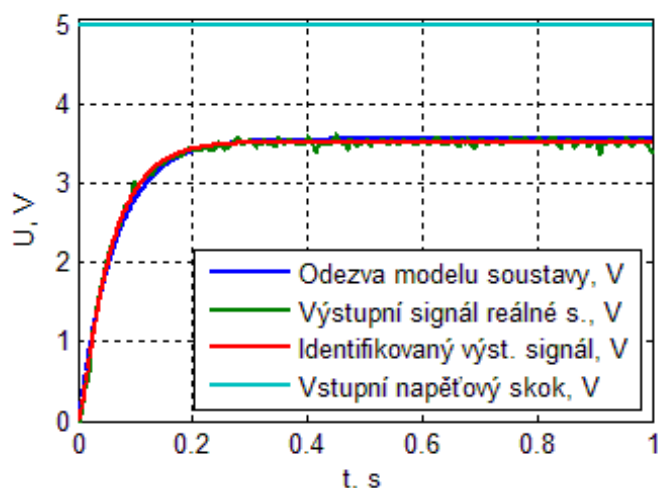
Nově získaná přenosová funkce, která vzniká jako důsledek experimentální identifikace, má tvar:

$$F_{OT}(s) = \frac{1679,2}{s^2 + 143s + 2377} \quad (4.22)$$

Skript řešící identifikaci modelu je přiložen v příloze diplomové práce.

4.2.3 Dynamické a statické chování soustavy

Dynamické chování soustavy je popsáno prostřednictvím přechodové charakteristiky soustavy motor – generátor, kdy je vykreslena časová závislost výstupní veličiny soustavy při přiložení jednotkového skoku na vstup soustavy.

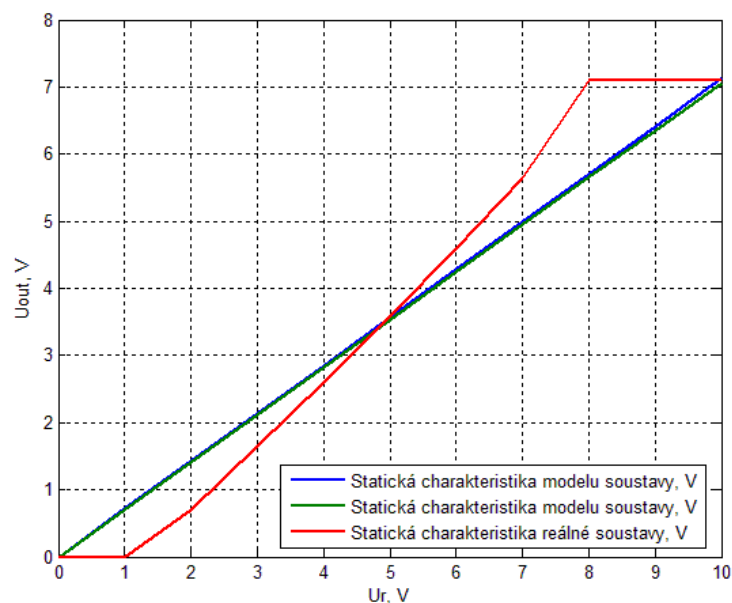


Obrázek 33 – Odezvy výstupu na napěťový skok na vstupu

Na obrázku 33 je zobrazeno porovnání modelu získaného matematicko-fyzikální analýzou a modelu, který je zjištěn metodou experimentální identifikace a reálné soustavy motor – generátor. Drobná odchylka od skutečné soustavy je patrná především u modelu (označen modrou barvou), který je vytvořen pomocí matematicko-fyzikální analýzy. V důsledku z tohoto faktu vyplývá, že experimentální identifikace pro zjištění parametrů přenosové funkce je přesnější než model vytvořený matematicko-fyzikální analýzou. Důvody mohou být různé. Nepřesnost může být způsobena nevhodným zaokrouhlením některého z parametrů soustavy nebo dokonce jeho nepřesnou hodnotou.

Dynamické chování soustavy je nejčastěji zachyceno formou přechodové charakteristiky. Problém u soustavy motor – generátor nastává v případě, kdy je na vstup přiveden jednotkový skok. V tomto případě soustava nereaguje. Napětí je zatím příliš malé na to, aby se motor začal otáčet. Z tohoto důvodu je nutné posuzovat odezvu výstupního napětí soustavy na vstupní napěťový signál (v případě obrázku 33 na hodnotu 5 V).

Statické chování soustavy je popsáno statickou charakteristikou. Statická charakteristika zobrazuje závislost výstupního signálu (výstupního napětí U_{out}) na vstupním signálu (vstupní napětí U_r) v ustáleném stavu po doznění přechodového jevu.



Obrázek 34 – Porovnání statických charakteristik

Na obrázku 34 jsou znázorněny statické charakteristiky pro model a reálnou soustavu motor – generátor. Statické charakteristiky pro model jsou lineární. Podle obrázku 34 statická charakteristika reálné soustavy představuje odchylku od lineární statické charakteristiky.

Pro správnou identifikaci soustavy v celém rozsahu by musela být provedena identifikace s několika různými vstupními napěťovými skoky pro určitý lineární úsek statické charakteristiky reálné soustavy, který má v každém bodě stejnou směrnici.

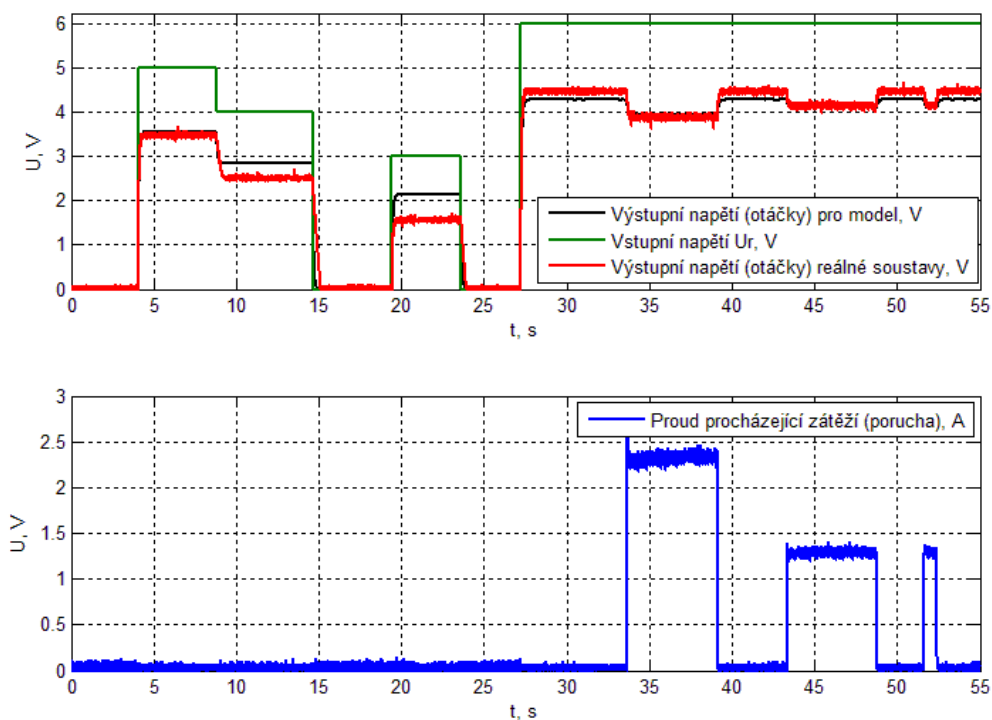
Průnik uvedených statických charakteristik je zaznamenán pouze v jednom bodě, kdy má vstupní napětí U_r hodnotu 5 V a výstupní napětí U_{out} hodnotu 3,55 V. Všechna data pro konstrukci statické charakteristiky jsou uvedena v tabulce 8.

Tabulka 8 – Data získaná z modelu soustavy a z reálné soustavy

U_r	Data pro model 1		Data pro model 2		Data pro reálnou soustavu	
	U_{out}	Zesílení	U_{out}	Zesílení	U_{out}	Zesílení
1	0,7131	0,7131	0,7064	0,7064	0	0
2	1,426	0,713	1,413	0,7065	0,69	0,345
3	2,139	0,713	2,119	0,706333	1,65	0,55
4	2,853	0,71325	2,826	0,7065	2,61	0,6525
5	3,566	0,7132	3,532	0,7064	3,59	0,718
6	4,279	0,713167	4,239	0,7065	4,58	0,763333
7	4,992	0,713143	4,945	0,706429	5,65	0,807143
8	5,705	0,713125	5,651	0,706375	7,1	0,8875
9	6,418	0,713111	6,358	0,706444	7,1	0,788889
10	7,131	0,7131	7,064	0,7064	7,1	0,71

Zelenou barvou v tabulce 8 je označen bod, který je téměř totožný pro všechny statické charakteristiky. Právě v tomto bodě je chování reálné soustavy shodné s chováním soustavy, která je popsána matematickým modelem.

Celé chování soustavy, včetně zobrazení důsledku, který vyvolá možná porucha, je znázorněno na obrázku 35.



Obrázek 35 – Porovnání funkce soustavy s modelem

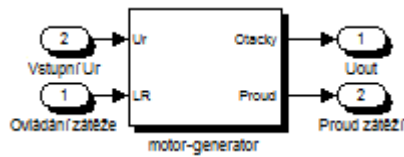
Odchyly modelu soustavy od reálné soustavy jsou viditelné na obrázku 35. Průběhy výstupních napětí U_{out} potvrzují tvar statických charakteristik. Pro krajní hodnoty vstupního napětí U_r je model soustavy velice nepřesný z důvodu nelinearity statické charakteristiky.

Z obrázku 35 je také patrná funkce proudu, který prochází zátěží. Čím více se zvýší proud zátěží, tím více se sníží otáčky (na obrázku 36 je proud uváděn v jednotkách V, ale platí, že 1 V je roven přibližně 1 A [9]).

4.2.4 Řízení modelu soustavy

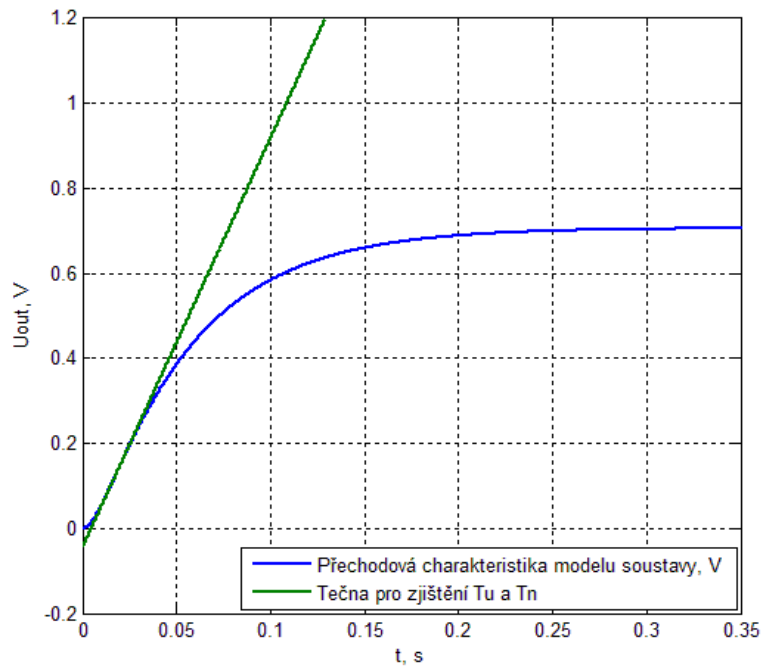
V této podkapitole je řešeno řízení modelu soustavy motor – generátor. Řízení modelu je realizováno ve vývojovém prostředí Simulink. Jako model je zde využíván model zjištěný matematicko-fyzikální analýzou.

Celý model soustavy je pro přehlednost zapouzdřen do jednoho bloku. Blok obsahuje vstupy a výstupy, ke kterým lze připojit řídicí prvek (regulátor).



Obrázek 36 – Zapouzdřený model soustavy motor – generátor

Model soustavy motor – generátor je řízen spojitým PID regulátorem. U této soustavy není příliš vhodné využít regulaci s nespojitou akční veličinou, neboť by frekvence spínání nelineárního členu nespojitě regulace musela být příliš vysoká. U PID regulátoru jsou jednotlivé koeficienty zjištěny metodou přechodové odezvy. Metoda přechodové odezvy je zvolena z důvodu špatné možnosti přivedení celého obvodu na mez stability. U soustavy druhého řádu totiž neexistuje frekvence (tzv. kritická frekvence, resp. odpovídající kritická perioda T_k), u které by bylo fázové zpoždění rovno 180° [8].



Obrázek 37 – Přechodová charakteristika pro zjištění T_u a T_g

Všechny potřebné koeficienty je nutné zjistit z přechodové odezvy na obrázku 37. Pro výpočet parametrů PID regulátoru je zapotřebí znát zesílení soustavy K , dobu průtahu T_u a dobu náběhu T_g (6).

$$K = 0,72; T_u = 0,0048 \text{ s}; T_g = 0,1037 \text{ s}; \Theta = T_u/T_g = 0,0463$$

$$r_0 = 1/\Theta = 1/0,0463 = 21,604 \quad (4.23)$$

$$T_i = 2 \cdot T_u = 2 \cdot 0,0048 = 0,0096 \text{ s} \quad (4.24)$$

$$T_d = 0,5 \cdot T_u = 0,5 \cdot 0,0048 = 0,0024 \text{ s} \quad (4.25)$$

$$r_1 = r_0/T_i = 21,604/0,0096 = 2\,298,298 \quad (4.26)$$

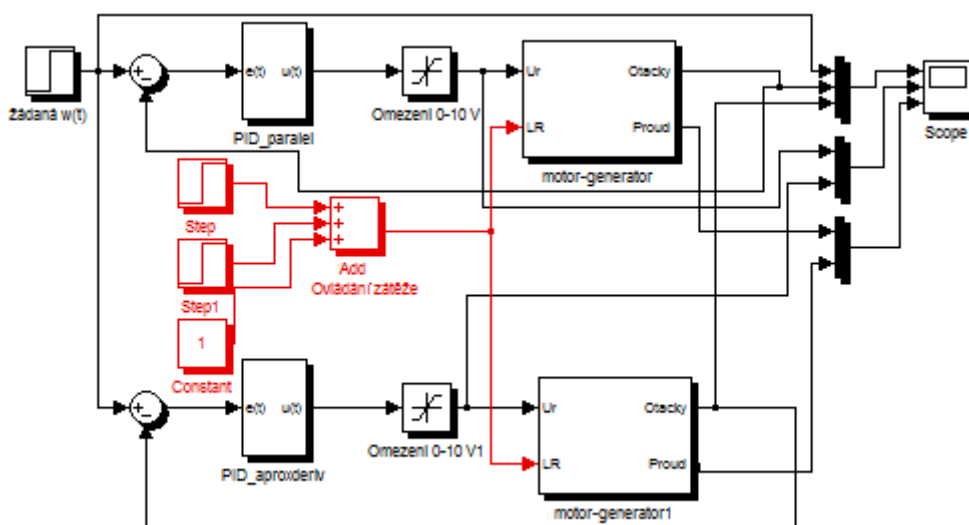
$$r_2 = r_0 \cdot T_d = 21,604 \cdot 0,0024 = 0,0518496 \quad (4.27)$$

Všechny vypočtené hodnoty koeficientů potřebných při realizaci regulátoru jsou zaznamenány v tabulce 9.

Tabulka 9 – Potřebné parametry pro řízení soustavy

Název konstanty	Označení konstanty	Hodnota	Jednotka
Zesílení	K	0,72	
Doba průtahu	T_u	0,0048	s
Doba náběhu	T_g	0,1037	s
Normalizované dopravní zpoždění	Θ	0,0463	
Proporcionální zesílení	r_0	21,604	
Integrační časová konstanta	T_i	0,0096	s
Derivační časová konstanta	T_d	0,0024	s
Zesílení integrace	r_1	2298,298	
Zesílení derivace	r_2	0,0518496	

Na obrázku 38 je znázorněn zpětnovazební regulační obvod. Jsou zde uvedeny dvě varianty struktury PID regulátoru. První varianta představuje klasický PID regulátor s paralelní strukturou s iterací konstant. U této varianty jsou zadávány konstanty r_0 , T_i a T_d .



