

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Regulace teploty vody v systému vysokotlakého
vstřikování**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce navazuje na bakalářskou práci z roku 2017 a je zaměřena na rozšíření návrhu regulátoru teploty vody ve vysokotlakém systému vstřikování.

Klíčová slova

Regulátor, regulovaná soustava, Matlab, Siemens S7, vysokotlaké vstřikování, windup, feed - forward

Abstract

This diploma thesis is a continuation of the bachelor thesis from year 2017 and is focused on the extension of the design of the water temperature regulator in the high-pressure injection system.

Key words

Regulator, regulated system, Matlab, Siemens S7, high pressure injection, windup, feed - forward

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a svému zaměstnavateli firmě Krones za čas a prostředky určené k realizaci práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 PRINCIP SYSTÉMU A NAVOZENÍ PROBLÉMU	10
1.1 ÚSKALÍ REGULACE	10
1.2 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE V PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH	10
1.3 NOVÉ BLOKOVÉ SCHÉMA	11
1.4 OVLÁDÁNÍ A NASTAVENÍ	11
1.5 FUNKCE SYSTÉMU A PROBLÉMY	13
2 MĚŘENÍ	13
2.1 POSTUP MĚŘENÍ	13
2.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A ZHODNOCENÍ	13
3 SIMULAČNÍ MODEL REGULÁTORU SIEMENS FB 58, JEHO FUNKCE A PARAMETRY	14
3.1 JAK FUNGUJE FUNKČNÍ BLOK FB 58	14
3.2 SIMULAČNÍ MODEL A BLOKOVÉ SCHÉMA REGULÁTORU FB 58	15
3.3 PŘEPIS REGULÁTORU FB 58 DO SKRIPTU MATLAB	17
4 NÁVRH OPTIMALIZACE REGULÁTORU METODOU ANTI-WINDUP A METODOU FEEDFORWARD	18
4.1 METODY ANTI-WINDUP	18
4.1.1 <i>Windup jev</i>	18
4.1.2 <i>Metoda clamping</i>	18
4.1.3 <i>Simulace metody clamping</i>	19
4.1.4 <i>Metoda zpětného výpočtu</i>	22
4.1.5 <i>Simulace metody zpětného výpočtu</i>	22
4.2 METODA FEEDFORWARD	24
4.2.1 <i>Princip metody</i>	24
4.2.2 <i>Simulace metody feed-forward</i>	25
5 MOŽNOST OVĚŘENÍ ZÍSKANÝCH PARAMETRŮ REGULÁTORU V REÁLNÉ SOUSTAVĚ	36
5.1 OMEZENÍ INTEGRAČNÍ SLOŽKY	36
5.2 PARAMETR PRO FEED-FORWARD	36
5.3 IMPLEMENTACE DO PROSTŘEDÍ SIEMENS A OVĚŘENÍ PARAMETRŮ V PRAXI	38
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh regulátoru pro ohřev vody v systému vysokotlakého vstřikování. Navazuje na předchozí bakalářskou práci, kde jsem optimalizoval stávající regulátor, provedl jeho simulaci a ověření PID parametrů. Ze závěrů předchozí práce vyplývá, že je potřeba do modelu regulátoru zakomponovat další parametry pro jeho zpřesnění. V úvodní kapitole se zaměřím na uvedení do problematiky a ověření bakalářské práce v reálných podmínkách. Princip systému byl detailně popsán v předchozí práci.

V další části popíši model regulátoru a jeho možnosti rozšíření o nové parametry. Metodiku otestuji v simulacích a jejich výsledky budu aplikovat do prostředí SIMATIC. Je tedy třeba doprogramovat algoritmus regulátoru, provést simulace v programu Matlab a upravit samotné parametry programu řídicího systému od firmy Siemens. Celý systém by se měl značně zrychlit a nemělo by docházet k velkým teplotním výkyvům při náhlé změně tlaku vody, analogicky průtoku vody. Opět bych se chtěl zaměřit na výsledky fyzikálního modelu, které jsem řešil v bakalářské práci a na jejich základě porovnat fungování regulátoru s novými parametry v praxi.

Stávající soustavu bych nejprve rád rozšířil o další fyzikální veličinu - průtok. Je tedy třeba upravit model doplněním vhodného zařízení, kterým můžeme sledovat změny průtoku v závislosti na rychlosti stroje. Měření se provede na modulu, který byl pro tyto účely sestaven a je vybaven řídicím systémem, umožňujícím pracovat se vstupními i výstupními signály digitálního či analogového charakteru. Díky programu IBA Analyser je možno sledovat hodnoty jednotlivých veličin a vytvářet charakteristiky v reálném čase.

V poslední části, která je zaměřena na optimalizaci nového regulátoru a ověření v reálných podmínkách, jsem zhodnotil i jeho finanční náročnost, uvedení do provozu u mého zaměstnavatele, firmy Kronos AG a také možnost další inovace, která je popsána v závěru.

Seznam symbolů a zkratek

<i>FIT176</i>	Interní označení firmy Krones pro přístroj na měření průtoku
<i>IM 151</i>	Označení procesoru řídicího systému firmy Siemens
<i>FB 58</i>	Funkční blok, který obsahuje řízení PID regulace – programováno firmou Siemens
<i>INT_HPOS</i>	Vstupní parametr bloku FB 58 – omezuje nárůst integrační složky v pozitivním směru
<i>DISV</i>	Interní parametr bloku FB 58 – omezuje výstup LMN z regulátoru
<i>LMN</i>	Výstup z regulátoru [%]
<i>LMN_I</i>	Výstup z regulátoru – integrační složka
<i>I_ITLVAR</i>	Vstupní parametr bloku FB 58 – po restartu nastavuje hodnotu integrační složky LMN_I
<i>PWM</i>	Pulse width modulátor – pulzní šířková modulace
<i>PID</i>	Proporcionálně – integračně – derivační
<i>T_t</i>	Sledovací časová konstanta [s]
<i>T_i</i>	Integrační časová konstanta [s]
<i>T_d</i>	Derivační časová konstanta [s]
<i>MATLAB</i>	Matrix laboratory
<i>DEADZONE</i>	Omezující parametr bloku FB 58 – nastavení pásma maxima a minima regulační odchylky, kdy výstupu LMN vypínáme kvůli oscilaci
<i>SIMULINK</i>	Nadstavba Matlabu pro řešení dynamických systémů
<i>LMN_HLM</i>	Omezující parametr bloku FB 58 – nastavení maxima výstupu LMN
<i>LMN_LLM</i>	Omezující parametr bloku FB 58 – nastavení minima výstupu LMN

1 Princip systému a navození problému

Pro zopakování zmiňuji, že systém je určen pro zvýšení trvanlivosti piva. Obsahuje čerpadlo, bistabilní regulační ventil a proporcionální vysokotlaký ventil. Pomocí tlaku vody, o který se stará regulační ventil, tlačíme čerpadlem vodu do kovové nádoby, kde je umístěna spirála, jež ohřívá vodu zhruba na 80 °C, ta je poté injektována přes trysku do naplněné láhve s pivem. Tlak vody je závislý na rychlosti stroje, který láhve plní. Změnou tlaku, měníme průtok a tím i množství studené vody, které čerpáme do nádoby. Teplota by měla zůstat konstantní po celou dobu fungování procesu, nesmí se náhle měnit při změnách průtoku a její přechod na novou, požadovanou hodnotu by měl být co nejrychlejší.

1.1 Úskalí regulace

U všech tepelných soustav počítáme s tzv. nesymetrickou dynamikou, což znamená, že časový průběh teploty je jiný při ohřevu i při chlazení. V bakalářské práci jsem již zmiňoval, že nádoba o objemu 250 ml je poměrně malá (obsahuje malé množství vody), spirála má však výkon 2000 W. Teplotní čidlo je umístěno v horní části spirály, kde je i odvod do trysky. Přívod studené vody je v dolní části, z čehož vyplývá, že při regulaci musíme počítat s doběhem teploty. To znamená, že topný výkon spirály musíme omezit již při 70 °C, pokud požadujeme teplotu 80 °C, jinak by při pozdějším vypnutí došlo k nárůstu teploty až na 95-98 °C. Při teplotě kolem 105 °C dojde k trvalému poškození materiálu spirály a je nutné ji vyměnit za novou.

1.2 Ověření výsledků bakalářské práce v provozních podmínkách

Celý systém byl otestován v provozu u pivovaru Krombach Ko&KG. V programu řídicího systému byly použity navrhované změny, jako přivedení nuly na požadovanou hodnotu regulátoru, kvůli omezení nárůstu integrační složky. Toto jsem provedl, pokud systém není v provozu. Díky pomalé regulaci trvá prvotní oteplení vody na provozní teplotu zhruba 1 minutu, jelikož systém je naplněn vodou z řádu o teplotě 8 °C. Při procesech celého zařízení, je snaha veškeré úkony co nejvíce optimalizovat, hlavně z ekonomického hlediska. Celý proces jsme tedy urychlili tím, že s ohřevem začínáme již ve dvou předchozích procesech, které samotné produkci předchází. Tím se celý ohřev značně zrychlil a ve fázi, kdy je zařízení připraveno k produkci a lahve stojí na pásovém dopravníku, se nám celé oteplení zkrátilo na necelé 2 minuty.

Dalším problémem byla změna podmínek. Při přerušení produkce dochází ke snížení rychlosti stroje, což má za následek změnu tlaku vody v systému a následně změnu průtoku. Z hlediska regulace se teplota dostala nad svou horní mez a trvalo několik desítek vteřin, než vlivem regulátoru došlo k celému ochlazení systému a celý proces plnění mohl pokračovat. Úprava byla provedena v programu řídicího systému, při přerušení produkce je nastaven tzv. „offset“. Tlak zůstává i při změně rychlosti stroje neměnný a teprve po uplynutí časového intervalu 3 minuty, dojde pomalu k jeho snížení o 1 bar/min. Tímto došlo na základě zhodnocení bakalářské práce k úpravě parametrů složek P, I a D, dále byla požadovaná hodnota při vypnuté funkci přivedena na nulu a upravili jsme proces řízení regulátoru – odstranění náhlé změny tlaku a zavedení „offset“.

1.3 Nové blokové schéma

Blokové schéma z bakalářské práce se od původního prakticky neliší. Doplnil jsem ho pouze o měření průtoku vody FIT176 s analogovým signálem 4 – 20 mA, který je připojen do řídicího systému. Průtok je velmi malý, tudíž se musel zvolit speciální měřicí přístroj, který je schopen průtoky v jednotkách řádově desítky ml/min měřit. Ohled jsem musel vzít též na maximální teplotu média, kterou je schopen systém měřit. Díky konstantnímu průtoku v celém systému za tlakovým regulačním ventilem bylo nutné právě z hlediska provozních vlastností, přístroj umístit do okruhu studené vody. Pro informaci o průtoku jsem na vizualizační panel zahrnul hodnotu aktuálního průtoku.

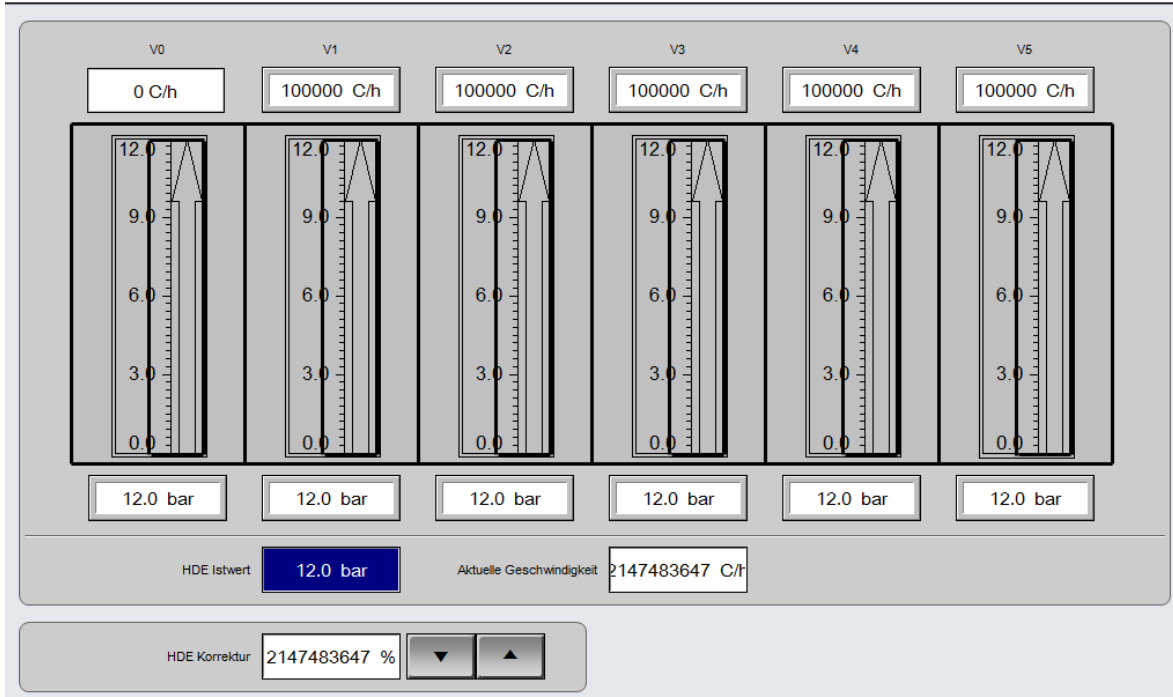
S pomocí školicího střediska u mého zaměstnavatele, které mi poskytlo prostor a připojení veškerých médií (voda, vzduch) jsem provedl měření na modulu, který jsem sestavil s pomocí veškerých, potřebných komponentů.

Části jsou umístěné na vozíku z nerezového materiálu, který je prvotně konstruován pro agregáty na etiketování lahví. Ten je pro snadnou manipulaci opatřen plastovými kolečky a madlem. Celé zařízení je umístěno v horní části včetně řídicího systému IM 151 a malého operačního panelu pro jednoduché ovládání.

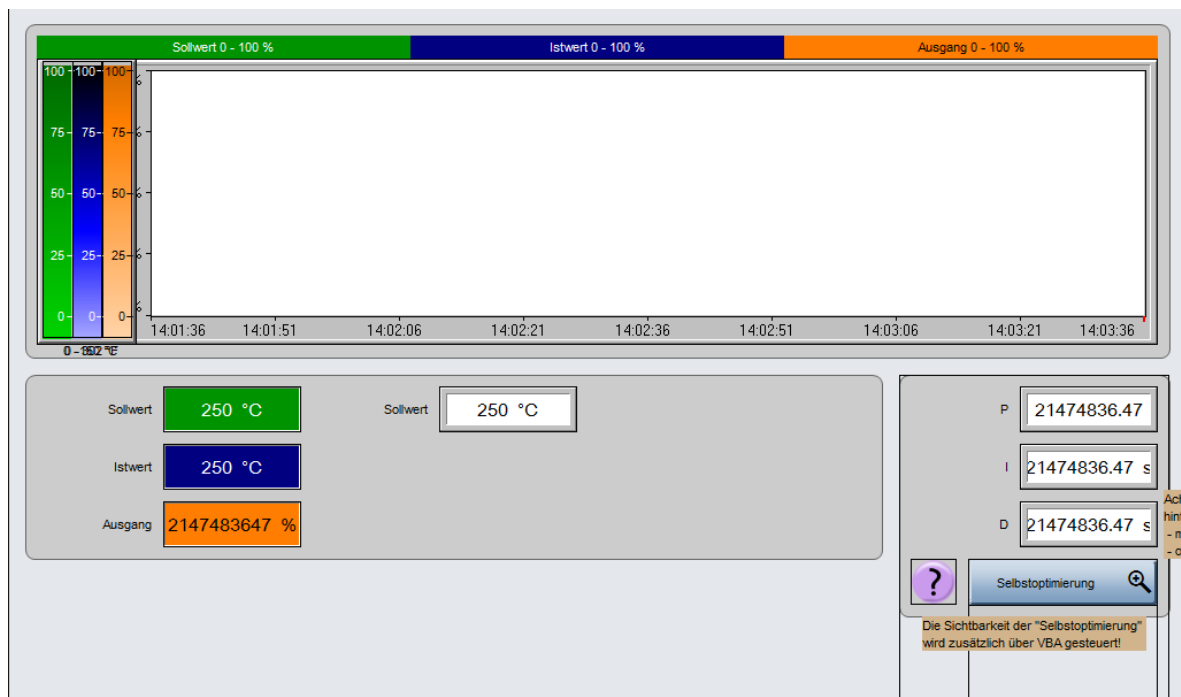
1.4 Ovládání a nastavení

Veškeré komponenty je možné ovládat případně simulovat přes dotykový panel, na kterém je znázorněno blokové schéma. Ručního ovládání využíváme např. při kontrole systému, nebo rychlém odvodu tepla při vysoké teplotě. Za provozního stavu je celý systém v automatickém režimu. Veškeré ovládání a kontroly jsou prováděny řídicím systémem.