Obrázek 38 – Schéma pro řízení modelu soustavy motor – generátor

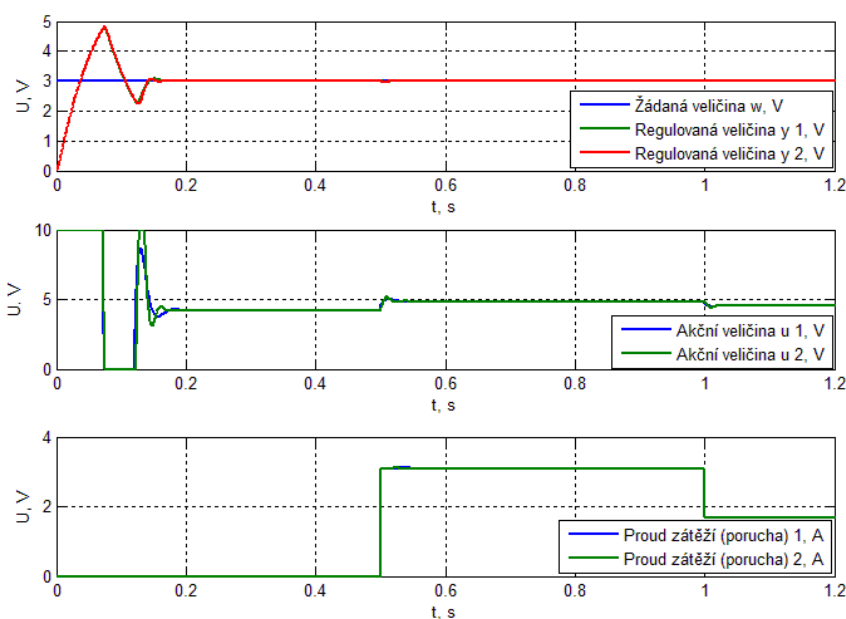
V druhé variantě PID regulátoru je implementována struktura regulátoru s aproximovanou derivací, která je využívána ve většině průmyslových regulátorů. U bloku *PID_aproxderiv* jsou zadávány konstanty r_0 , r_1 a r_2 . Přepočítání konstant je zaznamenáno v rovnicích (4.26) a (4.27). Důležité je zavedení omezení akční veličiny na výstupu regulátoru. Omezení je nutné zavést z důvodu omezeného napěťového rozsahu 0–10 V na vstupu soustavy. Červenou barvou je označena část obvodu, která slouží pro ovládání zátěže. Zátěž

představuje pro soustavu možnou poruchu způsobenou průchodem elektrického proudu zátěží [9]. Všechny veličiny jsou zaznamenány do grafů.

Na obrázku 39 je srovnání obou struktur PID regulátoru, které jsou využity v obvodu na obrázku 38. Regulované veličiny se téměř shodují. Jistá diference je znázorněna u akčních veličin regulátoru. Odezva na skokovou žádanou veličinu je velmi rychlá. Regulovaná veličina je ustálena přibližně již za 0,16 s.

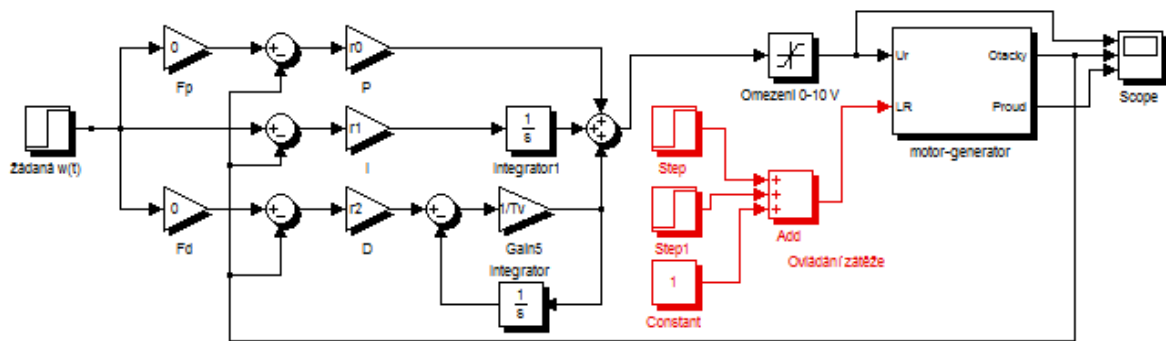
Z pohledu kvality regulace jsou dva možné pohledy na průběh regulačního pochodu. Pro eliminaci vzniklé poruchy se zdá být nastavení konstant regulátoru optimální, neboť porucha, která působí na soustavu, je zde eliminována téměř okamžitě.

Problém z pohledu kvality regulace, nastává při analýze průběhu odezvy regulované veličiny na skokovou změnu žádané veličiny. Odezva totiž obsahuje poměrně výrazný překmit. Tento výsledný poznatek je do částečné míry očekávaný. Protože, jak je uvedeno v teoretické části, nastavování konstant PID regulátoru podle Zieglera a Nicholse je vhodné při eliminaci možné poruchy a není vhodné pro regulaci, kde je požadavek na optimální odezvu regulované veličiny na skokovou změnu žádané veličiny.



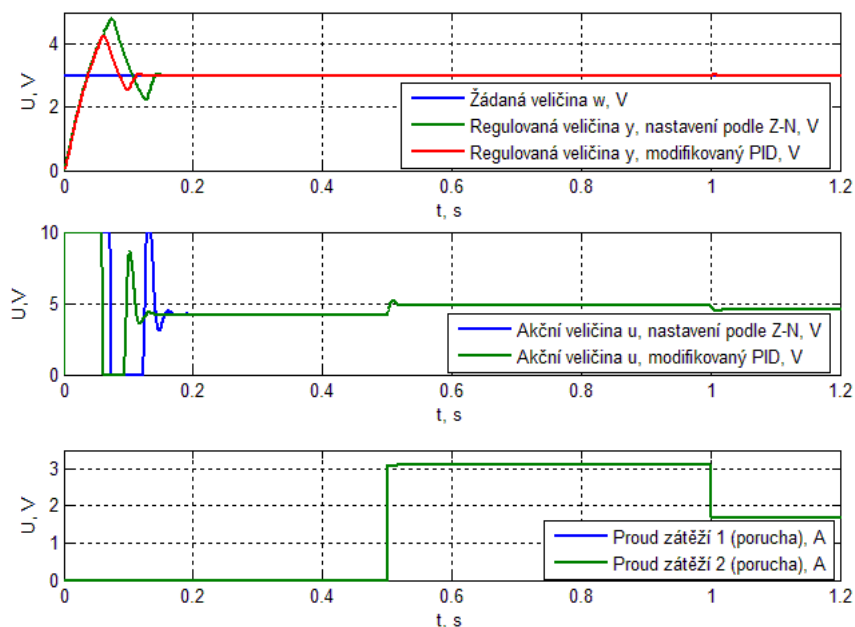
Obrázek 39 – Seřízení PID regulátoru podle Z-N

Lepší výsledek z pohledu odezvy regulované veličiny na skokovou změnu žádané veličiny by měla zaručovat modifikace PID regulátoru s váženou žádanou veličinou, zobrazená na obrázku 40. Nejzajímavější vlastností u této modifikace je odvození akčního zásahu proporcionalní a derivační složky z hodnoty regulované veličiny při nulových hodnotách parametrů F_p a F_d . Standardně, tak jako u integrační složky, je totiž akční zásah odvozen od regulační odchylky.



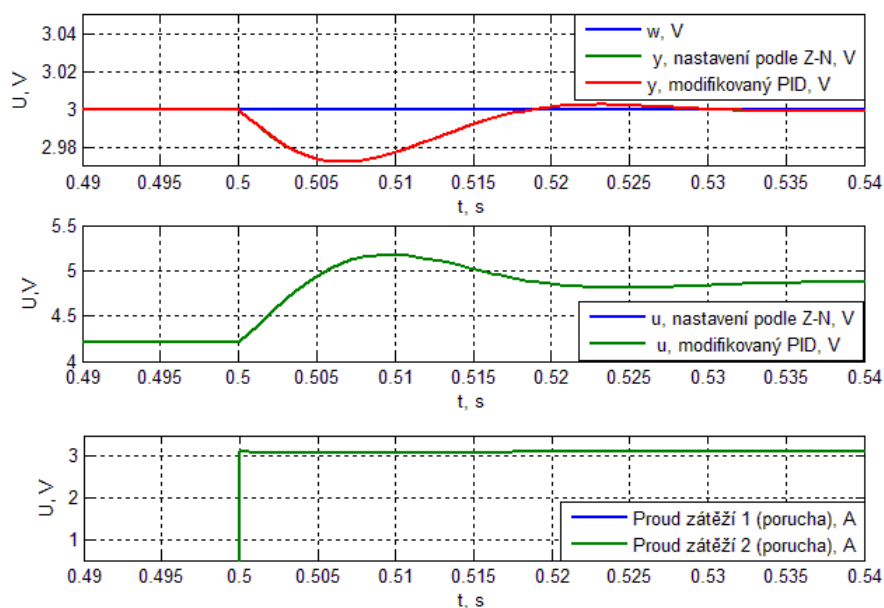
Obrázek 40 – Modifikace PID regulátoru s vážením žádané hodnoty

Výsledný regulační průběh modifikace PID regulátoru je zaznamenán na obrázku 41.



Obrázek 41 – Modifikace PID regulátoru

Z obrázku 41 je patrné, že překmit u regulované veličiny při skokové změně žádané veličiny je menší než u klasického regulátoru s paralelní strukturou. Nicméně stále průběh regulované veličiny obsahuje výrazný překmit. Eliminace poruchy má stejný charakter jako u klasického regulátoru.



Obrázek 42 – Eliminace poruchy

Rychlost eliminace poruchy je znázorněna na obrázku 42. Regulovaná veličina je ustálena již zhruba za 0,035 s. Za tento časový úsek je regulovaná veličina nepatrně zmenšena na hodnotu 2,978 V (při žádané hodnotě 3 V).

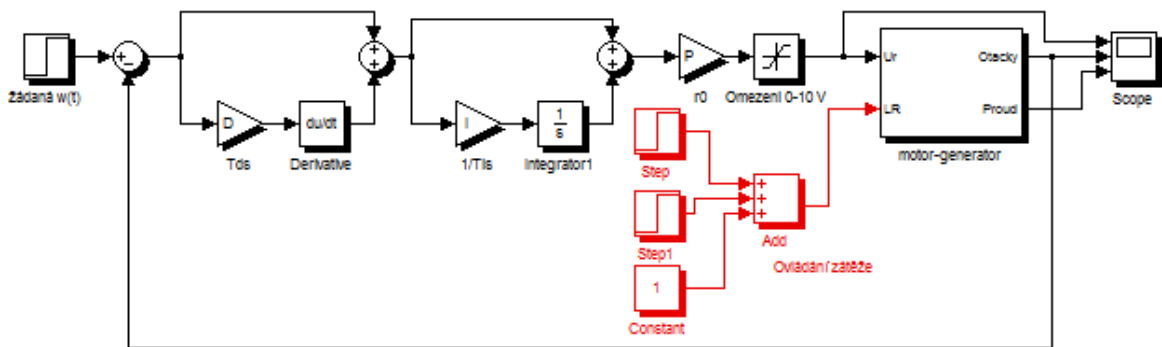
Aperiodický průběh regulované veličiny (tj. průběh bez překmitu) je zachycen na obrázku 44. Odezva regulované veličiny na skokovou změnu žádané veličiny neobsahuje již žádný překmit. Naopak co se týká eliminace poruchy, tak v případě této konfigurace regulátoru reaguje regulátor o dost pomaleji než v případě nastavení podle Zieglera a Nicholse.

Nastavení konstant PID regulátoru v případě obrázku 44 je provedeno experimentálně podle požadavků, které souvisejí s požadovaným tvarem regulačního pochodu. Konstanty PID regulátoru pro aperiodický průběh regulované veličiny jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 – Nastavení parametrů PID regulátoru pro aperiodický průběh

Zesílení	Označení	Hodnota
Proporcionální zesílení	r_0	0,72
Zesílení integrační složky	r_1	15
Zesílení derivační složky	r_2	0

Z důvodu velké četnosti sériové struktury PID regulátoru v průmyslových regulátorech je i v této kapitole tato struktura uvedena, včetně přepočtu jednotlivých koeficientů regulátoru. Schéma regulačního obvodu se sériovou strukturou PID regulátoru je znázorněno na obrázku 43.



Obrázek 43 – Sériová struktura PID regulátoru pro řízení soustavy

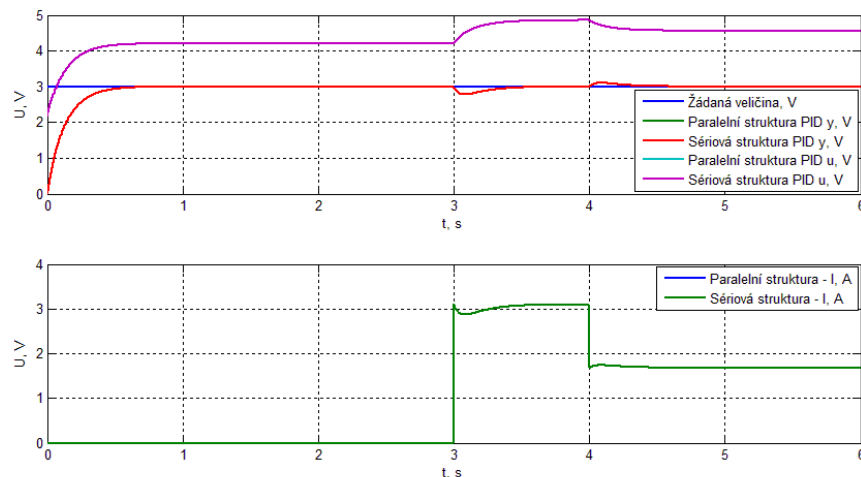
Pro sériovou strukturu na obrázku 43 jsou zvoleny konstanty, tak aby regulovaná veličina měla aperiodický charakter.

$$r_{0s} = 0,72; T_{is} = 0,06667 \text{ s}; T_{ds} = 0 \text{ s}$$

Z uvedených konstant pro sériovou strukturu jsou vypočítány nové konstanty, které mohou být aplikovány v paralelní struktuře PID regulátoru s interakcí konstant.

$$r_0 = r_{0s} \cdot (1 + T_{ds}/T_{is}) = 0,72 \cdot (1 + 0/0,06667) = 0,72; T_i = r_0 \cdot T_{is}/r_{0s} = 0,72 \cdot 0,06667/0,72 = 0,06667 \text{ s}; T_d = r_{0s} \cdot T_{ds}/r_0 = 0,72 \cdot 0/0,72 = 0$$

Pokud je transformován sériový PI regulátor na paralelní PI regulátor, konstanty zůstávají stejné.

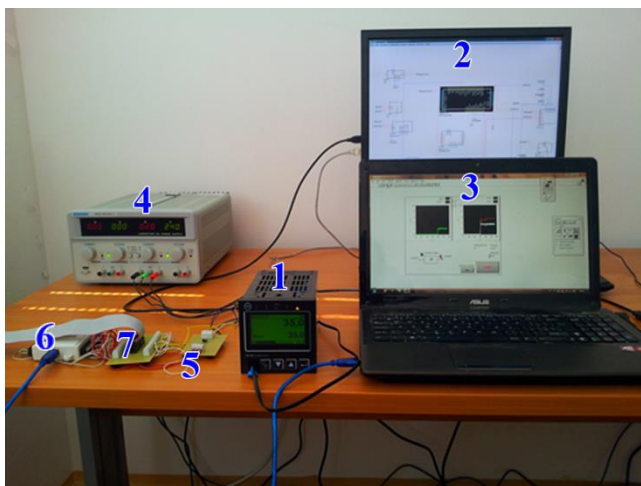


Obrázek 44 – Porovnání sériové a paralelní struktury PID regulátoru

Totožné jsou i regulační pochody obou variant struktur PID regulátoru, jak je patrné z obrázku 44.

4.3 Řízení reálné soustavy přístrojem KS 98 – 1

Laboratoř, ve které je realizována diplomová práce, se nachází v budově Fakulty elektrotechniky a informatiky v Pardubicích. V laboratoři jsou umístěny všechny komponenty, potřebné k realizaci řízení soustavy, včetně soustavy motor – generátor a průmyslového řídicího přístroje KS 98 – 1 od německé firmy PMA. Rozmístění jednotlivých komponentů úlohy je znázorněno na obrázku 45.



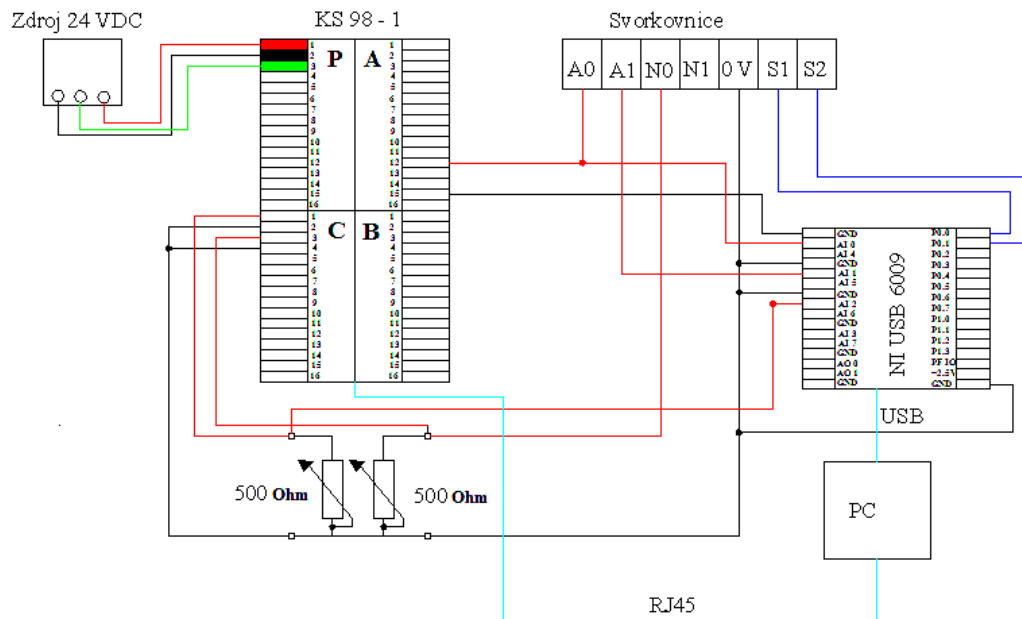
1 – Průmyslový regulátor PMA KS 98 – 1, 2 – Vývojové prostředí ET – KS pro naprogramování řídicích struktur regulátoru, 3 – Aplikace pro zobrazování veličin a pro ovládání zátěže soustavy motor – generátor, 4 – Zdroj 24 V DC pro napájení průmyslového regulátoru, 5 – Odporové trimry, 6 – Měřicí karta NI USB 6009, 7 – Svorkovnice pro připojení soustavy motor – generátor.

Obrázek 45 – Rozmístění úlohy v laboratoři

4.3.1 Zapojení a popis úlohy

Bloky pro potřebu řízení soustavy jsou mezi sebou propojeny tak, aby bylo možné správné řízení a měření veličin v požadovaném rozsahu.

Schéma, které je zobrazeno na obrázku 46, znázorňuje zapojení soustavy motor – generátor s průmyslovým řídicím systémem KS 98. Jednotlivé vývody z regulátoru jsou připojeny prostřednictvím svorkovnice na zadní stěně přístroje. Přístroj je napájen laboratorním zdrojem 24 VDC. Do regulátoru vstupuje signál A0 pro napětí U_{out} , které představuje výstupní otáčky [9].



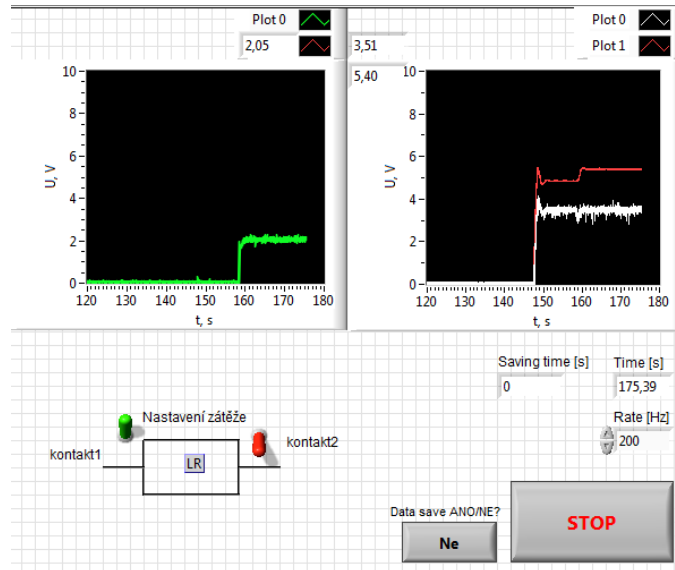
Obrázek 46 – Schéma zapojení celého systému s přístrojem KS 98 – 1

Z regulátoru na modulární desce C vystupuje proudový signál 0–20 mA. Verze přístroje, který je k dispozici v laboratoři, totiž nedisponuje napěťovým výstupem 0–10 V. Přístroj nabízí pouze možnost výstupu v podobě reléových výstupů. Na modulární desce C je ovšem k dispozici proudový modul I_{OUT} , který dodává do obvodu elektrický proud 0–20 mA. Proudový signál je následně přiveden na svorky odporového trimru, který má hodnotu 500 Ω a vlivem tohoto nastavitelného odporu je převeden na napětí 0–10 V, kterým již lze řídit reálnou soustavu. N0 je označení pro napětí U_r , které představuje řídicí napětí soustavy motor – generátor [9]. Svorkovnice na obrázku 48 je propojena přímo s reálnou soustavou.

Měřicí karta označená jako NI USB 6009 na obrázku 46 je určena pro zpracování výstupních veličin ze soustavy motor – generátor a pro ovládání případné poruchy. Karta má analogové nebo binární vstupy a výstupy a je napájena z osobního počítače přes USB kabel. Tuto kartu vyvinula firma National Instruments jako měřicí prostředek pro software, navržený ve vývojovém prostředí LabView.

4.3.2 Program pro zpracování veličin a pro ovládání poruchy

Pro ovládání poruchy a pro zpracování a zobrazení výstupních veličin je realizován program ve vývojovém prostředí LabView. Vývojové prostředí LabView obsahuje bloky, kterými lze komunikovat s měřicí kartou. Bloky je možné nejenom navzájem propojovat, ale také signály z těchto bloků přivádět na zobrazovací bloky nebo je ukládat do datové struktury pro další potřeby.



Obrázek 47 – Program pro měření veličin a pro ovládání poruchy

Program, který je znázorněn na obrázku 47, obsahuje:

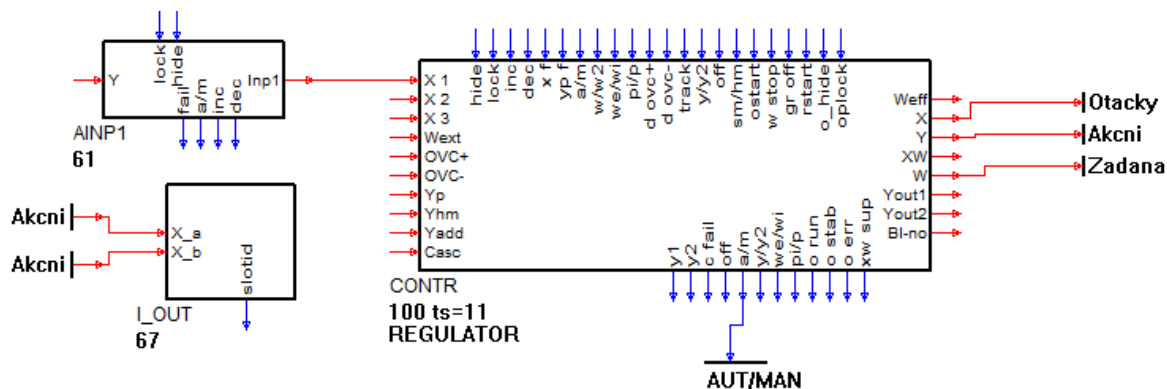
- Grafy pro zobrazení výstupních veličin ze soustavy.
- *Kontakt1* pro nastavení odporu zátěže na 100 % přednastaveného maxima.
- *Kontakt2* pro nastavení odporu zátěže na 50 % přednastaveného maxima.
- Tlačítko *STOP* pro ukončení aplikace.
- Tlačítko *Data save ANO/NE?* pro ukládání dat.
- Číselné zobrazovače času, času ukládání a frekvence čtení měřicí karty.

Na prvním grafu jsou zobrazeny otáčky motoru U_{out} (regulovaná veličina y) a řídicí napětí U_r (akční veličina u). Na druhém grafu je znázorněn průběh elektrického proudu procházejícího zátěží (poruchová veličina d).

Data jsou ukládána pomocí speciálního programu, který převádí binární soubor na soubor s příponou *.mat.*. Tento formát podporuje Matlab. V Matlabu lze následně data upravovat a zobrazovat podle potřeby.

4.3.3 Programová struktura v ET – KS

Soustava motor – generátor je řízena průmyslovým regulátorem KS 98 – 1. Aby mohl regulátor fungovat tak, jak má, je nejprve nutno vytvořit programovou strukturu ve vývojovém prostředí ET – KS.



Obrázek 48 – Základní programová struktura KS 98 – 1 pro řízení reálné soustavy

Regulovaná veličina (U_{out} (otáčky)) je přivedena do bloku regulátoru *CONTR* prostřednictvím bloku regulátoru *AINP1*. V bloku *AINP1* lze nastavit rozsah napěťového nebo proudového signálu. Výhodou volby proudového signálu 4–20 mA je snadná indikace poruchy přerušením obvodu. Blok *CONTR* používá sériovou strukturu PID regulátoru. Regulátorem vypočtený akční zásah je veden z regulátoru na proudový modul na desce C, odkud je přiváděn na vstup soustavy motor – generátor.

Blok regulátoru mimo jiné obsahuje i mnoho binárních vstupů a výstupů. Jedním z nich lze indikovat stav, kdy je možno otáčky nastavovat manuálně pomocí řídicího napětí nebo regulátorem podle řídicího algoritmu. Na proudový výstup je převedena akční veličina jak na výstup *a*, tak i na výstup *b*. Akční veličina se totiž nepřenáší pouze jenom na vstup soustavy, ale vstupuje do měřicí karty a je zobrazena v grafu programu pro zobrazování výstupních veličin.

Jednotlivé bloky jsou mezi sebou propojeny přímo datovým spojem nebo jsou spojeny pomocí virtuálních terminálů. Podstatou virtuálních terminálů je definice zdroje signálu, který má určité jméno a představuje adresu jednotlivého výstupu, k němuž lze přiřazením jeho adresy připojit libovolný vstup v programové struktuře.

Pro požadovanou funkci regulátoru je nutné nejprve všechny bloky v programové struktuře správně nastavit. Nastavení základních bloků pro řízení soustavy motor – generátor je popsáno v tabulce 11.

Tabulka 11 – Základní nastavení bloků v ET - KS

AINP1	Označení parametru	Popis parametru	Hodnota
	<i>Typ</i>	Typ měřeného signálu	0 – 10 V
	<i>Fail</i>	Detekce poruchy	<i>Upscale</i>
	<i>x0</i>	Fyzická hodnota veličiny pro 0 %	0
	<i>x100</i>	Fyzická hodnota veličiny pro 100 %	100
	<i>Tfm</i>	Časová konstanta filtru	0
CONTR	Označení parametru	Popis parametru	Hodnota
	<i>W0</i>	Spodní omezení žádané veličiny	0
	<i>W100</i>	Horní omezení žádané veličiny	100
	<i>Ymin</i>	Limit pro akční veličinu	0
	<i>Ymax</i>	Limit pro akční veličinu	100
	<i>Xp1</i>	Pásmo proporcionality 1	138 %
	<i>Xp2</i>	Pásmo proporcionality 2	138 %
	<i>Tn</i>	Integrační čas	0,1 s
	<i>Tv</i>	Derivační čas	0,1 s
	<i>CFunc</i>	Regulační funkce	<i>Cont</i>
	<i>C-mode</i>	Mód měření	<i>Inverse</i>
I_OUT	Označení parametru	Popis parametru	Hodnota
	<i>Type_a</i>	Typ signálu a	0 – 20 mA
	<i>Type_b</i>	Typ signálu b	0 – 20 mA

Napětí, které ze soustavy vystupuje, je zobrazeno na čelním panelu regulátoru v procentech. V důsledku to znamená, že pro napěťový signál 0–10 V odpovídá 100 % 10 V. V cestě signálu je kromě analogového filtru také číslicový filtr, jehož časovou konstantu lze nastavit parametrem *Tfm*. V programové struktuře pro řízení reálné soustavy je parametr *Tfm* nastaven na nulu. Výstupem *Fail* je detekována porucha, která může být způsobena např. odpojením vstupů regulátoru od soustavy. V případě režimu *Upscale* je detekována maximální hodnota (tzn. hodnota při 100 %) při rozpojení obvodu [5]. Výstup *Fail* je připojen na blok pro indikaci prostřednictvím LED na čelním panelu přístroje KS 98 – 1.

Nejdůležitějším prvkem pro řízení reálné soustavy je blok regulátoru. V tabulce 11 je popsáno nastavení bloku *CONTR* s jednou sadou regulačních parametrů. Přímou v nastavení bloku je velký počet různých parametrů, které lze nastavit, avšak v důsledku různých regulačních funkcí postačuje pro každou regulační funkci nastavit jen omezené množství parametrů. V tabulce 11 je zvolena spojitá regulační funkce *Cont*. Pro vybranou regulační funkci je potřebné určit především parametry *Xp1* resp. *Xp2*, *Tn* a *Tv*. Hlavně tyto parametry ovlivňují spojitý průběh akční veličiny [5].

Problém nastává při definici hodnot časových konstant regulátoru. Přístroj KS 98 – 1 totiž umožňuje nastavení hodnot časových konstant na minimální hodnotu 0,1 s [5]. Pro rychlou soustavu motor – generátor je to velmi vysoká hodnota. V diplomové práci je provedeno nastavení regulačních konstant metodou podle Zieglera a Nicholse, kde integrační časová konstanta je reprezentována jako hodnota 0,0096 s. V případě aperiodické regulační

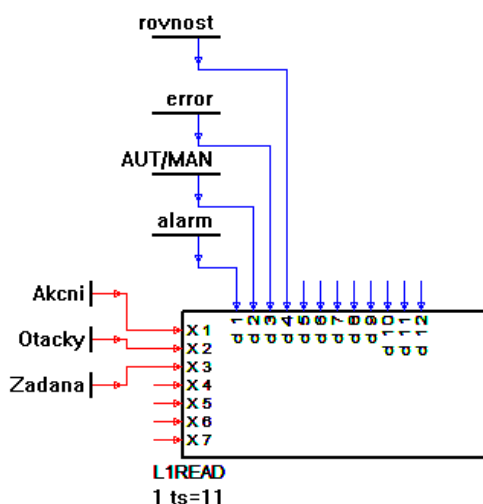
veličiny má tato časová konstanta přibližně hodnotu 0,06. Tyto hodnoty nelze v regulátoru KS 98 nastavit.

Tabulka 12 – Vlivy nastavení regulačních parametrů KS 98 – 1

Parametr		Regulace	Odezva na poruchu	Odezva na žádanou veličinu
X_p , %	vyšší	Větší tlumení	Pomalejší vyrovnání	Pomalejší redukce výkonu
	nižší	Menší tlumení	Rychlejší vyrovnání	Rychlejší redukce výkonu
T_v , s	vyšší	Menší tlumení	Rychlejší odezva	Dřívější redukce výkonu
	nižší	Větší tlumení	Pomalejší odezva	Pozdější redukce výkonu
T_n , s	vyšší	Větší tlumení	Pomalejší vyrovnání	Pomalejší změna výkonu
	nižší	Menší tlumení	Rychlejší vyrovnání	Rychlejší změna výkonu

Regulační parametry pro rychlou soustavu jsou nastaveny experimentálně. Pro vlastnosti regulačního procesu platí pravidla, které jsou stručně popsána v tabulce 12.

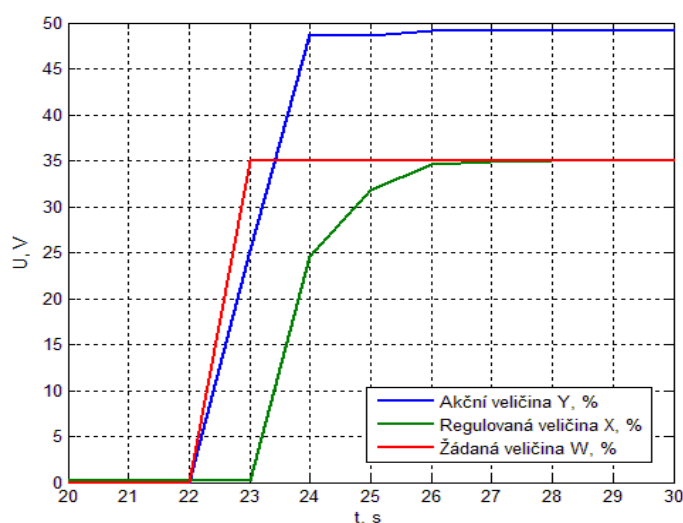
Zobrazování veličin je realizováno pomocí bloku *LIREAD*. Blok disponuje analogovými nebo digitálními vstupy a výstupy pro zobrazení požadovaných veličin. Zobrazení trendu umožňuje přímo vývojové prostředí ET – KS [5].



Obrázek 49 – Nastavení zobrazení trendů

Pomocí trendové funkce, v hlavní nabídce vývojového prostředí, je možné zobrazovat veličiny s periodou vzorkování 1 s. Perioda vzorkování je pro rychlou soustavu příliš vysoká. Průběhy výstupních veličin mají velmi špatnou vypovídající hodnotu, jak je patrné z obrázku 50.

Z důvodu potřeby vyšší periody vzorkování pro zobrazování veličin je sestavena aplikace v LabView, která je popsána v kapitole 4.3.2. Aplikace měří signál z výstupu regulátoru se vzorkovací periodou 0,005 s.