Při optimalizaci nastavujeme pouze požadovanou teplotu vody ve stupních Celsia, šest regulačních stupňů pro nastavení tlaku vody, při různých provozních rychlostech stroje *Obr. 1.1* a parametry PID regulátoru teploty *Obr. 1.2*. Na následujících obrázcích jsou pro představu znázorněny parametry pro nastavení systému:



Obr. 1.1 Nastavení tlaku vody při různých provozních rychlostech [1]



Obr. 1.2 Nastavení požadované teploty a parametrů PID regulátoru [1]

1.5 Funkce systému a problémy

Při prvotním spuštění produkce je nejprve celý systém odzdušněn a naplněn vodou. Čerpadlo je stále v provozu a je otevřena kanálová výpusť. Topná spirála započne s ohříváním vody na požadovanou teplotu. Po dosažení povolené hystereze se nejprve otevře přívod lahví do zařízení, kanálová výpusť se uzavře, voda nyní proudí přes trysku a rychlost stroje začíná stoupat až do maxima. To má za následek zvýšení tlaku vody v systému vstřikování a částečnému snížení aktuální teploty vody, neboť průtok se zvýšil. Tuto anomálii regulátor bez problémů zvládne, pokud není akční zásah regulátoru příliš velký a při ustálení rychlosti stroje a tlaku vody je jeho výstup konstantní. Horká voda proudí přes trysku do lahví a produkce běží kontinuálně. Problém nastává při změně podmínek, např. přerušení produkce nebo zastavení stroje. V tomto případě dojde k poklesu tlaku, což má za následek snížení průtoku a vlivem fyzikálních změn v systému dojde k nárůstu teploty vody, který regulátor se stávajícími parametry není schopen omezit. Nápravu vidím v úpravě parametrů regulátoru s ohledem na hodnoty aktuálního průtoku.

2 Měření

2.1 Postup měření

Abychom mohli reagovat na náhlé změny průtoku vody, které mají za následek prudké oteplení vlivem snížení přísunu ochlazené vody na vstup do nádoby, je třeba tuto informaci měřit a následně ji zakomponovat do soustavy regulátoru. Pokusím se tedy dle různých tlaků odměřit průtok a následně ho zohlednit do parametrů samotného regulátoru. Nejprve odečtu z měřicího přístroje při spodním mezním tlaku 2 bary průtok. Postup budu opakovat až do horního mezního tlaku 10 barů při skocích vždy o 1 bar. Hodnoty průtoků pak použiji v simulaci, kterou vytvořím v prostředí MATLAB a následně upravím parametry regulátoru v řídicím systému Siemens.

2.2 Výsledky měření a zhodnocení

V počátku měření jsem narazil na dva zásadní problémy. Tím prvním je odchylka průtoku. Při změně tlaku dochází k jeho velmi malým změnám. Rozdíl mezi oběma mezními tlaky 2 a 10 barů činil pouhé 0,5 l/min. a hodnota zobrazeného průtoku při konstantním tlaku nebyla ustálená. Problém je patrně způsoben špatně zvoleným měřicím přístrojem pro

měření průtoku, který byl pro tento systém špatně navržen. Proudění zřejmě není stacionární a u přístroje nelze měnit měřicí rozsah. Zobrazené hodnoty nebyly ustálené a měnily se v řádech jednotek mililitrů.

Druhým problémem bylo zjištění, že průtoky vůbec nekorespondovaly s hodnotami, které uvádí výrobce trysky. Tabulku hodnot předkládám na *Obr. 2.1*. Z měření tedy vyplývá, že hodnoty průtoků nelze použít a zakomponovat do dané regulované soustavy. Po konzultaci se zaměstnavatelem a vedoucím práce jsme tuto možnost zavrhlí. V závislosti na ceně měřicího přístroje, změnách průtoků a velké diferenci reálných naměřených průtoků od hodnot, které udává výrobce, jsem zvolil dva faktory pro zlepšení činnosti samotného regulátoru.

Spritzwinkel bei 3 bar	Düsen Nr.	Äquiv. Mundstück #	Mischen Je Teil	Düsenwerkstoff			Durchfluß l/min.															Spritzwinkel **			
				Messing	SS	HSS	0.5 bar	1 bar	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar	7 bar	10 bar	15 bar	20 bar	35 bar	1.5 bar	3 bar	6 bar	15 bar			
73°	730023	0.30	200					0.05	0.07	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.16	0.20	0.23	0.31	50°	73°	89°	97°			
	730039	0.41	200					0.09	0.12	0.15	0.18	0.20	0.22	0.23	0.28	0.34	0.39	0.52	53°	73°	87°	93°			
	730077	0.56	100	X				0.12	0.17	0.25	0.30	0.35	0.39	0.43	0.46	0.55	0.67	0.78	53°	73°	86°	92°			
0°	000009	0.20	200					0.01	0.02	0.03	0.035	0.04	0.045	0.05	0.054	0.06	0.08	0.09	0.12	0° Vollstrahl					
	000012	0.25	200		X			0.02	0.03	0.04	0.05	0.054	0.06	0.066	0.07	0.09	0.11	0.12	0.16						
	000019	0.30	200	X	X			0.03	0.04	0.05	0.07	0.09	0.10	0.105	0.11	0.14	0.17	0.25							
	0002	0.99	50	X				0.32	0.45	0.64	0.78	0.90	1.0	1.1	1.2	1.4	1.8	2.0	2.7						

Obr. 2.1 Tabulka normalizovaných průtoků při různém tlaku [3]

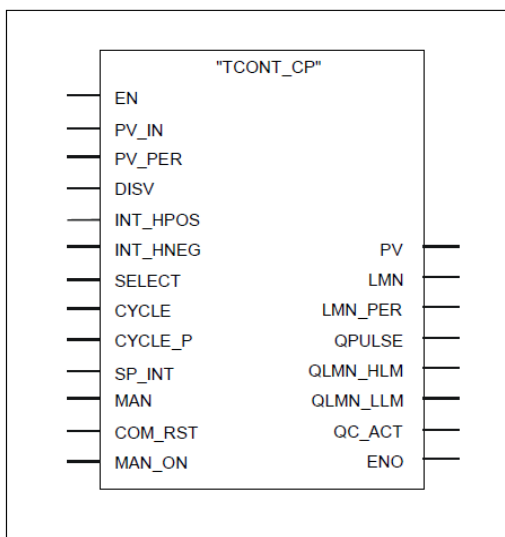
Prvním je omezení přehlcení integračního členu *anti-windup* metodou a tím druhým je zavedení *feed-forward* vazby do regulace, abychom minimalizovali vliv změny tlaku vody na prudký nárůst teploty v nádobě. Řešením a modelem regulátoru se budu věnovat v následujících kapitolách.

3 Simulační model regulátoru Siemens FB 58, jeho funkce a parametry

3.1 Jak funguje funkční blok FB 58

Daný algoritmus je know-how firmy Siemens, proto je možné pouze nastavit parametry pro správnou funkčnost systému. Popis a nastavení parametrů je detailně popsáno v manuálu, který příkládám jako přílohu.

Při deklaraci struktury, která je automaticky vygenerována prostředím SIMATIC, získáme možnost nastavení určitých parametrů. Struktura je velká, možnost ovlivnění jejich dat je však omezená. Máme na výběr pouze v konfiguraci vstupů, nastavení hodnot pro omezení jednotlivých složek a možnost, v jakém formátu chceme výstup z regulátoru mít. Na následující obrázku *Obr. 3.1* předkládám hodnoty, které lze nastavit.