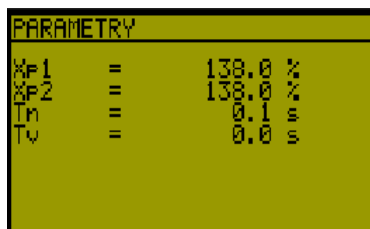
Obrázek 50 – Zobrazení veličin pomocí bloku *LIREAD*

Průběhy binárních signálů nejsou zobrazeny pouze ve formě dvoustavových průběhů, ale jsou indikovány ve formě LED diod, umístěných na čelním panelu, nebo dokonce změnou barvy displeje. Indikace různých stavů při řízení soustavy je znázorněna v tabulce 13.

Tabulka 13 – Indikace stavů

Stav	Indikace stavu
Překročení zadaného rozsahu <i>Y</i>	LED1 a červená barva displeje
Indikace manuálního režimu	LED2
Indikace poruchy soustavy	LED3
Indikace dosažení žádané hodnoty	LED4

Regulační parametry, které jsou pevně zvoleny při návrhu programové struktury, lze snadno nastavovat i při běhu regulace. V hlavní nabídce přístroje KS 98 je umístěna nabídka s názvem *PARAMETRY*. V nabídce je možné měnit regulační parametry pomocí ovládacích tlačítek umístěných na čelním panelu. Zadávání různých parametrů umožňuje v programové struktuře blok *V PARA* [5].



Obrázek 51 – Zadávání parametrů na čelním panelu KS 98 – 1

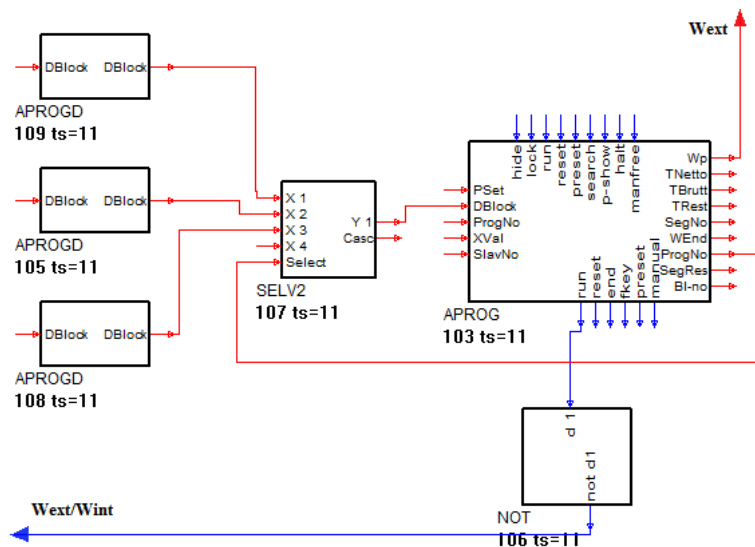
V programové struktuře je umístěn jeden alarm při překročení rozsahu akční veličiny, který je definován v bloku *ALARM* dvěma hodnotami, ohraničující tento rozsah. Alarm je indikován LED diodou a změnou barvy displeje.

Tabulka 14 – Nastavení alarmů

Dolní alarm pro akční veličinu	65 %
Horní alarm pro akční veličinu	10 %

Implementace programátoru

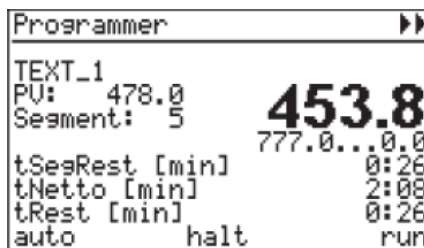
Programátorem lze řídit časový průběh regulačního pochodu. Programátor je do aplikační struktury implementován blokem *APROG*, který musí být spojen s blokem *APROGD*, kde se definují časové a úrovněvé hodnoty pro jednotlivé segmenty [5].



Obrázek 52 – Použití programátoru v aplikační struktuře

Počet bloků *APROGD* určuje počet všech dostupných programů. Číslo programu je vybráno na stránce programátoru obsluhou. Funkce programátoru spočívá v nastavení externí žádané hodnoty regulátoru v zadaný časový úsek (segment). Externí žádaná hodnota je vedena z výstupu W_p programátoru *APROG* na vstup W_{ext} regulátoru *CONTR*. K tomu, aby regulátor reagoval na externí žádanou hodnotu, musí být na binárním vstupu regulátoru *CONTR* nastavena hodnota *false* a zároveň parametr regulátoru *SPfunc* musí být nastaven na *SP/Casc*. Programová struktura s použitím bloku *APROG* je naznačena na obrázku 52.

Blok *SELV2* vybírá podle čísla programu časovou posloupnost hodnot, které jsou definovány v datových blocích *APROGD*. Negace *NOT*, která je napojena na binární výstup *run*, je zařazena do struktury z důvodu přepínání externí žádané hodnoty. V případě, kdy programátor je ve stavu stop nebo reset, žádaná hodnota je nastavena z ovládací stránky regulátoru *CONTR*.



Obrázek 53 – Stránka Programátoru [5]

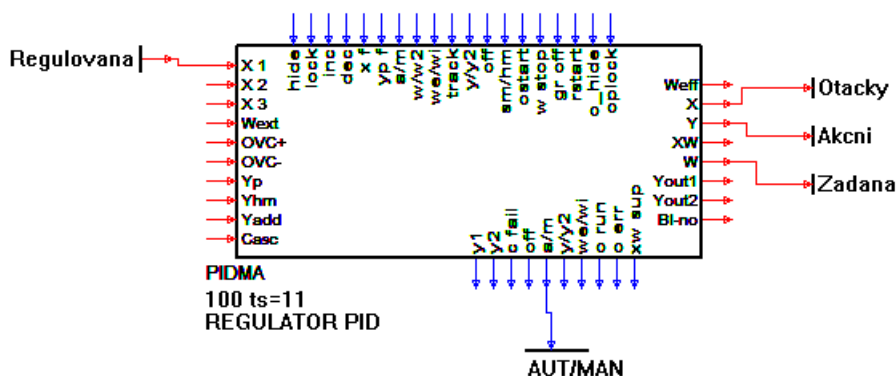
Program začíná povelom *run* na stránce programátoru. Stránka programátoru je umístěna v hlavní nabídce společně se stránkou regulátoru a stránkou s proměnnými parametry. Program, který je vykonáván, může skončit nebo se neustále cyklicky opakovat. V případě, že je v bloku *APROG* nastaveno ukončení programu ihned po uplynutí posledního segmentu, může obsluha povelom *reset* a *run* opět odstartovat program, který již uplynul nebo zvolit jiný program, který je definován v bloku *APROGD*. Stav, kdy je aktivní povel *reset*, umožňuje použití bloku regulátoru *CONTR* pro nastavení otáček.

Na stránce programátoru, která je znázorněna na obrázku 53, je zaznamenána doba programu (*tNetto*), číslo segmentu (*Segment*), žádaná hodnota pro příslušný segment a číslo programu [5].

Modifikace programové struktury s použitím bloku *PIDMA*

Kromě bloku *CONTR* nabízí vývojové prostředí ET – KS regulaci pomocí bloku *PIDMA*. Blok *PIDMA* je použit v jiné programové struktuře z důvodu omezeného počtu výstupů z přístroje. Programová struktura je téměř totožná s programovou strukturou, kde je použit blok *CONTR*, s výjimkou řídicího bloku *PIDMA*.

Regulační blok *PIDMA* s paralelní strukturou používá 1 sadu regulačních parametrů, přičemž rozdíl mezi blokem *PIDMA* a blokem *CONTR* spočívá v odlišném zadávání regulačních konstant. Pakliže u bloku *CONTR* je nutné určit pásmo proporcionality, tak u bloku *PIDMA* je nutné určit zesílení regulátoru K_p (T_v a T_n zůstávají stejné) [5].



Obrázek 54 – Implementace bloku *PIDMA*

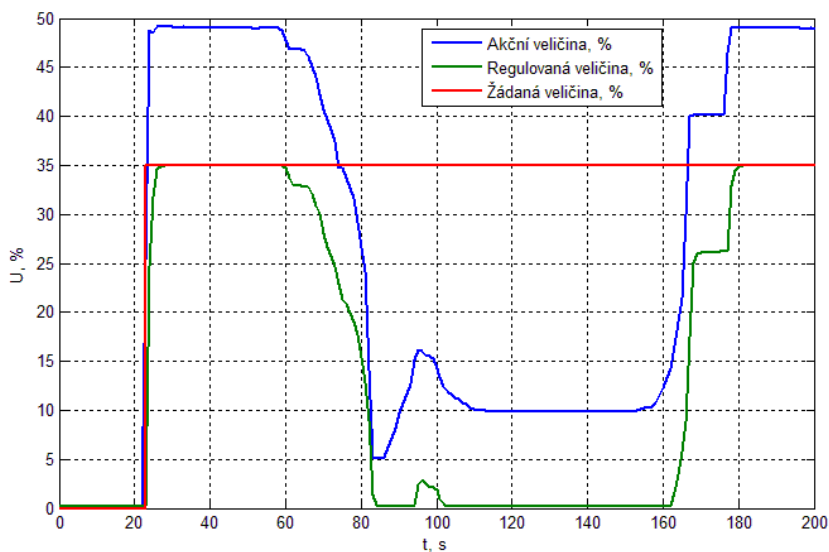
Zajímavé u bloku *PIDMA* je využití parametrů bW_p a cW_d , které blok *CONTR* nemá. Nastavením těchto parametrů umožňuje regulaci s „dvěma stupni volnosti“ [5]. Snížením

parametrů regulátor odlišně reaguje na změnu žádané hodnoty a na poruchu. Jestliže jsou parametry nastaveny na nulu, akční zásah u P a D složky je odvozen od okamžité hodnoty regulované veličiny.

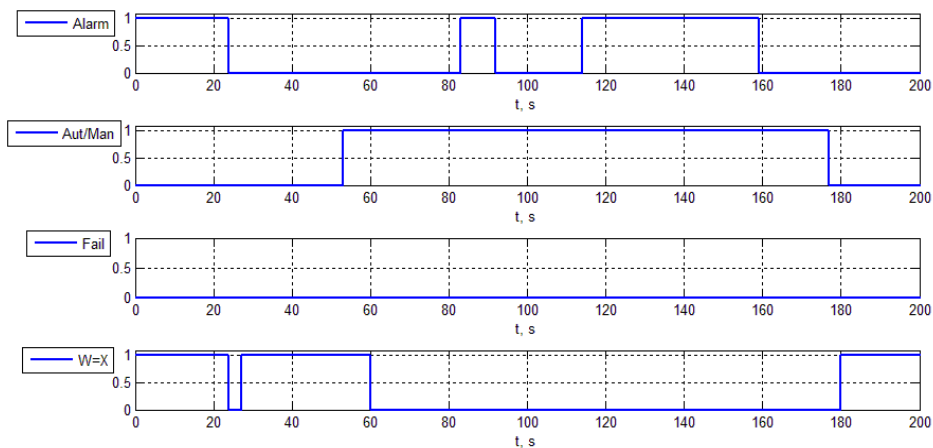
Všechny programové struktury jsou obsaženy v příloze diplomové práce.

4.3.4 Experimentální měření

V této kapitole jsou provedena měření k ověření správné činnosti regulátoru. Pro obrázek 55 a 56 jsou regulační funkce a konstanty nastaveny podle tabulky 11.



Obrázek 55 – Průběh řízení soustavy motor – generátor



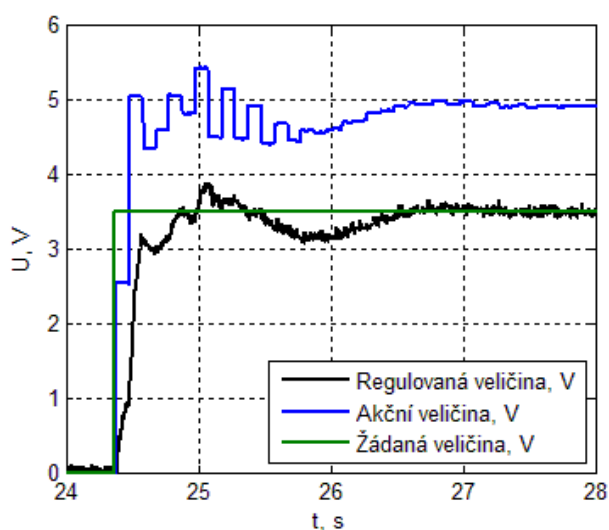
Obrázek 56 – Průběh logických stavů řízení soustavy motor – generátor

Obrázek 55 znázorňuje spojitě průběhy vstupních i výstupních veličin regulace otáček soustavy motor – generátor. Průběhy jsou zobrazeny pomocí trendové funkce v ET – KS.

Binární výstupy popisující stavy regulátoru jsou zobrazeny na obrázku 56. Je zde především patrné, v jaký okamžik obsluha regulátoru přepne tlačítko *Aut/ruka* pro ruční ovládání otáček. Logická hodnota *true* indikuje manuální nastavení regulátoru. V praxi tato indikace je výhodná v okamžik, dojde-li např. k technologické chybě ve výrobním procesu. V grafech jsou také znázorněny další stavy pro indikaci alarmu, indikaci dosažení žádané hodnoty při automatické regulaci nebo pro indikaci odpojení přístroje od soustavy.

Regulace pomocí bloku CONTR

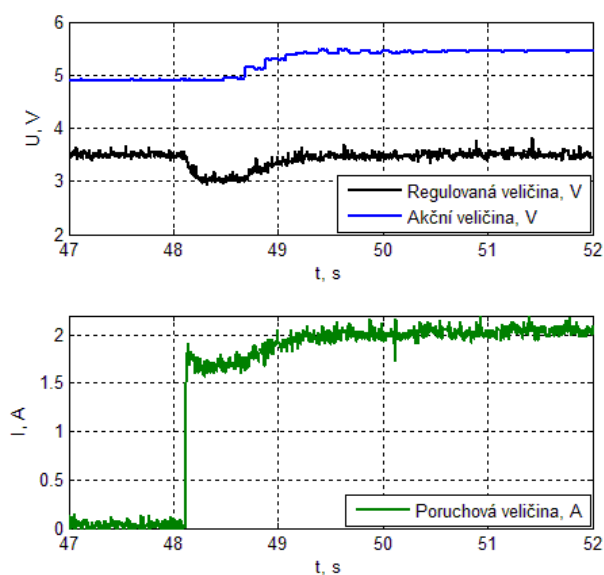
Regulace je zkoumána z hlediska odezvy na skokovou změnu žádané hodnoty a z hlediska eliminace vzniklé poruchy vlivem elektrického proudu, který prochází zátěží. Nejprve je posuzována regulace realizována pomocí bloku *CONTR*.



Obrázek 57 – Odezva na změnu žádané veličiny reálné soustavy motor – generátor

Na obrázku 57 je znázorněna odezva regulované veličiny na změnu žádané hodnoty z 0 V na 3,5 V. Viditelný je především průběh akční veličiny, který je vzorkován s periodou 0,1 s. Regulátor KS 98 je totiž od výrobce konstruován tak, aby vzorkoval vstupní signál s periodou 0,1 s. Blok *CONTR* regulátoru KS 98 představuje formu diskrétního PID regulátoru se sériovou strukturou.

Regulovaná veličina je ustálena zhruba až po 3 sekundách. Data jsou ze soustavy měřena programem pro zobrazování a ukládání veličin, který je navržen v prostředí LabView. I z obrázku 57 je patrné, jaký rozdíl je mezi zobrazením veličin v pomocném programu s periodou vzorkování 0,005 s a zobrazením pomocí trendové funkce v prostředí ET – KS s periodou vzorkování 1 s.

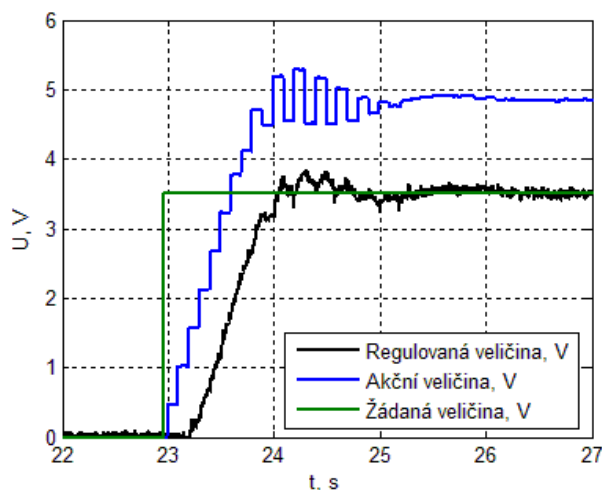


Obrázek 58 – Odezva reálné soustavy na poruchu

Porucha je eliminována po uplynutí 1,5 s. Hodnota času eliminace poruchy a času ustálení regulované veličiny není příliš pozitivní z hlediska kvality regulace. Pomalejší odezva souvisí s poměrně velkou hodnotou integrační časové konstanty a s faktem, že regulátor zpracovává vstupní veličiny s periodou vzorkování 0,1 s.

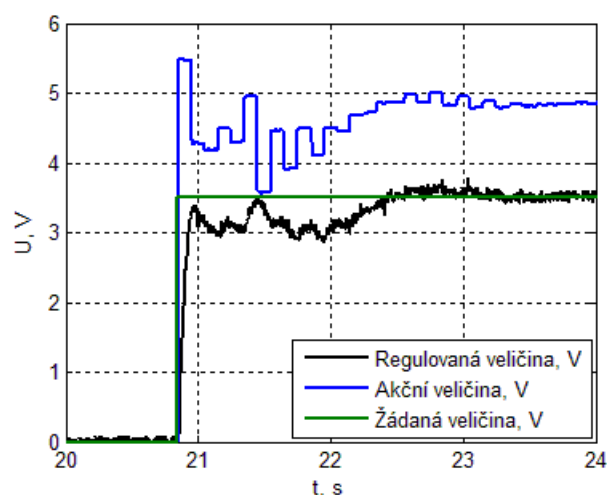
Regulace pomocí bloku PIDMA

Regulace blokem *PIDMA* využívá možnost nastavení parametrů pro vážení žádané hodnoty. Jsou zde realizovány regulační procesy pro dvě krajní hodnoty bW_p a cW_d (tzn. pro $bW_p, cW_d = 0$ a pro $bW_p, cW_d = 1$).



Obrázek 59 – Regulace pomocí bloku *PIDMA* s $bW_p = 0, cW_d = 0$

Regulační parametry jsou pro blok *PIDMA* nastaveny podle tabulky 15.

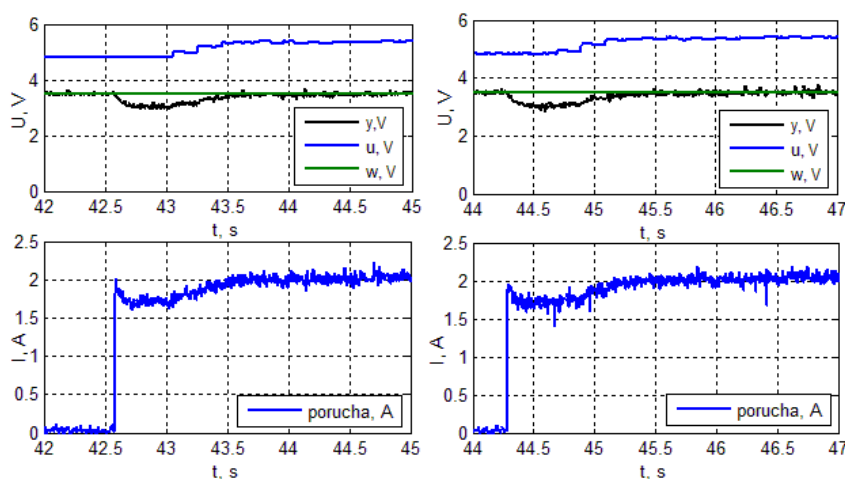


Obrázek 60 – Regulace pomocí bloku *PIDMA*

Tabulka 15 – Nastavení bloku *PIDMA*

Zesílení regulátoru	0,8
T_n	0,5 s
T_v	0,1 s

Průběh regulované a akční veličiny u regulátoru *PIDMA* s nastavením $bW_p, cW_d = 0$ (obrázek 59) je pozvolnější než průběh regulované a akční veličiny s nastavením $bW_p, cW_d = 1$ (obrázek 60). Integrovaná složka je odvozena od regulační odchylky, která je závislá na změně žádané veličiny. Složky P a D jsou odvozeny pouze z okamžité hodnoty regulované veličiny. Kvalita regulace je posouzena v další kapitole.



Obrázek 61 – Eliminace poruchy u bloku *PIDMA*

Z obrázku 61 je patrné, že i když mají veličiny odlišné průběhy při změně žádané hodnoty s různým nastavením vah žádané hodnoty, tak reakce regulátoru na vzniklou poruchu zůstává stejná.

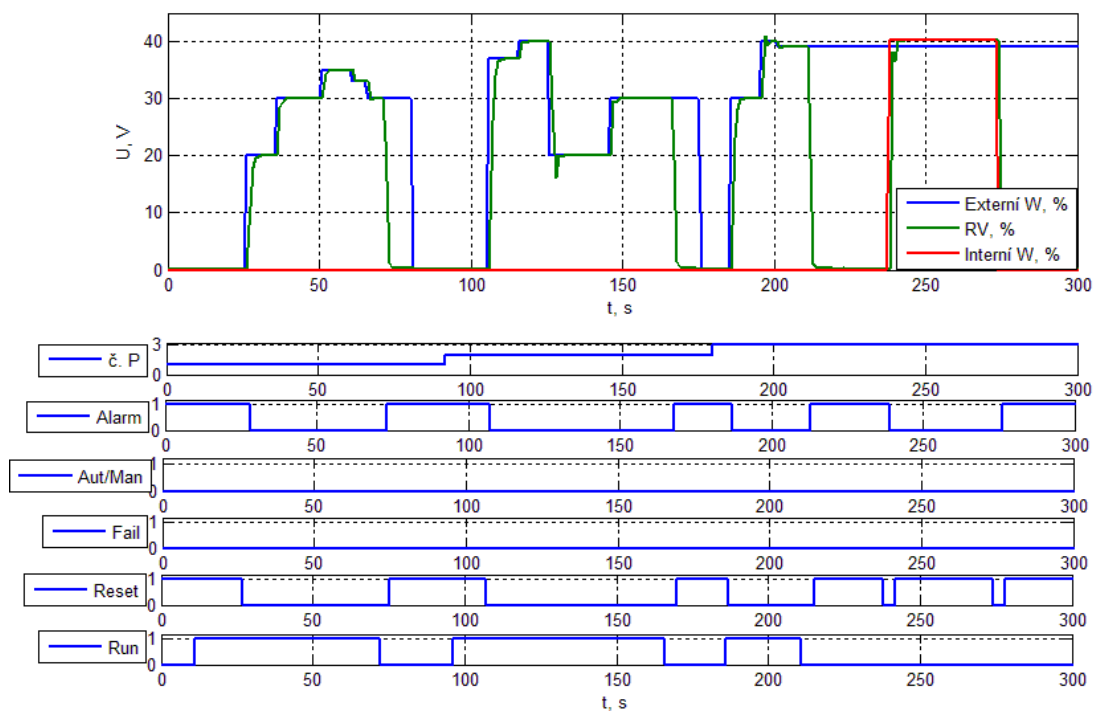
Řízení pomocí programátoru

Programátor je napojen na blok regulátoru *CONTR* a definuje, v jaký okamžik je přivedena na vstup W_{ext} regulátoru *CONTR* externí žádaná hodnota W_p . Ještě před regulací je nutné znát časové zadání programu. Popis časové posloupnosti jednotlivých segmentů je znázorněn v tabulce 16.

Tabulka 16 – Popis časové posloupnosti programátoru

Segment		Program č. 1	Program č. 2	Program č. 3
1	Doba trvání, s	15	10	10
	Hodnota, %	0	0	30
2	Doba trvání, s	10	10	5
	Hodnota, %	20	37	40
3	Doba trvání, s	15	10	10
	Hodnota, %	30	40	39
4	Doba trvání, s	10	20	stop
	Hodnota, %	35	20	stop
5	Doba trvání, s	5	20	stop
	Hodnota, %	33	30	stop
6	Doba trvání, s	5	stop	stop
	Hodnota, %	30	stop	stop

Programátor je nastaven tak, aby ihned po skončení daného programu ukončil svoji funkci. Po skončení je možné regulovanou veličinu řídit pomocí regulátoru *CONTR*.

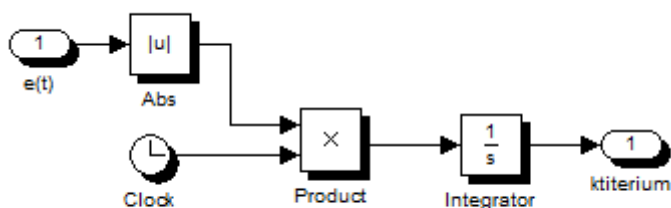


Obrázek 62 – Chod programátoru

Chod programu je znázorněn na obrázku 62. Na obrázku 62 je přesně viditelné, v jaký okamžik obsluha přístroje aktivuje povel *run* spuštění časové sekvence žádaných hodnot. Výstupem z programátoru *ProgNo* je hodnota aktuálně probíhajícího programu, která je na obrázku 62 znázorněna jako č. *P*.

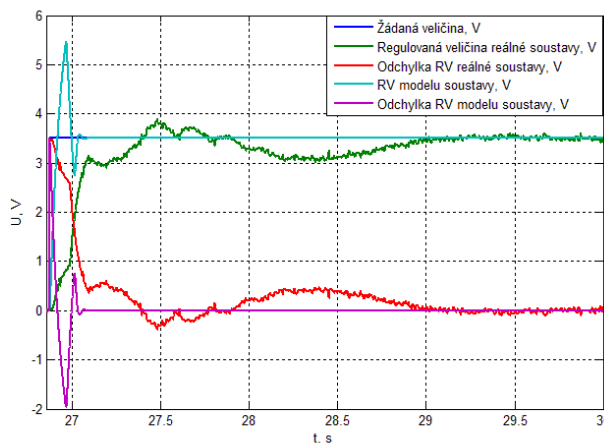
4.3.5 Vyhodnocení a kvalita regulace

Kvalita regulace je vyhodnocena pomocí integrálního, sumačního kritéria ITAE. Rovnice, která popisuje toto kritérium, je realizována blokovým schématem v Simulinku na obrázku 63.



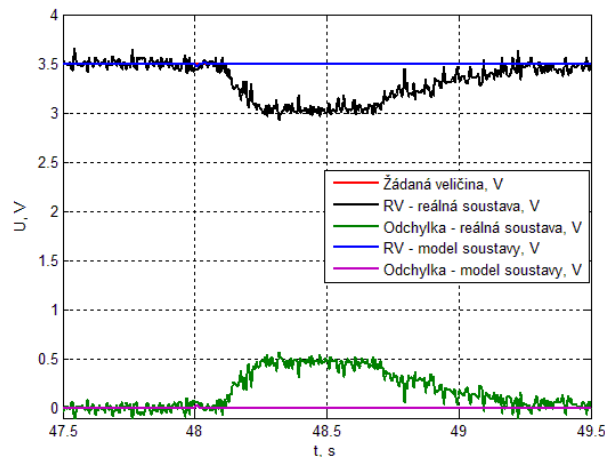
Obrázek 63 – Výpočet kritéria ITAE v Simulinku

Princip kritéria ITAE spočívá v nepřetržité integraci hodnoty regulační odchylky v závislosti na čase. Signál, který je přijímán z reálné soustavy motor – generátor, obsahuje šum, který způsobuje velmi malou, neustálou regulační odchylku. Z tohoto důvodu musí být kritérium ITAE použito jen v omezené části regulačního pochodu. Jinak by docházelo k neustálé integraci regulační odchylky až do nekonečna.



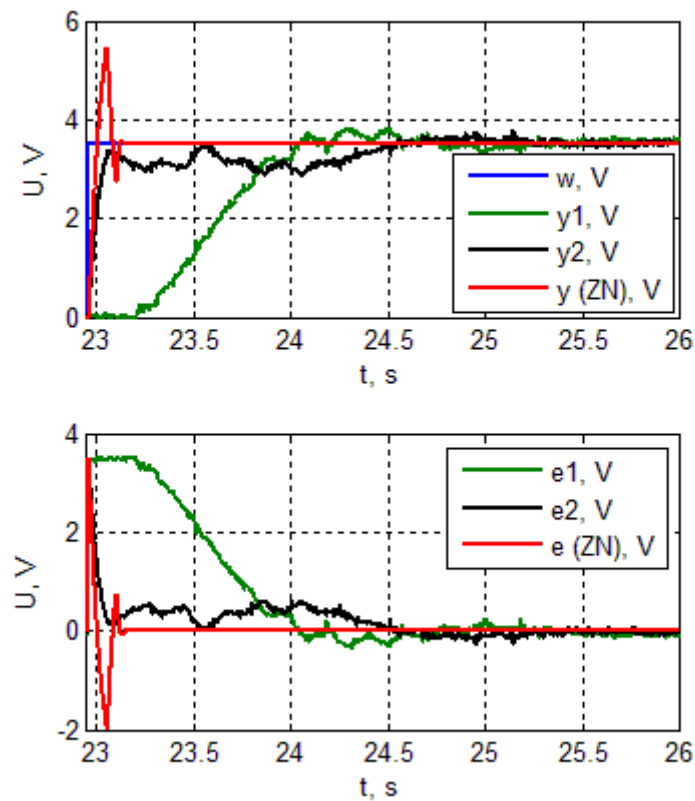
Obrázek 64 – Porovnání regulace reálné soustavy s regulací modelu soustavy

Řízení reálné soustavy motor – generátor je porovnáno s řízením modelu soustavy. Pro řízení modelu soustavy jsou použity regulační konstanty vypočítané metodou podle Zieglera a Nicholse.



Obrázek 65 – Porovnání eliminace poruchy reálné soustavy a modelu soustavy

Řízení průmyslových regulátorem KS 98 – 1 je podstatně méně kvalitní především z hlediska eliminace poruchové veličiny. Regulační obvod realizovaný v Simulinku s modelem soustavy motor – generátor reaguje prakticky okamžitě na vzniklou poruchu a dokáže ji také okamžitě eliminovat. Naproti tomu eliminace poruchy u reálné soustavy je sice uskutečňována, avšak v delším časovém úseku.



Obrázek 66 – Kvalita regulace dle kritéria ITAE pro blok *PIDMA*

Tabulka 17 – ITAE pro eliminaci poruchy

Regulační proces	ITAE
Reálná soustava motor – generátor	17,7
Model soustavy motor – generátor	0,001

Vypočtené parametry ITAE jsou zaznamenány v tabulkách 17 a 18. I z těchto tabulek je zřejmé, který regulační pochod je lepší.

Paradoxem je skutečnost, že řízení reálné soustavy blokem PIDMA s nastavenými vahami na 1 je dle kritéria ITAE kvalitnější než řízení soustavy s nulovými vahami. Odchyłka regulované veličiny od žádané veličiny je sice menší, ale doba ustálení regulované veličiny na žádané hodnotě je přibližně stejná.

Tabulka 18 – Hodnoty ITAE pro změnu žádané hodnoty

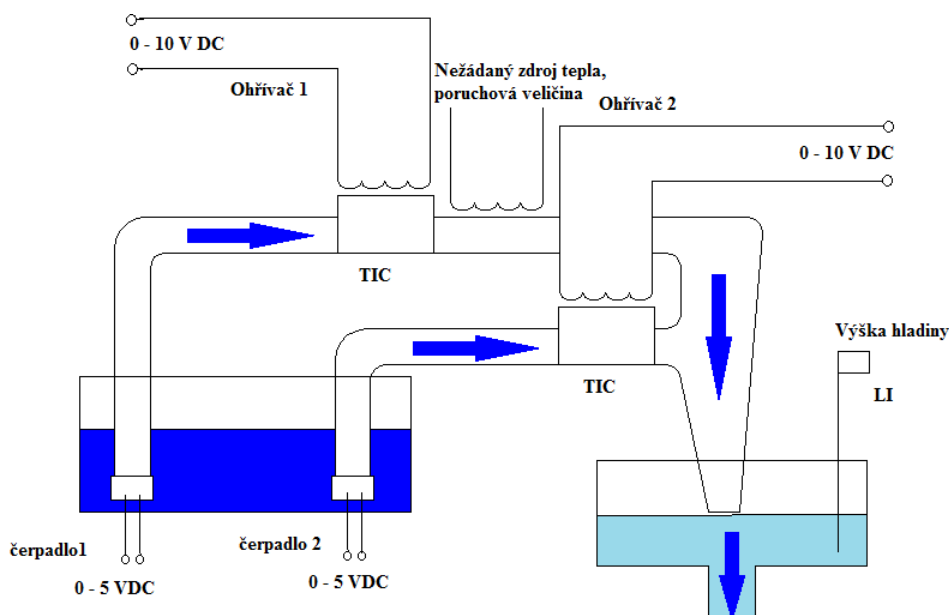
Regulace	ITAE
Řízení modelu soustavy motor – generátor	4,078
Řízení reálné soustavy blokem <i>CONTR</i>	27,75
Řízení reálné soustavy blokem <i>PIDMA</i> ($bW_p, cW_d = 0$)	56,39
Řízení reálné soustavy blokem <i>PIDMA</i> ($bW_p, cW_d = 1$)	17,34

5 Řízení soustavy průtokový ohřivač

Při řízení soustavy motor – generátor s velmi rychlou dynamikou nelze využít některé funkce průmyslového regulátoru KS 98 – 1. Z tohoto důvodu je v diplomové práci uvedena další experimentální soustava (průtokový ohřivač), která je popsána matematicko-fyzikálním modelem. Nejedná se o reálnou soustavu a regulace soustavy je řešena v Simulinku a především v simulačním prostředí SIM KS 98.