Obr. 3.1 Funkce FB 58 a její parametry [2]

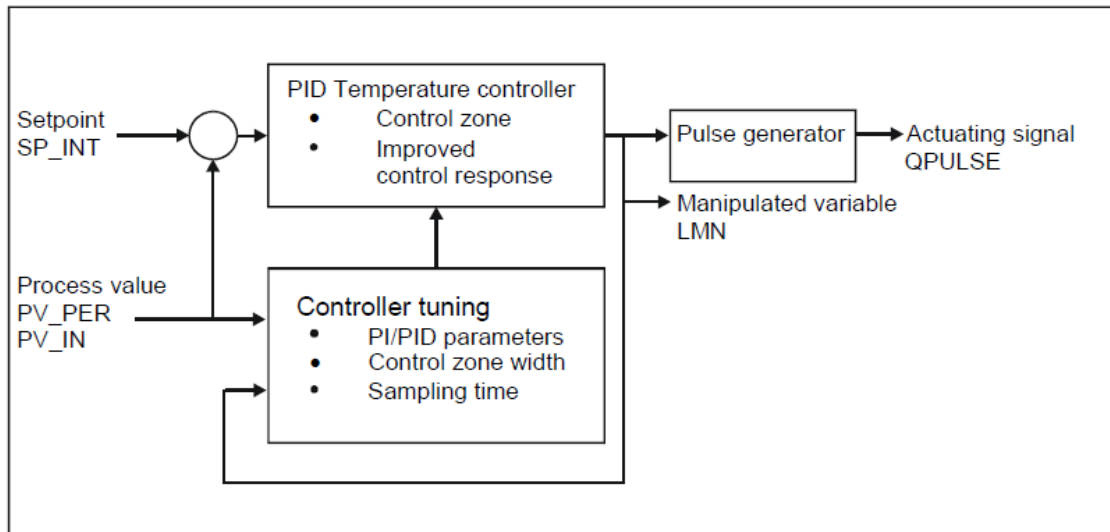
Současné nastavení regulátoru bych krátce popsal. Vstupuje do něj aktuální teplota, která je již normovaná v °C, požadovaná hodnoty teploty, též normovaná, druh regulace a její způsob. U druhu regulace je nastaveno kontinuální, což znamená, že při každém, novém cyklu programu pokračuje.

Způsob regulace je potřeba trochu podrobněji popsat. Nastavit je možné několik režimů. Pro tento případ je samotný regulátor umístěn v programovém cyklu s vyšší prioritou, tzn., že pracuje a vyhodnocuje své hodnoty každých 100 ms, přičemž jejich následné zpracování probíhá v hlavním cyklu. Z hlediska funkce je potom pulsně šířková modulace nastavena jako poměr mezi dobou periody a šířkou vzorkovacího impulsu.

U výstupu z regulátoru je nastaven jeho rozsah 0 až 100%, jako informativní hodnota pro vizualizaci, přičemž procentuální hodnota uvádí šířku z celého rozsahu PWM. Přenášený výkon je poté dán digitálním výstupem z regulátoru, kterým spínáme topnou spirálu (akční zásah).

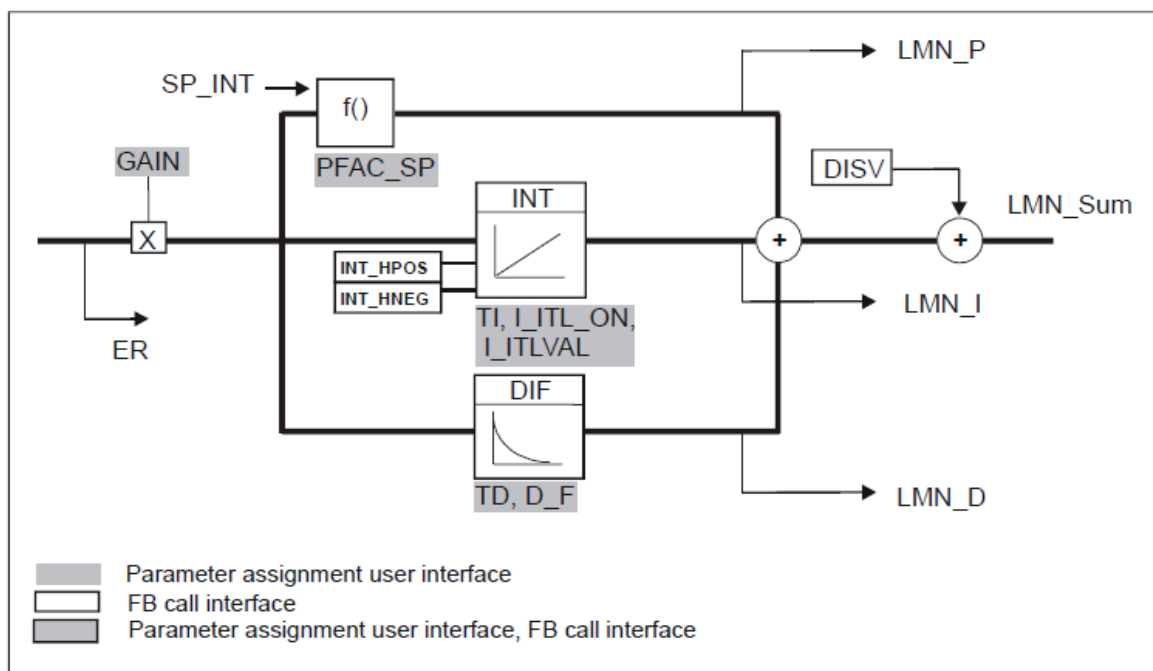
3.2 Simulační model a blokové schéma regulátoru FB 58

Níže je obrázek simulačního modelu s popisem jednotlivých struktur a vstupními popř. výstupními parametry *Obr. 3.2*.



Obr. 3.2 Simulační model PID regulátoru FB 58 [2]

Dále předkládám blokové schéma celého regulátoru, kde jsou vidět vstupní parametry, jednotlivá omezení, které lze nastavit a výstupní hodnota z regulátoru Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Blokové schéma PID regulátoru FB 58 [2]

V návaznosti na správnou funkčnost regulátoru bych se chtěl pokusit o optimalizaci pomocí těchto parametrů: INT_HPOS, což je omezení integrační složky, dále nastavit správnou hodnotu parametru DISV pro výstup LMN, metodou feed-forward, popř. při restartu regulátoru určit výstupní složku LMN_I parametrem I_ITLVAL pro prvotní oteplení spirály. Určení parametrů dle simulací a následná implementace do řídicího systému je popsána v následující kapitole na *Str. 18*.

3.3 Přepis regulátoru FB 58 do skriptu Matlab

Pro představu jsem v Matlabu vytvořil skript, který po zadání vstupních hodnot funguje jako PID regulátor v prostředí Siemens. Jako vstupní veličiny byly použity požadovaná teplota a skutečná teplota, měřená v reálném čase.

Dále zadáme zesílení, integrační a derivační časovou konstantu. Aby přepis co nejvíce odpovídal bloku FB 58, volíme časový krok výpočtu a regulátor je navíc doplněn o dopřednou složku a DEADZONE, což je omezení maximální a minimální hodnoty, regulační odchylky. Pro dopřednou složku nutné zadat délku periody a vzorkovací periody v sekundách.

Pro náš případ je skript ještě upraven pro omezení výstupu na 0 – 100 % a byla vytvořena ještě pulsní šířková modulace PWM. Na *Obr. 3.4* předkládám část skriptu.

```
function lmn_out_ff=PID_reg(dt_ff,t_soustava,tw_ff,th20_ff,kr_ff,Tr_ff,Td_ff,feedf,lim,clamping_ff, deadzone_min,deadzone_max)

% funkce regulatoru
% vstupy: dt_ff - casovy krok vypoctu, t_soustava - casovy krok soustavy,
% tw_ff - pozadovana teplota, th20_ff - skutecna teplota, kr, Tr, Td - konstanty regulatoru,
% feedf - feedforward_input, lim - omezeni vstupu 0-100% (boolean), clamping_ff - clamping (0
% NE, 1 ANO), deadzone_min, deadzone_max - mrtva zona: min hodnota a max hodnota reg odchylky

persistent ef_ff
if(isempty(ef_ff))
    ef_ff=0;
end
persistent lmnI_ff
if(isempty(lmnI_ff))
    lmnI_ff=0;
end

persistent lmn_ff
if(isempty(lmn_ff))
    lmn_ff=0;
end

if t_soustava==0

if (isempty(deadzone_min))
    deadzone_act=0;
else
    deadzone_act=1;
end

if deadzone_act==1
    if (isempty(deadzone_max))
        deadzone_act=0;
    end
end
end
```

Obr. 3.4 Ukázka kódu v Matlabu - přepis FB 58

4 Návrh optimalizace regulátoru metodou anti-windup a metodou feedforward

Parametry navrhujeme dle simulací z algoritmů v programu MATLAB. Provedeme úpravu skriptu a následně zakomponujeme parametry do struktury regulátoru v řídicím systému Siemens. Abychom však mohli obě metody správně aplikovat, provedeme nejdříve jejich teoretický rozbor.

4.1 Metody anti-windup

4.1.1 Windup jev

I když existuje mnoho účinných metod, jak správně nastavit PID regulátor k omezení nežádoucích jevů, ve většině případů používáme tzv. anti-windup metodu. Ta vychází z omezení windup jevu.

Přítomnost nelineárních efektů v regulátorech omezuje jejich výkon a způsobuje známý fenomén přetečení integrační složky. Všechny fyzické systémy podléhají saturaci akčního členu, protože ne všechny složky regulátoru mají omezení. Limitní hodnoty akčního členu způsobují nelineární efekt, který lze vyjádřit termínem nasycení – windup jev.