5.1 Popis a model soustavy

Celá soustava je složena ze dvou průtokových ohřivačů, které jsou určeny pro ohřev protékající vody. Voda je dvěma čerpadly odebírána z nádrže. Ohřívána voda pokračuje z průtokového ohřivače dále do nádrže, která obsahuje otevřenou clonku. Hladina v nádrži je sice ustálena na určité hodnotě, ale protože je ventil pod nádrží stále otevřen, ohřátá voda vytéká téměř ihned ven z nádrže. Soustavu popisuje zjednodušené technologické schéma na obrázku 67.



Obrázek 67 – Model soustavy s průtokovými ohřivači

Čerpadla jsou ovládána stejnosměrným napětím v rozsahu 0-5 V. V úloze se však předpokládá, že průtok vody je udržován na maximální hodnotě. V důsledku to znamená, že čerpadlo je ve stavu nepřetržitého chodu. Úkolem totiž není regulace hladiny v nádrži nebo regulace průtoku, ale pouze regulace teploty vody, která vychází z průtokového ohřivače. Stav hladiny je určen pouze pro informativní účel. Výstupní teplota vody je řízena pomocí příkonu průtokového ohřivače, který je ovládán řídicími obvody, které jako vstupy mají unifikovaný signál 0-10 V pro regulaci. Do soustavy je zahrnut případný nežádoucí vnější zdroj tepla pro znázornění eliminování poruchy v regulačním obvodu.

Tabulka 19 – Parametry modelu soustavy průtokový ohřivač

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Max. příkon ohřivače	P	10	k·W
Průměr hadice čerpadla	d	0,02	m
Prostupní koeficient	K	250	
Venkovní teplota	T_0	24	°C
Počáteční teplota vody	T_{poc}	15	°C
Vstupní teplota	T_{in}	15	°C
Prostupná plocha	S	0,007	m ²
Max. průtok	F_{max}	3	l·min ⁻¹
Měrná tepelná kapacita vody	c	4 120	
Průměr nádrže	d_n	0,5	m
Průměr clonky nádrže	d_c	0,02	m
Výtokový koeficient	α	0,74	

Parametry potřebné pro sestavení modelu soustavy jsou uvedeny v tabulce 19. Parametry nejsou zjištěny přímo z katalogů od výrobců jednotlivých komponentů, ale jsou navrženy experimentálně.

5.1.1 Model soustavy

Model soustavy je složen z modelu průtokového ohříváče a z modelu pro nádrž. Při jeho odvození se vychází ze základní bilanční rovnice, která s určitou mírou nepřesnosti zachycuje chování soustavy.

Nejprve je určen matematicko-fyzikální model pro samotný prvek průtokového ohříváče.

Změna teploty je rovna energii, která do soustavy vstupuje, a energii, která ze soustavy vystupuje. Energetická bilance je popsána rovnicí:

$$P + F c T_{\text{in}} = F c T + m c \frac{dT}{dt} + K S (T - T_0) \quad (5.1)$$

Z bilanční rovnice je vyjádřena změna teploty vody v čase:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P + F c (T_{\text{in}} - T) - K S (T - T_0)}{m c} \quad (5.2)$$

Z rovnice (5.2) je jednoduchou úpravou s využitím integrace vyjádřena výstupní teplota vody průtokového ohříváče. Úprava je znázorněna v rovnici:

$$T = \int_0^t \left(\frac{P + F c (T_{\text{in}} - T) - K S (T - T_0)}{m c} \right) dt \quad (5.3)$$

Rovnice (5.3) poskytuje postačující podklad pro sestavení simulačního modelu v prostředí Simulink s využitím parametrů uvedených v tabulce 19. Nyní zbývá vyřešit matematický i simulační model čerpadla a nádrže.

Vstupující energie do nádrže ve formě příchozího průtoku F_{in} je rovna energii vystupující z nádrže ve formě průtoku vody F_{out} přes clonku dále do potrubí a změně objemu vody v nádrži v čase. Bilance energií je znázorněna rovnicí:

$$F_{\text{in}} = F_{\text{out}} + \frac{dV}{dt} = F_{\text{out}} + S \frac{dh}{dt} \quad (5.4)$$

Postup pro určení hodnoty hladiny vody je obdobný jako u určení hodnoty teploty vody průtokového ohříváče (jsou použity téměř stejné matematické úpravy).

$$\frac{dh}{dt} = \frac{F_{\text{in}} - F_{\text{out}}}{S} \quad (5.5)$$

Výsledná hodnota hladiny je rovna:

$$h(t) = \int_0^t \frac{F_{\text{in}} - F_{\text{out}}}{S} dt \quad (5.6)$$

Pro výpočet výstupního průtoku z nádrže je využit vztah podle rovnice:

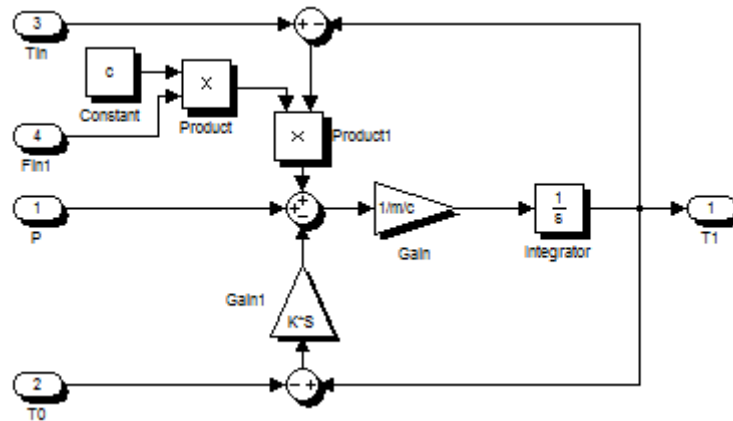
$$F_{\text{out}} = \alpha d_c \sqrt{2gh} \quad (5.7)$$

Jedná se o Torricelliho rovnici pro určení výstupního průtoku s využitím průměru clonky nádrže d_c , výtokového koeficientu α , gravitačního zrychlení g a hodnoty okamžité hladiny h . Při ustálení hladiny je $F_{\text{in}} = F_{\text{out}}$.

Jelikož jsou umístěny v soustavě dva průtokové ohřivače, které využívají průtoky dvou čerpadel, musí se celkový průtok F_{in} do nádrže rovnat:

$$F_{\text{in}} = F_{\text{in1}} + F_{\text{in2}} \quad (5.8)$$

Při sestavení simulačních modelů v Simulinku je nejprve realizován model pro průtokový ohřivač. Model průtokového ohřivače je zobrazen na obrázku 68.

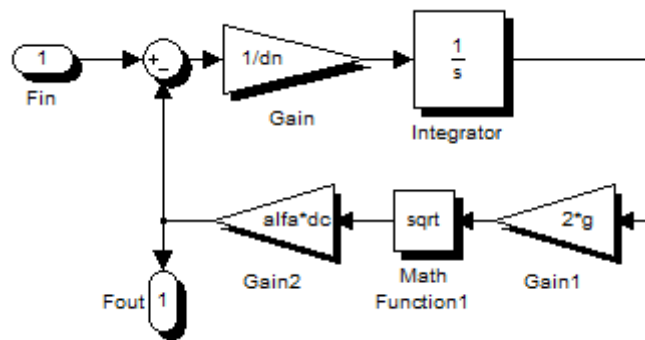


Obrázek 68 – Model průtokového ohřivače

Model na obrázku 68 je konfigurován pro vstupní průtok v jednotkách $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Čerpadlo ovšem ovládá průtok v jednotkách $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Při předpokladu, že $1 \text{ l vody} = 1 \text{ kg vody}$, platí: $1 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Výstupní teplota T z průtokového ohřivače je nepřímo úměrně závislá na průtoku vody ohřivačem. Čím vyšší je průtok F_{in} , tím nižší je teplota vody na výstupu ohřivače. V případě této konkrétní úlohy je použito jako médium voda. Nicméně úloha je použitelná i pro jiná média (kapaliny). V případě použití jiné kapaliny je ovšem nezbytné nadefinovat měrnou tepelnou kapacitu konkrétní kapaliny a samozřejmě nebude platit předpoklad, že $1 \text{ l} = 1 \text{ kg kapaliny}$.

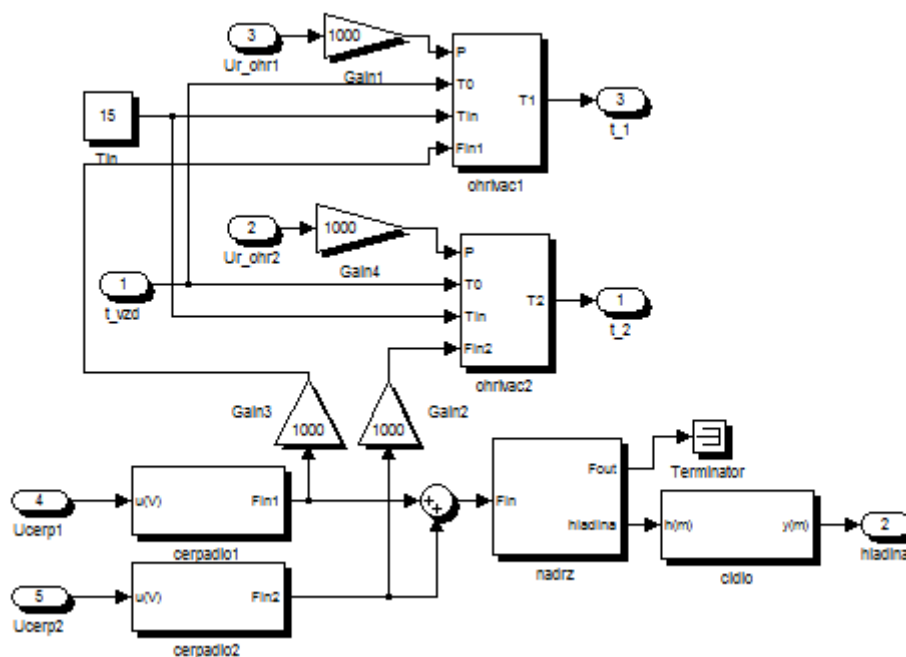
Z průtokového ohřivače prochází voda s konstantním průtokem do akumulární nádrže. Simulační model nádrže je zobrazen na obrázku 69.



Obrázek 69 – Model nádrže

Hodnota hladiny h a výstupní průtok F_{out} jsou závislé na průtokovém koeficientu $alfa$, průměru clonky d_c , průměru nádrže a na vstupním průtoku F_{in} . Mezi vstupním průtokem F_{in} a hladinou se jedná o nelineární závislost.

Spojením simulačních modelů pro průtokový ohřivač a pro nádrž je realizován model celé soustavy podle technologického schématu na obrázku 67.



Obrázek 70 – Celý model soustavy

Simulační model celé soustavy s průtokovým ohřivačem je znázorněn na obrázku 70. Oba dva modely jsou zapouzdřeny v blocích, na kterých jsou umístěny vstupy a výstupy potřebné pro řízení soustavy. Kromě bloků pro model nádrže a průtokového ohřivače, jsou na obrázku 70 uvedeny i další funkční bloky, které doplňují simulační model soustavy. Jejich použití je důležité pro co nejrealističtější chování modelu soustavy.

Výkon čerpadla, který ovládá průtok vody v hadici, je nelineárně závislý na vstupním řídicím napětí. Pro průtok $F_{in1} = F_{in2}$ platí rovnice:

$$F_{in1} = 0,00005(U_{cep1} - 2)^{0,1} \quad (5.9)$$

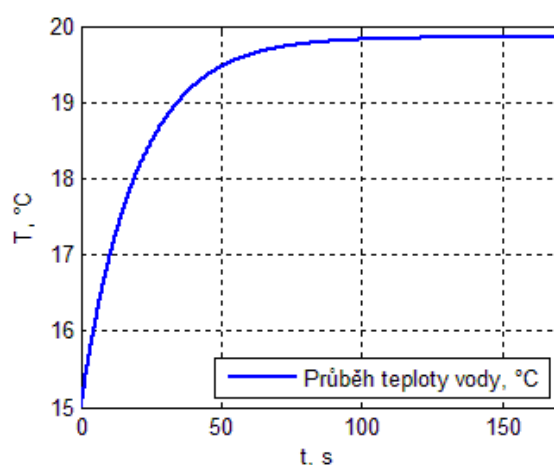
Hladina nádrže je snímána čidlem, jehož výstupní funkce je definována rovnicí:

$$y(t) = 32h(t) \quad (5.10)$$

Navržený simulační model na obrázku 70 je připraven pro různé experimentální účely.

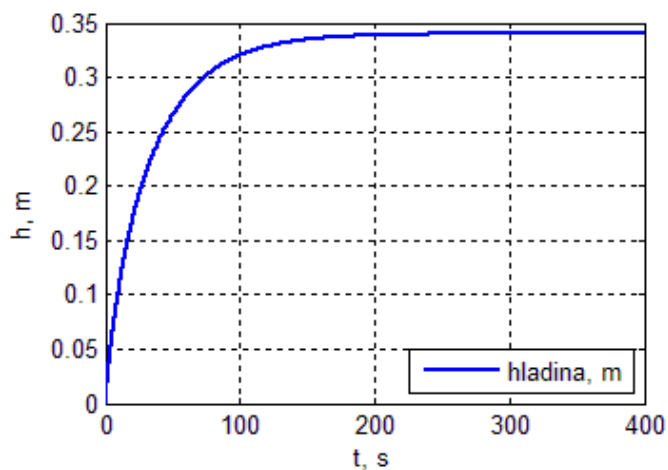
5.1.2 Dynamické a statické chování soustavy

Pro pochopení funkce soustavy je provedena analýza zkoumající časovou odezvu soustavy na změnu vstupního signálu a také závislost výstupního signálu na vstupním řídicím signálu. Analýza je vykonána odděleně pro každý prvek ve vývojovém prostředí Simulink.



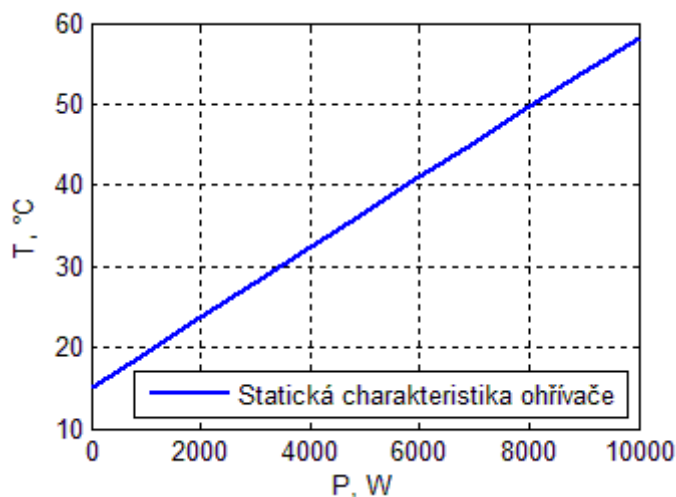
Obrázek 71 – Přejchodová charakteristika ohříváče vody

Odezva průtokového ohříváče na skok vstupní veličiny je znázorněna na obrázku 71. Odezva konkrétně zachycuje změnu výstupní teploty při vstupním skoku příkonu na 1000 W v případě, že průtok vody je maximální a konstantní. Počáteční teplota vody je 15 °C.



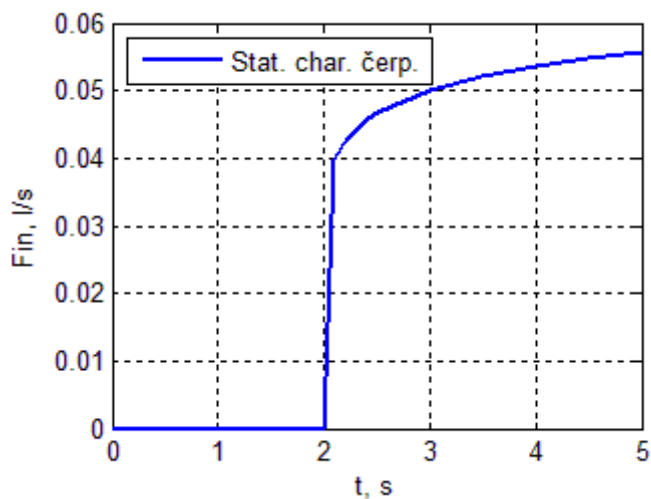
Obrázek 72 – Odezva výšky hladiny v nádrži na vstupní napěťový skok

Dynamické vlastnosti nádrže znázorňuje obrázek 72. Odezva je znázorněna pro vstupní napěťový signál 5 V. Čerpadlo má totiž nelineární statickou charakteristiku a je použitelné zhruba od 2 V řídicího napětí čerpadla. Hladina stoupá až do okamžiku, kdy $F_{in} = F_{out}$. V tomto okamžiku je ustálena na konstantní hodnotě.