Jedna ze strategií k potlačení windupu je např. resetování a zpětný výpočet. Druhou metodou je tzv. clamping. Tyto dvě metody nejčastěji používáme k potlačení tohoto jevu, čím se snažíme omezit negativní dopad a přiblížit chování regulační smyčky ideálním podmínkám.

Pokusím se o simulaci obou metod. Pro správné potlačení jevu je však nutné aby proběhla detekce okamžiku, kdy výstup regulátoru již dosáhl saturace. Toho dosáhneme tím, že porovnáme hodnotu výstupu regulátoru a skutečného akčního zásahu, který je přiveden do regulované soustavy. Za předpokladu, že výstupní signál regulátoru překročí hranici saturace, je na výstupu rozdílového členu signál větší než nula.

Tato odchylka nám určuje necitlivost, jejíž šířka pásma je dána spodní a horní hranicí saturace. K použití této metody je však potřeba znát mezní hodnoty saturace, což v tomto případě nebude problém, protože známe maximální výkon topné spirály [4], [5].

4.1.2 Metoda clamping

Při této metodě dochází k omezení integrační složky, pokud jsou splněny určité podmínky. Snahou je předejít vzniku samotného windup jevu, který v této složce vzniká.

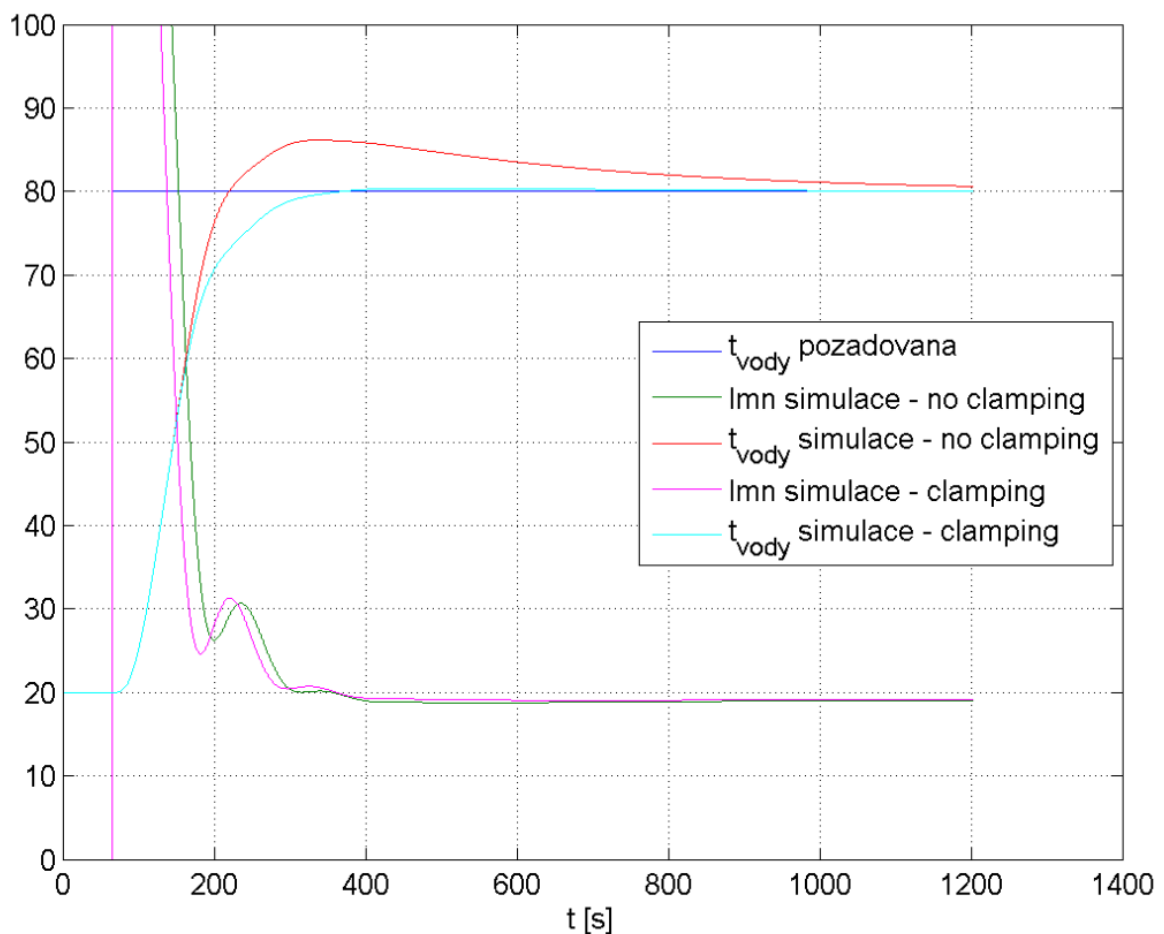
Jednou z podmínek je hodnota regulační odchylky, která v případě, že je vysoká, přeruší nárůst integrační složky a tím předcházíme stavu, aby se výstup regulátoru nedostal za hranici saturace.

Tato metoda má však jednu chybu a to takovou, že regulace může skončit s nenulovou regulační odchylkou, pokud došlo k omezení integrační složky, která měla vysokou hodnotu. Tento nežádoucí jev potlačujeme tím, že pokud je výstup regulátoru za hranicí saturace a s regulační odchylkou má stejné znaménko, integrační složku vypínáme a jestliže má regulační odchylka znaménko opačné, do integrační složky nezasahujeme [4].

4.1.3 Simulace metody clamping

Pro simulaci se upravil stávající algoritmus z bakalářské práce. Omezil jsem pouze akční zásah a hodnotu integrační složky. Simulace byly provedeny opět pro dva mezní tlaky 2 bary a 10 barů s velikostí regulační odchylky 60 °C, což je prvotní natopení spirály.

K porovnání předkládám graf přechodových charakteristik pro tlak vody 2 bary bez clampingu a s clampingem na *Obr. 4.1*.

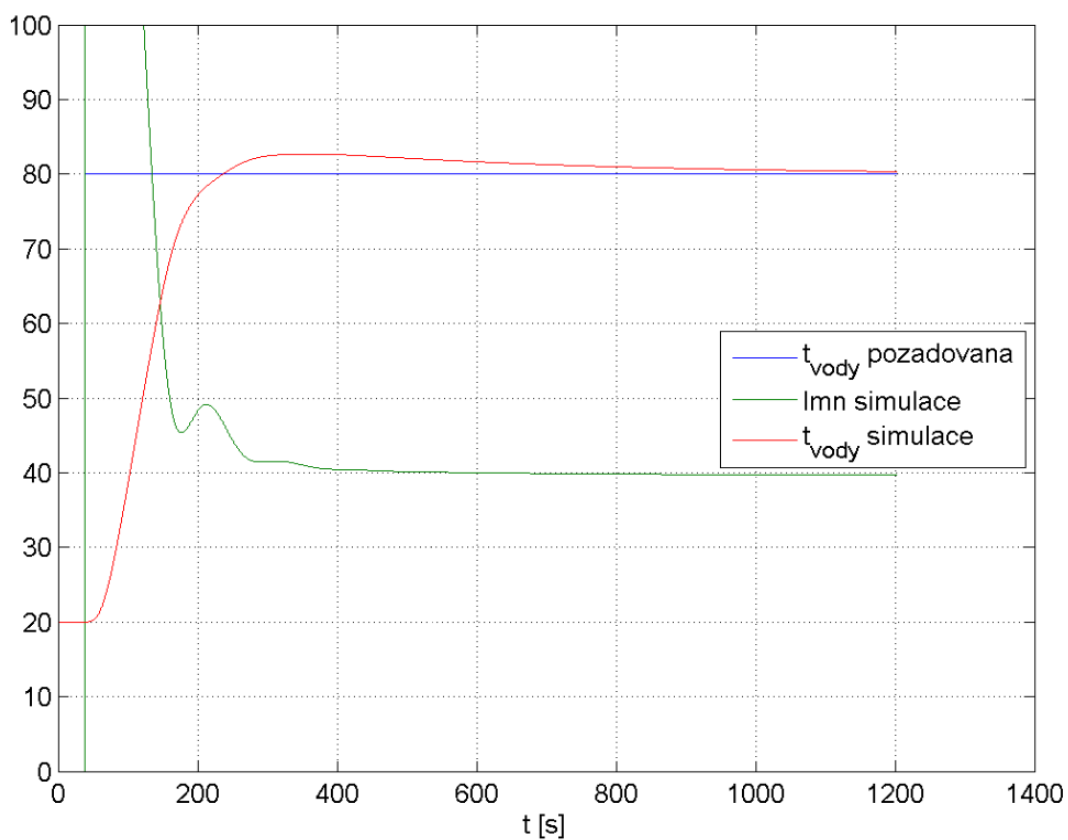


Obr. 4.1 Přechodové charakteristiky bez clampingu a s clampingem pro tlak 2 bary

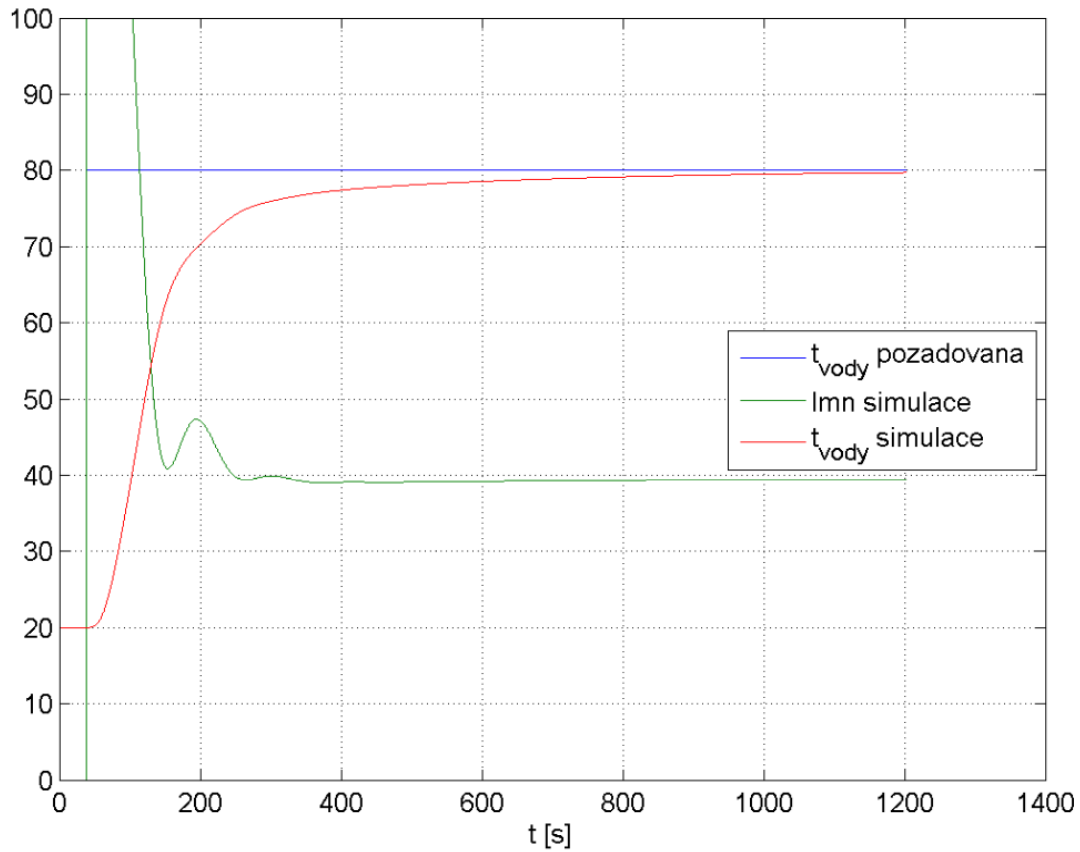
Z grafu je patrné, že při použití metody clamping už teplota vody nedosáhne hodnoty 85 °C a regulace je tudíž prakticky bez překmitu. Podstatně lépe však charakteristiky vycházejí pro tlak 10 barů, kde s clampingem teplotu 80 °C nepřesáhneme. Pro představu opět *Obr. 4.2* bez clampingu a *Obr. 4.3* s clampingem.

V následující kapitole ještě provedeme ověření metodou zpětného výpočtu. Výsledky simulací potom analogicky převedeme do řídicího systému a hodnoty pro omezení integrační složky získáme při sledování regulátoru v reálném čase.

Pro představu dále předkládám kód z Matlabu pro metodu clamping. Vycházel jsem ze simulací, uvedených v bakalářské práci. Na *Obr. 4.4* je výtah ze skriptu.



Obr. 4.2 Přechodové charakteristiky bez clampingu pro tlak 10 barů



Obr. 4.3 Přechodové charakteristiky s clampingem pro tlak 10 barů

```

%   end
   lmnD(it)=kr*Td*(ef(it)-efold(it))/dt;
   lmn(it)=lmnP(it)+lmnI(it)+lmnD(it);
   lmn_calc(it)=lmn(it);

   %clamping
   if clamping==1
       if lmn(it)>lmnMax || lmn(it)<lmnMin
           if lmn(it)*e(it)>0 && lmnI(it-1)~=0
               lmnI(it)=lmnI(it-1);
           end
       end
   end
end

if lmn(it)>lmnMax lmn(it)=lmnMax; end
if lmn(it)<lmnMin lmn(it)=lmnMin; end

%   if tw<1
%       lmnI=lmnI

```

Obr. 4.4 Ukázka skriptu – metoda clamping

4.1.4 Metoda zpětného výpočtu

Jak již název metody napovídá, opírá se o výpočet přes zpětnou vazbu se sledovací časovou konstantou. Princip spočívá v tom, že v okamžiku, kdy výstup regulátoru saturuje, připisujeme integrační složce takovou hodnotu, aby výstup regulátoru byl na saturačním limitu.

Výhoda této metody spočívá na faktu, že integrační složku není třeba resetovat okamžitě, ale dynamicky sledovací časovou konstantou. Řídicí systém má navíc možnost zpětné vazby, která je generována měřením rozdílu mezi výstupem regulátoru a regulační odchylkou. Tím se vytvoří chybový signál, který je veden zpět do integrační složky. Pokud je signál nulový, nedochází k nasycení a jeho hodnota tedy nebude mít na normální provoz žádný vliv. Pokud výstup saturuje, signál je různý od nuly, přivedeme na zpětnou vazbu takovou hodnotu, abychom dosáhli nulové integrační složky. Hodnota sledovací časové konstanty nám tím určuje, jak rychle bude integrační složka resetována. Tato konstanta má viditelný účinek na výkon celého systému, její hodnotu však nelze libovolně zvolit. Základní pravidlo se opírá o skutečnost, že časová konstanta sledování by měla být mezi časem integrace a časem derivace [4], [5].

4.1.5 Simulace metody zpětného výpočtu

U této metody jsem k určení sledovací časové konstanty provedl nejprve simulace pouze s časem integrace a s časem derivace. Dle následujícího vzorce (4.1) poté určíme její hodnotu:

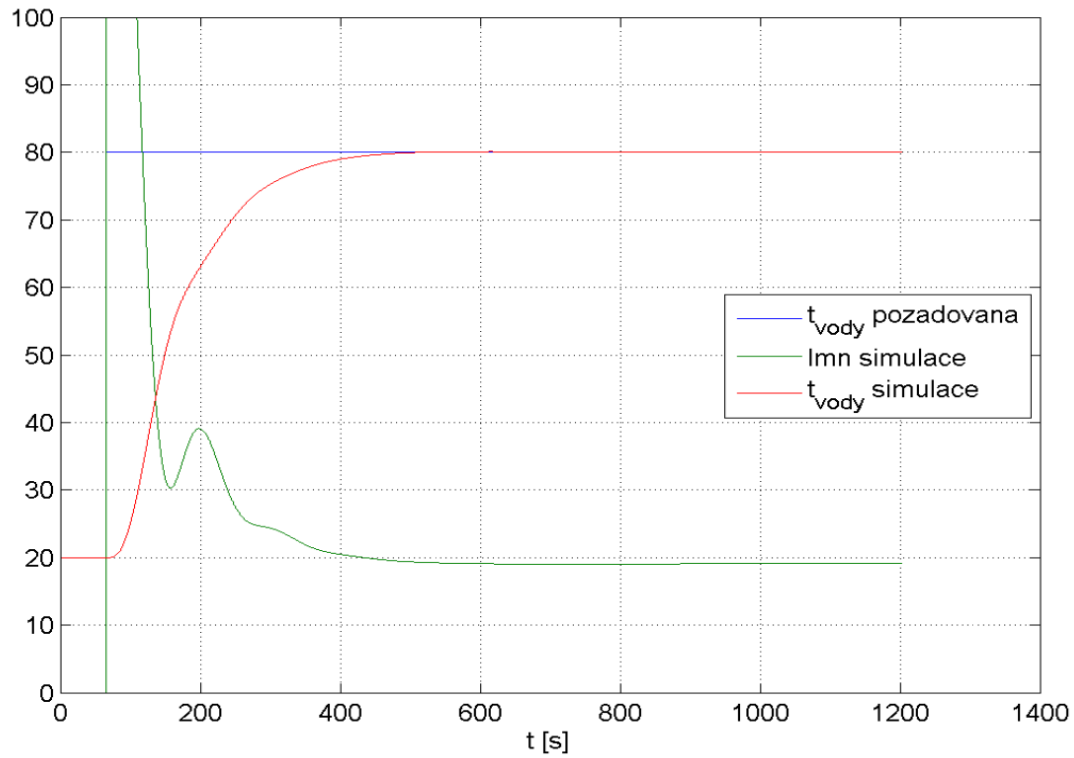
$$T_t = \sqrt{T_i \cdot T_d} \quad (4.1) [5]$$

Opět použijeme dva mezní tlaky 2 a 10 barů. Při této metodě ovšem přechodové charakteristiky vycházejí daleko lépe. Nárůst aktuální teploty je rozdílný. V předchozím případě došlo u nižšího mezního tlaku k překročení požadované hodnoty teploty o 5 °C a při dalším zásahu regulátoru se aktuální teplota ustálila na 80 °C až po 20 minutách.