Obrázek 73 – Statická charakteristika průtokového ohřivače

Statická charakteristika průtokového ohřivače (obrázek 73) je lineární. Čím vyšší je příkon ohřivače při maximálním průtoku, tím vyšší je výstupní teplota z ohřivače až do maximální hodnoty teploty vody.



Obrázek 74 – Statická charakteristika čerpadla

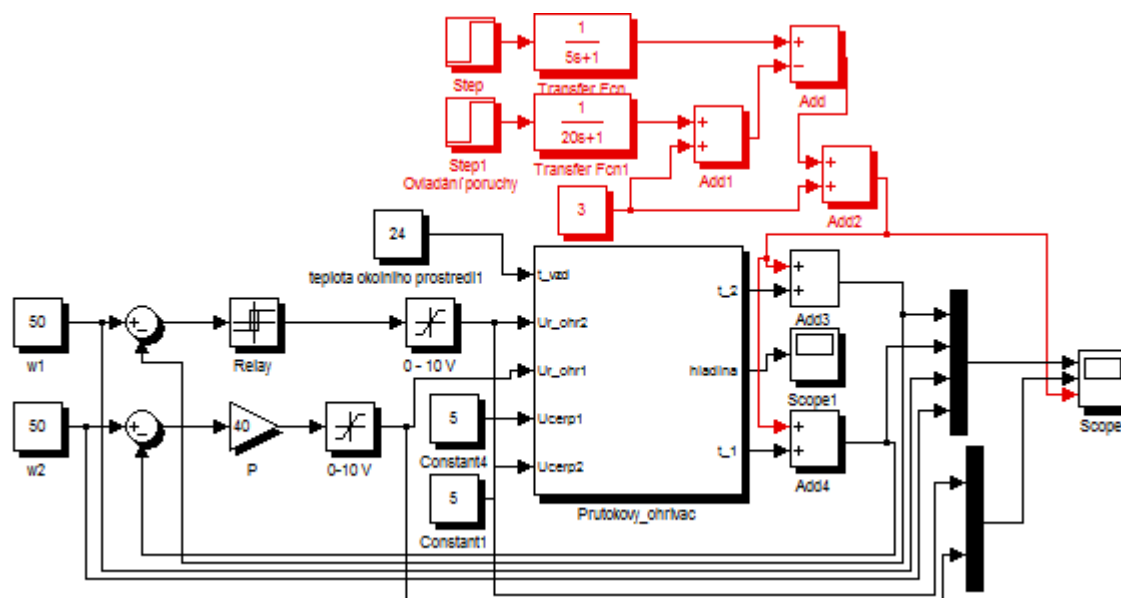
Naproti tomu, statická charakteristika čerpadla je nelineární. V případě, kdy by bylo zapotřebí řídit průtok ohřivačem nebo hladinu v nádrži je nutné nelineární statickou charakteristiku linearizovat. V případě úlohy průtokového ohřivače je však řízena pouze výstupní teplota vody. Průtok je nastaven na konstantní, maximální hodnotu.

5.2 Řízení modelu soustavy

V této kapitole je provedena realizace řídicích algoritmů pro regulaci výstupní teploty z průtokového ohřívače. Vzhledem k tomu, že je soustava vyjádřena pouze jejím simulačním modelem a není fyzicky realizována, je řízení soustavy učiněno v simulačním SW.

5.2.1 Řízení v Simulinku

Při řízení v Simulinku je využit simulační model na obrázku 70. Soustava je implementována do klasického regulačního obvodu s řídicím prvkem ve zpětné vazbě. Regulace spočívá v dosažení žádané teploty v co nejkratší době při působení vnějšího nežádoucího zdroje tepla. Nežádoucí zdroj tepla představuje pro regulaci poruchovou veličinu, kterou je nutné eliminovat.

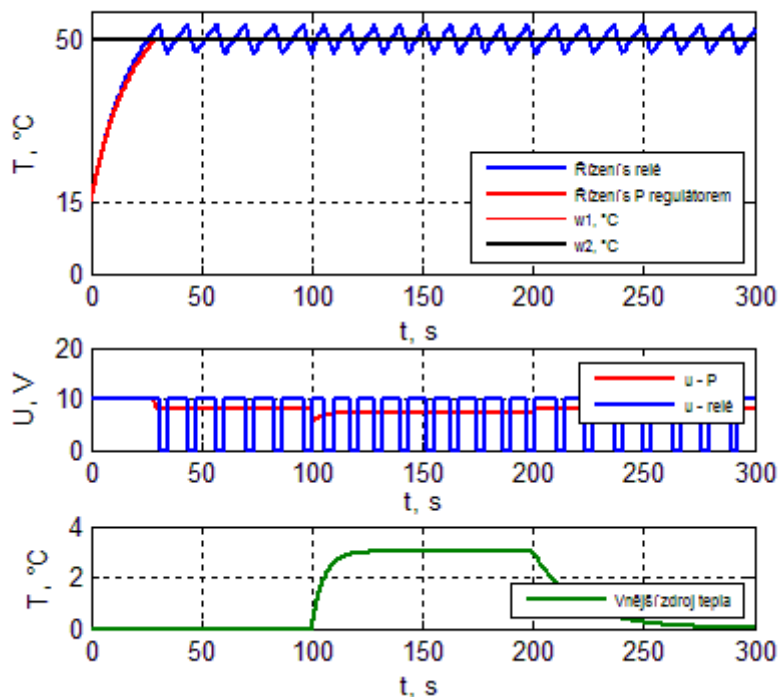


Obrázek 75 – Obecný regulační obvod pro průtokový ohřívač

Příklad simulace regulačního procesu je znázorněn na obrázku 75. Oba dva průtokové ohřívače jsou řízeny odlišným regulačním algoritmem. Červenou barvou na obrázku 75 je označena definice poruchové veličiny.

Pro řízení teploty t_1 je použit P regulátor ve zpětné vazbě. Průtokový ohřívač je totiž soustava 1. řádu, tudíž má nulovou dobu průtahu. Podle vztahů (např. Ziegler a Nichols) pro nastavení PID regulátoru je patrné, že nastavení I a D složky je závislé právě na době průtahu. Je-li tato doba nulová, jsou nulové i složky I a D. Při implementaci regulátoru do zpětné vazby je nutné omezit akční veličinu v rozsahu unifikovaného signálu 0-10 V.

Teplota t_2 je řízena pomocí relé ve zpětné vazbě. Relé je nelineární prvek, který na výstup přivádí hodnotu při stavu *zapnuto* nebo hodnotu při stavu *vypnuto*. Stav *zapnuto/vypnuto* je indikován podle hodnoty regulační odchylky. V případě stavu *zapnuto* je řídicí napětí ohřívače rovno 10 V (naopak při *vypnuto* je řídicí napětí 0 V).



Obrázek 76 – Řízení teploty průtokového ohřivače

V případě regulace s relé osciluje regulovaná veličina okolo žádané hodnoty. Přesnost této regulace závisí na vstupní hodnotě relé, která určuje při jaké hodnotě má relé sepnout. V konkrétním případě (obrázek 76) je přesnost regulace s využitím relé ve zpětné vazbě 5 °C. Velmi uspokojivá je eliminace poruchové veličiny ve formě vnějšího nežádoucího tepla. Působení poruchové veličiny je ihned eliminováno.

Pro řízení teploty t_I je navržen proporcionalní regulátor, u kterého má akční veličina spojitý charakter. Na rozdíl od relé výhoda spočívá v tom, že regulovaná veličina neosciluje okolo žádané hodnoty. V průběhu regulované veličiny sice vzniká trvalá regulační odchylka, ale je velmi malá. V případě regulace teploty průtokového ohřivače reguluje P regulátor s přesností cca $\pm 0,3$ °C. Pro ohřev vody je tato přesnost postačující. V případě přesné regulace s nulovou trvalou regulační odchylkou by musel být použit jiný regulační algoritmus, např. PI regulátor.

5.2.2 Řízení v ET – KS

Řízení soustavy průtokový ohřivač je realizováno kromě prostředí Simulink také ve vývojovém inženýrském prostředí ET – KS s využitím simulační aplikace SIM KS 98. Vývojové prostředí ET – KS a simulační aplikace je popsána v kapitole 3.2.5.

Nejprve je nutné realizovat simulační model soustavy v ET – KS s využitím odvozeného matematického modelu. Prostředí ET – KS obsahuje prvky, které jsou ekvivalentní s prvky v Simulinku. Pomocí těchto prvků je realizován simulační model, na který je vzápětí aplikován regulátor *CONTR* a *PIDMA*. Jedná se o velmi složitou programovou strukturu, která je přiložena v příloze diplomové práce. Vývojové prostředí ET – KS není totiž

implicitně určeno pro sestavování simulačních modelů soustav. Především je určeno pro realizaci programu pro řízení reálných soustav, které jsou připojeny k regulátoru. Nicméně pro znázornění jednotlivých funkcí, které vývojové prostředí umožňuje realizovat, postačí i k vytvoření simulačního modelu soustavy.

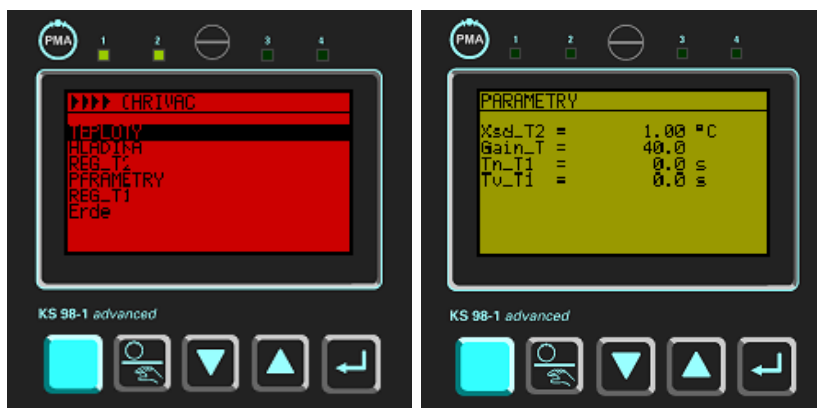
Program, který je nahrán do virtuálního přístroje v simulační aplikaci SIM KS 98, obsahuje hlavní menu, kde jsou umístěny všechny důležité ovládací a indikační prvky.

Tabulka 20 – Hlavní menu řízení průtokového ohřivače v SIM KS 98

Stránka v hlavním menu	Ovládací blok v ET - KS	Předmět
<i>TEPLOTY</i>	<i>VBAR</i>	Indikace a ovládání teplot
<i>HLADINA</i>	<i>VTREND</i>	Zobrazování trendu výšky hladiny
<i>REG_T2</i>	<i>CONTR</i>	Regulace teploty t ₂
<i>REG_T1</i>	<i>PIDMA</i>	Regulace teploty t ₁
<i>PARAMETRY</i>	<i>VPARA</i>	Zadávání regulačních parametrů

Hlavní menu programu je zobrazeno na obrázku 77, na kterém je také znázorněna ovládací stránka s možností zadávání regulačních parametrů přímo z čelního panelu virtuálního přístroje. Bez využití stránky s parametry, jsou jednotlivé regulační parametry určeny při realizaci programové struktury ve vývojovém prostředí. Po nahrání programu je nelze již měnit.

Regulátor *REG_T1* je nastaven jako regulátor se spojitou akční veličinou, jehož parametry jsou nastavené přímo v jeho bloku nebo je lze nastavit na ovládací stránce *PARAMETRY*. *REG_T2* je oproti *REG_T1* nastaven jako reléový regulátor s jedním výstupem. Postačujícím parametrem, kterým je nastavena reléová regulace, je spínací diference X_{Sd} [5]. Parametr X_{Sd} je možné, tak jako regulační parametry spojitě regulace, měnit přímo na stránce s parametry.



Obrázek 77 – Hlavní menu a definice parametrů

Na ovládací stránku *PARAMETRY* je možné vkládat až 6 různých parametrů, které je nutné z různého důvodu při chodu regulace měnit.



Obrázek 78 – Zobrazení teplot a hladiny

Indikace stavů teplot a hladiny je znázorněna na obrázku 78. Stránka *TEPLOTY* je určena nejen pro indikaci teplot, ale je možné i z této stránky měnit hodnoty žádaných teplot. Žádaná teplota je přivedena na vstup externí žádané hodnoty bloku regulátoru ET – KS. Při spuštění regulace je implicitně nastavena externí žádaná hodnota. V důsledku to znamená, že lze měnit žádanou hodnotu pouze ze stránky *TEPLOTY*. Na stránce regulátoru (např. *REG_T1*) v tento okamžik nelze zadávat interní žádanou hodnotu. Interní žádanou hodnotu na stránce regulátoru lze zadat pouze tehdy, přepne-li obsluha přístroje externí žádanou hodnotu na interní žádanou.

Trend hladiny je zobrazován na čelním panelu přístroje v jednotkách cm.

Programová struktura obsahuje alarmy, které jsou indikovány prostřednictvím LED indikátorů na čelním panelu virtuálního přístroje KS 98.

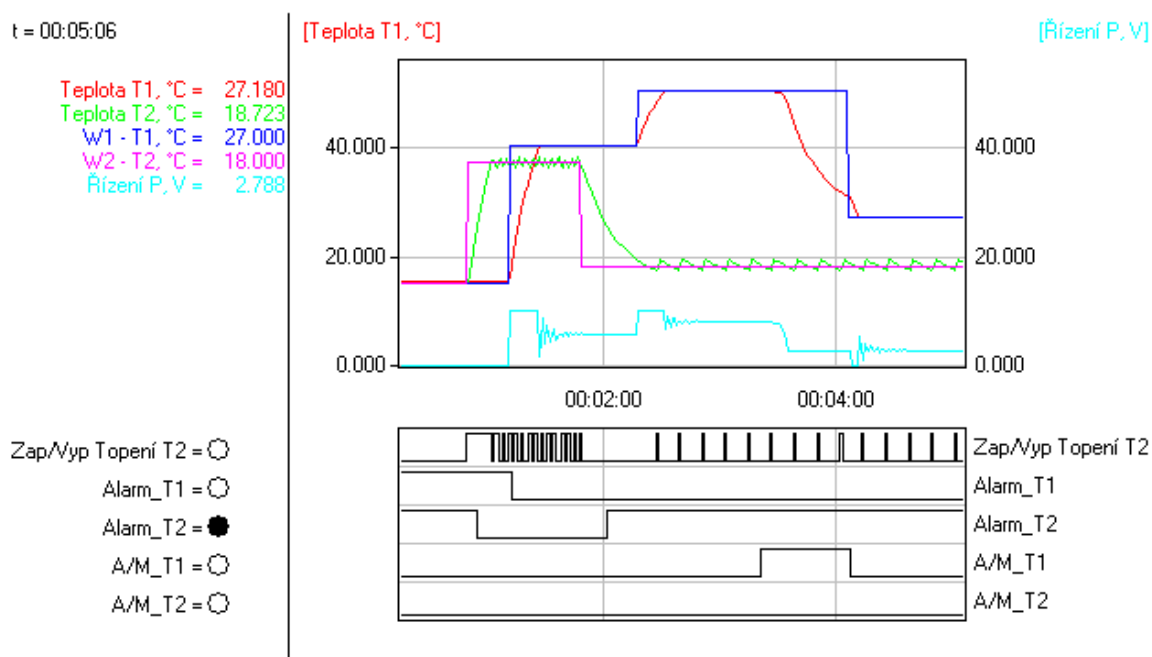
Tabulka 21 – Nastavení alarmů

Alarm		Hodnota	Jednotka	Indikace
Alarm teploty <i>T1</i>	Horní alarm	60	°C	LED1 a červený displej
	Dolní alarm	20	°C	
Alarm teploty <i>T2</i>	Horní alarm	60	°C	LED2 a červený displej
	Dolní alarm	25	°C	
Alarm hladiny nádrže	Horní alarm	0,4	m	blikání LED4
	Dolní alarm	0,02	m	

Alarmy, které jsou popsány v tabulce 21, hlídají krajní stavy jednotlivých veličin. Hlídán je rozsah teplot a také rozsah výšky hladiny. V případě kontroly rozsahu hladiny umožňuje alarm například hlídání nádrže při ucpání clonky nebo naopak při vypnutí obou čerpadel.

Hlídání rozsahu teplot je indikováno pro každou teplotu zvlášť. Navíc je zavedena indikace alarmu pomocí červeně podbarveného displeje, který je takto zbarven tehdy, pokud je aktivní alespoň jeden alarm. Na hlavní stránce je navíc umístěn informativní řádek, který vyzývá obsluhu k změně teploty.

Jednotlivé analogové i digitální signály jsou zobrazeny jako trendy pomocí bloku *LIREAD* ve vývojovém prostředí ET – KS. Příklad zobrazení trendu je uvedeno na obrázku 79.



Obrázek 79 – Průběh regulace teplot v simulačním prostředí SIM KS

Pomocí trendu jsou zobrazeny:

- Regulační, akční a žádané veličiny jako analogové výstupy i binární výstupy.
- Alarm teploty *T1* a *T2* jako binární výstupy.
- Stav pro automatické nebo ruční ovládání teploty (*A/M*).

Veličiny jsou vzorkovány s periodou 1 s. Při řízení teploty, na rozdíl od řízení motoru, je to postačující frekvence vzorkování. Získané grafy lze exportovat do tabulkového procesoru, který umožňuje uložit soubor s příponou *.dat*. Soubor s touto příponou je možné dále využívat například pro libovolné zpracování v *Matlabu*.

Obrázek 79 zachycuje průběh regulace teplot *T1* a *T2* na výstupech průtokových ohřivačů. Teplota *T1* je řízena spojitým regulátorem *PIDMA*. Teplota *T2* je řízena reléovým regulátorem *CONTR* s jedním digitálním výstupem *Y1*. Regulovaná veličina osciluje okolo žádané hodnoty o $X0$ [5]:

$$X0 = X_{\max} \frac{T_u}{T_g} + X_{Sd} \quad (5.11)$$

V případě nulové doby průtahu platí pro oscilaci:

$$X0 = 100 \frac{0}{T_g} + X_{Sd} = X_{Sd} \quad (5.12)$$

Hodnota oscilace X_0 pro soustavu s nulovou dobou průtahu je proto dána spínací diferencí X_{Sd} , kterou lze kdykoliv zadávat na stránce s parametry.

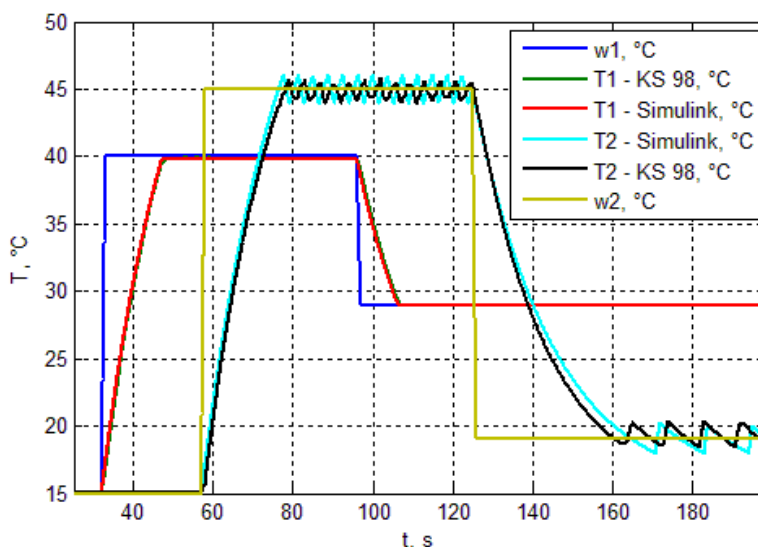
5.2.3 Vyhodnocení a kvalita regulace

Při vyhodnocení regulace je nejprve provedeno porovnání řízení soustavy v Simulinku s řízením soustavy v simulační aplikaci SIM KS 98.

Pro regulaci dvou teplot s využitím proporcionálního regulátoru a relé postačuje nadefinovat pouze dva regulační parametry uvedené v tabulce 22.

Tabulka 22 – Regulační parametry pro průtokový ohřivač

Parametr	Hodnota
Spínací diference X_{Sd}	1
Zesílení regulátoru	40

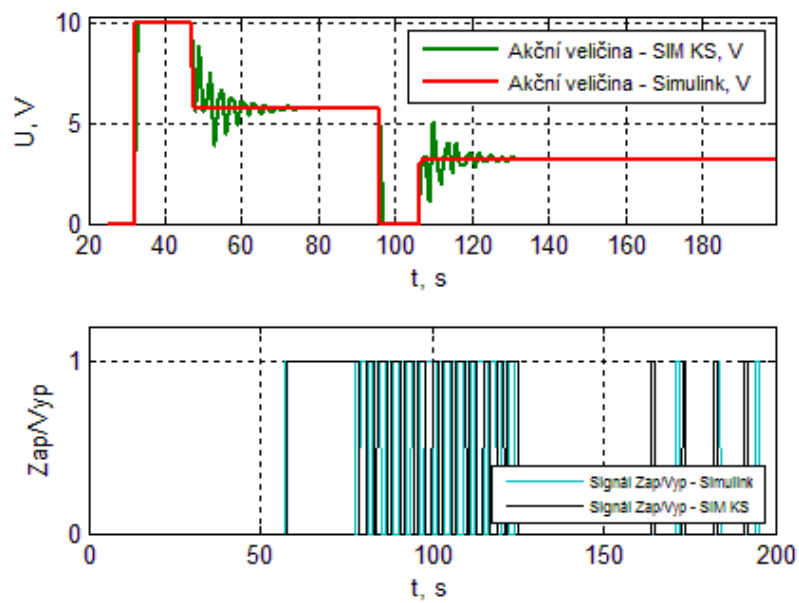


Obrázek 80 – Porovnání regulace v SIM KS s regulací v Simulinku

Z obrázku 80 je patrné, že mezi řízením modelu průtokového ohřivače v SIM KS 98 a řízením modelu v Simulinku dochází k minimálním odchýlkám. Především při porovnání spojité regulace je řízení téměř totožné. Pro udržení stálé hodnoty regulované veličiny je vhodnější spojitý proporcionální regulátor.

Tabulka 23 – Hodnoty ITAE pro 2 druhy regulace

Regulace	ITAE
Reléová regulace v Simulinku	$6,753 \cdot 10^4$
Reléová regulace v SIM KS	$6,421 \cdot 10^4$
Spojité regulace v Simulinku	$1,175 \cdot 10^4$
Spojité regulace v SIM KS	$1,239 \cdot 10^4$



Obrázek 81 – Porovnání akčních veličin regulace teplot

Kvalita regulace je tak jako u reálné soustavy motor – generátor provedena s přispěním kritéria ITAE v daném časovém úseku. Kvalita regulace je tímto parametrem posouzena pouze z hlediska tvaru průběhu regulační veličiny.

6 Závěr

V diplomové práci byla nejprve provedena realizace simulačního modelu reálné soustavy motor – generátor. Simulační model byl sestaven s využitím matematického modelu, který je definován diferenciální rovnicí. Získaný simulační model byl porovnán s modelem vypočteným experimentální identifikací a s chováním reálné soustavy. Porovnání bylo provedeno pro vstupní řídicí napětí 5 V. V tomto bodě byly zjištěny minimální odchylky modelu od reálné soustavy. Při statické analýze modelu soustavy a reálné soustavy byly zjištěny poměrně velké odchylky statické charakteristiky reálné soustavy motor – generátor od lineární statické charakteristiky modelu soustavy. Identifikace modelu soustavy pro celý rozsah řídicího napětí je v tomto konkrétním případě úspěšná pouze tehdy, je-li provedena pro několik dalších bodů statické charakteristiky.

Simulační model byl dále v diplomové práci využit pro účel řízení otáček motoru. Jako regulační algoritmus byl použit spojitý PID regulátor, jehož parametry byly nastaveny metodou, která využívá znalost přechodové charakteristiky. Z přechodové charakteristiky byly odečteny doby průtahu a náběhu výstupní veličiny. Regulátor byl seřízen dle výpočtu podle Zieglera a Nicholse. Řízení modelu soustavy s PID regulátorem bylo velmi rychlé a především eliminace poruchové veličiny proběhla uspokojivě.

Řízení reálné soustavy průmyslovým regulátorem KS 98 – 1 bylo provedeno s využitím bloků *CONTR* a *PIDMA* ve vývojovém prostředí ET – KS. Programová struktura, realizovaná v ET – KS obsahuje několik dalších zajímavých prvků určených k řízení nebo k indikaci alarmů. V uvedených blocích pro řízení otáček motoru byl nastaven spojitý regulační algoritmus. Rozdíl mezi bloky *CONTR* a *PIDMA* spočívá v jejich struktuře. *CONTR* využívá sériovou strukturu PID regulátoru, na rozdíl od bloku *PIDMA*, který využívá paralelní strukturu PID regulátoru. Nastavení jednotlivých časových konstant regulace bylo omezeno hodnotou 0,1 s. Ukázalo se, že pro reálnou soustavu je tato hodnota příliš vysoká. Soustava motor – generátor sice byla úspěšně řízena průmyslovým regulátorem KS 98 – 1, nicméně doba ustálení otáček na nové žádané hodnotě byla ve srovnání s řízením modelu v Simulinku příliš vysoká.

Při srovnání řízení modelu v Simulinku a řízení reálné soustavy motor – generátor byl ovšem identifikován další problém spočívající v periodě vzorkování vstupního signálu do průmyslového regulátoru. Perioda vzorkování vstupního signálu regulátoru je totiž rovna 0,1 s. V případě, kdy byla použita reálná soustava, jejíž doba náběhu je přibližně 0,3 s, nastává problém s úspěšným porovnáváním regulačních pochodů, neboť mezi soustavou a blokem regulátoru se kromě analogového filtru nachází diskrétní filtr, jehož struktura je neznámá. Výrobce průmyslového regulátoru uvádí, že řídicí systém KS 98 – 1 je primárně určen pro středně rychlé a pomalé soustavy, jako např. tepelné soustavy nebo soustavy regulující úroveň médií. Pro regulaci pohonů je nevhodný. Tvrzení o nevhodnosti implementace průmyslového regulátoru bylo v diplomové práci potvrzeno.

Pro řízení pohonů je vhodný například průmyslový regulátor Acofos od firmy B&R, který je modulárně programovatelný, ale především disponuje s periodou regulačního algoritmu

rovnou 0,1 ms. Perioda zpracování vstupního signálu 0,1 ms by pro řízení soustavy motor – generátor byla dostačující.

Pro ověření regulačních algoritmů, sestavených v ET – KS, byla provedena realizace modelu experimentální soustavy průtokového ohřívače s akumulací nádrží. Model celé soustavy průtokového ohřívače byl uskutečněn v Simulinku i v ET – KS. V ET – KS byly vytvořeny regulační algoritmy pro řízení obou teplot na výstupu modelu soustavy. Regulační algoritmus v ET – KS byl navrhnut tak, aby byl ekvivalentní k algoritmu, který byl vytvořen v Simulinku. Výsledné porovnání potvrzuje shodu mezi řízením v simulační aplikaci SIM KS 98, která komunikuje s ET – KS, a řízením ve vývojovém prostředí Simulink.

Kvalita regulace byla jak v případě reálné soustavy motor – generátor, tak i v případě modelu soustavy průtokový ohřívač posouzena kritériem ITAE. Kritérium bylo použito z důvodu posouzení kvality průběhu regulované veličiny. Průběh akční veličiny v tomto kritériu zohledněn nebyl.

Všechny programové struktury, které byly navrženy v ET – KS a které byly určeny pro řízení soustav, jsou v příloze diplomové práce.

Literatura

- [1] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: BEN-technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-148-9.
- [2] DORF, R. C. a BSHOP, R. H. *Modern Control Systems*. New Jersey: Prentice Hall, 2005. ISBN 0-13-127765-0.
- [3] NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex a.s., 1999. ISBN 80-7225-030-2.
- [4] SKALICKÝ, J. *Teorie řízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. ISBN 80-214-2112-6
- [5] PMA. *Multifunkční regulátor KS 98 - 1*. [online] Plzeň: Profess, 2006. [cit. 2013]. Dostupné z <http://www.profess.cz/dynamic/produkty/dokument/KS98-1N.pdf>
- [6] KUPKA, L. *Matlab & Simulink*. [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. [cit. 2013]. Dostupné z <http://www.mti.tul.cz/files/zky/MATLABaSimulink.pdf>
- [7] ŠEDA, M., ŠVARC, I. a VÍTEČKOVÁ, M. *Automatické řízení*. Praha: BEN, 2007. ISBN 978-80-214-3491-2
- [8] HLAVA, J. *Prostředky automatického řízení 2*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02221-8.
- [9] MODRLÁK, O. a ŠKOLNÍK, P. *Regulace otáček se zátěží*. [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. [cit. 2011]. Dostupné z <http://www.rss.tul.cz/download/ari/Motor+tachodynamo-zadni.pdf>

Přílohy

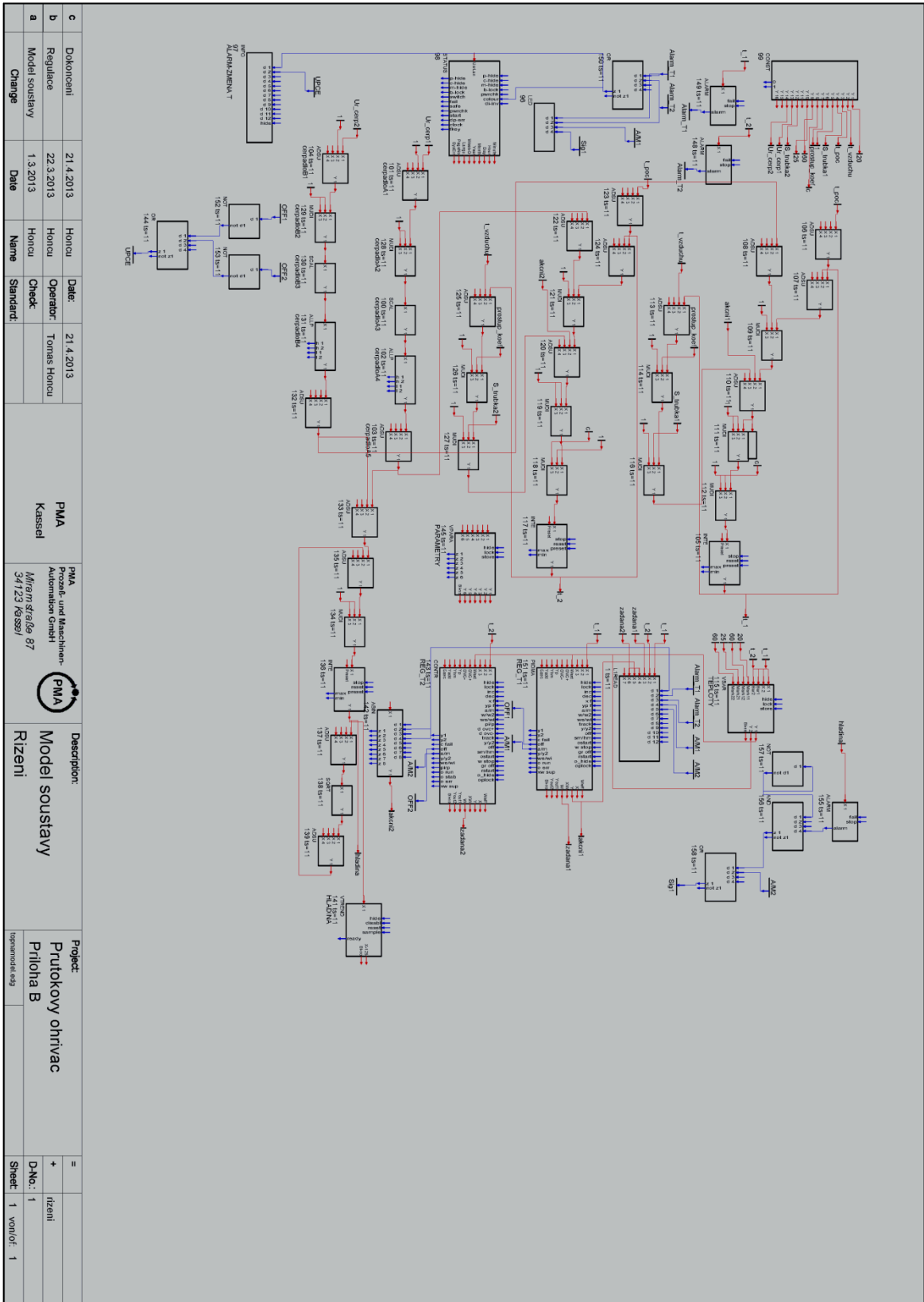
Příloha A

Schéma řízení soustavy motor – generátor (blok *CONTR*)

Příloha B

Schéma řízení modelu soustavy průtokový ohřivač

Příloha B



c	Dokončení	21.4.2013	Honcu	Date:	21.4.2013	PMA Kassel	PMA Prozeß- und Maschinen- Automation GmbH Mitterstraße 87 34123 Kassel	Description: Model soustavy Rizení	Project: Průtokový ovlávací Příloha B	=	+	rizení
d	Regulace	22.3.2013	Honcu	Operator:	Tomás Honcu							
a	Model soustavy	1.3.2013	Honcu	Check:								
	Change	Date	Name	Standard:						Sheet	1	von/of: 1