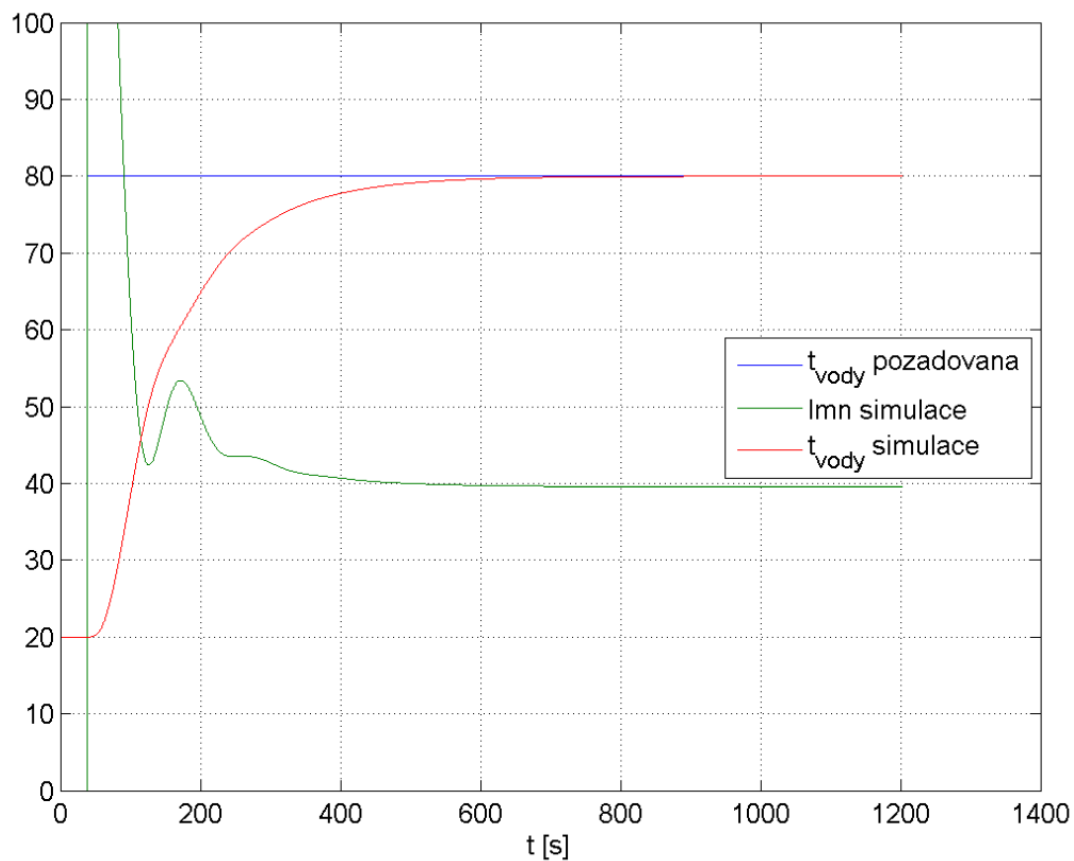
Pokud porovnáme graf křivky pro clamping na *Obr. 4.1* s grafem na *Obr. 4.5* vidíme, že průběh teploty je podstatně lepší.

U druhého mezního tlaku 10 barů můžeme říci, že teplota má prakticky stejný průběh, ale nemá tak velký akční zásah, jako v případě clampingu. V reálných podmínkách se patrně prodlouží doba regulace, proto jsem pro její zrychlení zkrátil integraci (použil jinou integrační konstantu), což bych chtěl ověřit i v praxi. Rozdíly jsou vidět na *Obr. 4.3* a na

Obr. 4.6. Průběhy bez metody zpětného výpočtu jsou totožné jako v předchozí kapitole na obou grafech Obr. 4.1 a Obr. 4.2.



Obr. 4.5 Přebodové charakteristiky se zpětným výpočtem pro tlak 2 bary



Obr. 4.6 Přebodové charakteristiky se zpětným výpočtem pro tlak 10 barů

Na přiloženém médiu jsou dále uloženy grafy s nastavením sledovací časové konstanty, pokud je rovná integrační a derivační časové konstantě. Pro její správné nastavení zde uvádím pouze grafy pro oba mezní tlaky, na nichž je hodnota sledovací časové konstanty určena ze vzorce z předchozí stránky a splňuje podmínku základního pravidla – je větší než integrační a menší, než derivační.

Pro úplnost opět přikládám skript z Matlabu pro metodu zpětného výpočtu na Obr. 4.7.

```
% if (lmn>lmnMin) && (lmn<lmnMax)
if back_calc==1
    lmnI(it)=lmnI(it-1)+(kr*e(it)/Tr+back_calc_sign(it-1))*dt;
else
    lmnI(it)=lmnI(it-1)+(kr*e(it)/Tr)*dt;
end
end

lmnD(it)=kr*Td*(ef(it)-efold(it))/dt;
lmn(it)=lmnP(it)+lmnI(it)+lmnD(it);
lmn_calc(it)=lmn(it);

if lmn(it)>lmnMax lmn(it)=lmnMax; end
if lmn(it)<lmnMin lmn(it)=lmnMin; end

%back_calc
if back_calc==1
    diff_act=lmn(it)-lmn_calc(it);
    back_calc_koef=sqrt(Tr*Td);
    back_calc_koef=Tr;
    back_calc_sign(it)=(1/back_calc_koef)*diff_act;
end
```

Obr. 4.7 Ukázka skriptu – metoda zpětného výpočtu

4.2 Metoda feedforward

4.2.1 Princip metody

Tato metoda vychází z předpokladu predikce. Doplněním feed-forward složky odhadneme výstup z řídicího algoritmu PID regulátoru bez nutnosti čekání na jeho odezvu. Jestliže dokážeme velmi přesně odhadnout výstup regulátoru, jehož úkolem je vyrovnávat stávající odchylku mezi aktuální a požadovanou hodnotou, bude potřeba ke korekci odchylky vykonat méně práce.

Složka feed-forward snižuje odchylku rychleji nebo ji udržuje menší, než výstup samotného PID regulátoru. Složku spočítáme pomocí žádané hodnoty a jejich derivátů, poté vynásobíme každý z nich ziskem.

Aplikace pro regulaci teploty obvykle feed-forward řízení nevyužívají, protože celý proces

je relativně pomalý a integrační složka má dostatečný čas vyrovnat regulační odchylku. Pro tento případ je však aplikace této metody žádoucí, protože díky změnám tlaku vody se setkáváme velkými výkyvy teploty.

Parametry určujeme dle matematického modelu řízené operace či procesu. Rovnice vychází ze skutečnosti, že dopředné zisky (model zařízení) je převrácenou hodnotou celého zařízení. Žádoucím cílem je, aby regulovaná veličina byla stejná jako žádaná hodnota a tudíž neexistovala odchylka. U většiny modelů se feed-forward složka musí ladit manuálně, protože není dostupný model zařízení. [6] Toto však není náš případ, protože známe model celé soustavy a na základě simulací jsme schopni celkem přesně určit příspěvek dopředné složky k výstupu z regulátoru. Matematicky určujeme přenosovou funkci feed-forwardu z Laplaceovy transformace. Řešení vede na soustavy diferenciálních rovnic vyšších řádů. Pro naše potřeby je však dostačující určit parametry ze simulací v programu MATLAB.

4.2.2 Simulace metody feed-forward

Abychom určili správný parametr pro dopředné řízení, je třeba zjistit, jak ovlivní změna průtoku, analogicky tlaku, teplotu vody v systému. Pro tyto účely je třeba znát hodnoty průtoků, které se však nepodařilo adekvátně změřit. Dalším problémem je neznalost přenosu poruchové smyčky, regulovaná soustava není lineární a metoda dopředného zisku je určena pouze pro lineární systémy. Známe ovšem zpětnou vazbu (feedback) regulované soustavy, s jejíž pomocí jsme schopni dle níže uvedené metody přenos poruchové smyčky zjistit.

Na základě těchto skutečností jsem postupoval dle návodu, který je uveden v řešených příkladech na oficiálních stránkách pro Matlab [8] a odvodil přenos regulované soustavy s dopřednou složkou na základě modelu, který byl určen v bakalářské práci a je na *Obr. 4.8.*, kde však chybí vstupní hodnota tlaku, jako simulovaná odezva na jeho změnu. Z řešených příkladů jsem aplikoval metodu dle schématu na *Obr. 4.9.*, kdy je potřeba určit parametry poruchové smyčky (disturbance model), které zjistíme z modelu regulované soustavy.

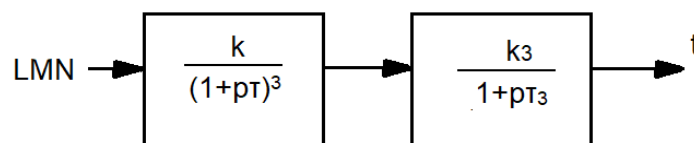
Pro názornost se nejprve upravil skript z bakalářské práce, ve kterém sleduji nárůst změny teploty i její vývoj při prvotním oteplení a změně tlaku z 10 na 2 bary, použil jsem model regulované soustavy *Obr. 4.8.* Nepovedlo se však adekvátně změřit průtoky, proto byly pro simulaci použity hodnoty z tabulky na *Obr. 2.1.*

V bakalářské práci byly změřeny hodnoty průtoku pro oba mezní tlaky v ustálených stavech a nekorespondovaly s průtoky od výrobce trysky. Problém spočíval ve špatné tabulce, která byla určena pro zcela jinou trysku. Vycházel jsem však z informací oddělení strojní konstrukce od mého zaměstnavatele. Abych mohl považovat hodnoty z tabulky na *Obr. 2.1* za adekvátní, provedl jsem znovu výpočet dle vzorců z kapitoly 2.1.2 [7] a ověřil je. Hodnoty se lišily pouze v řádu setin, tudíž můžeme uvažovat průtoky v ustálených stavech jako ověřené.

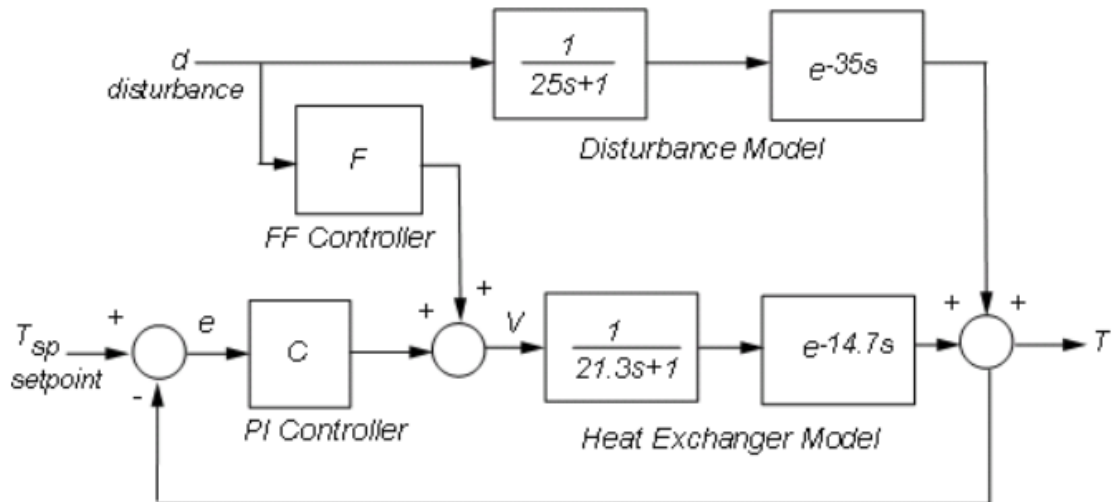
Pro určení přenosu poruchové smyčky při změně tlaku jsem vycházel z praktických zkušeností a na základě sledování vývoje teploty při změně tlaku u zákazníka, aplikoval pro simulaci přechodových charakteristik následující hodnoty tlaků a jejich změny, které se nejvíce používají. Pokud při skutečné teplotě 80 °C zvýšíme tlak z 3 na 6 barů, klesne teplota o 2 °C a k ustálenému stavu dojde zhruba za 60 s. V opačném případě měníme tlak ze 7 na 4 bary, teplota vzroste o 5 °C a opět se ustálí přibližně za 150 s.

Nyní tedy mám všechny data, abych pomocí simulací mohl odvodit přenos poruchové smyčky a dopředné složky regulované soustavy.

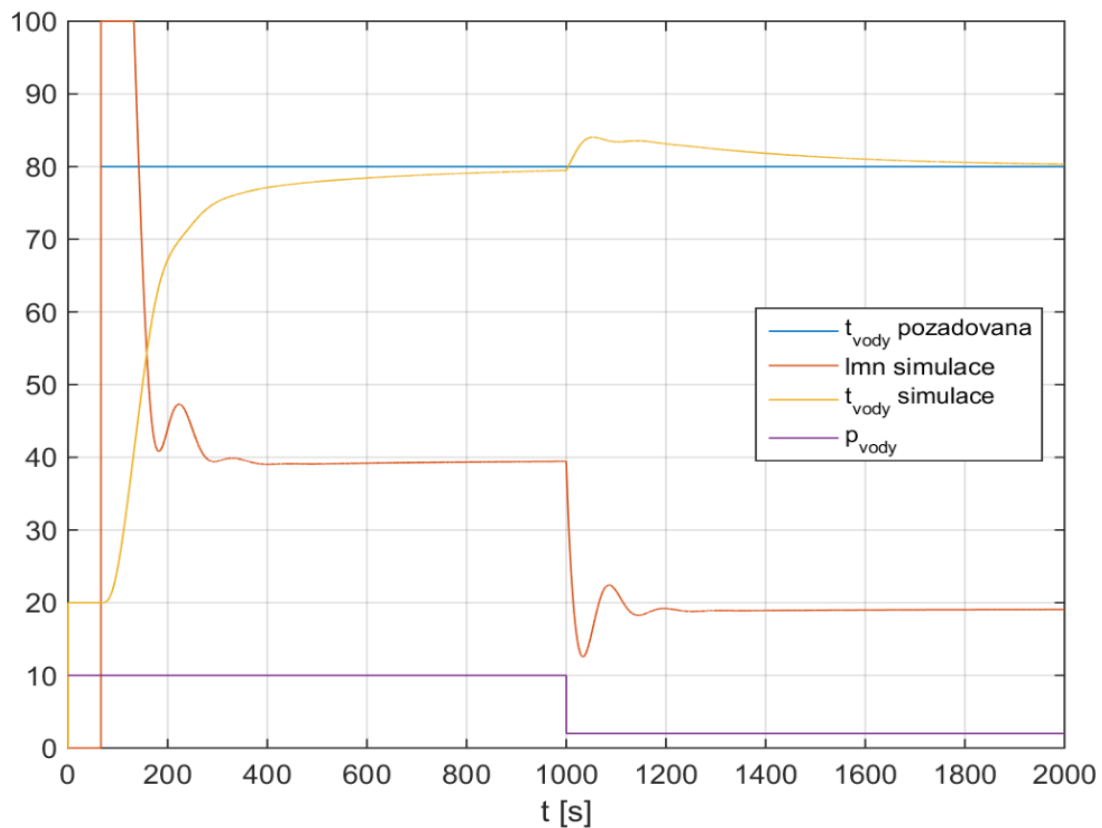
Provedeme nejprve simulaci přechodových charakteristik při změně obou tlaků. Dochází ke změně průtoku, regulátor pracuje stejně, ale nebere v potaz aktuální skutečnost vývoje teploty, která v prvním okamžiku začne stoupat a dosáhne maxima na 84 °C. Poté uplyne poměrně dlouhá doba, než dojde k novému, ustálenému stavu *Obr. 4.10*.



Obr. 4.8 Zjednodušený model regulované soustavy [7]



Obr. 4.9 Řízení zpětné vazby dopřednou složkou [8]

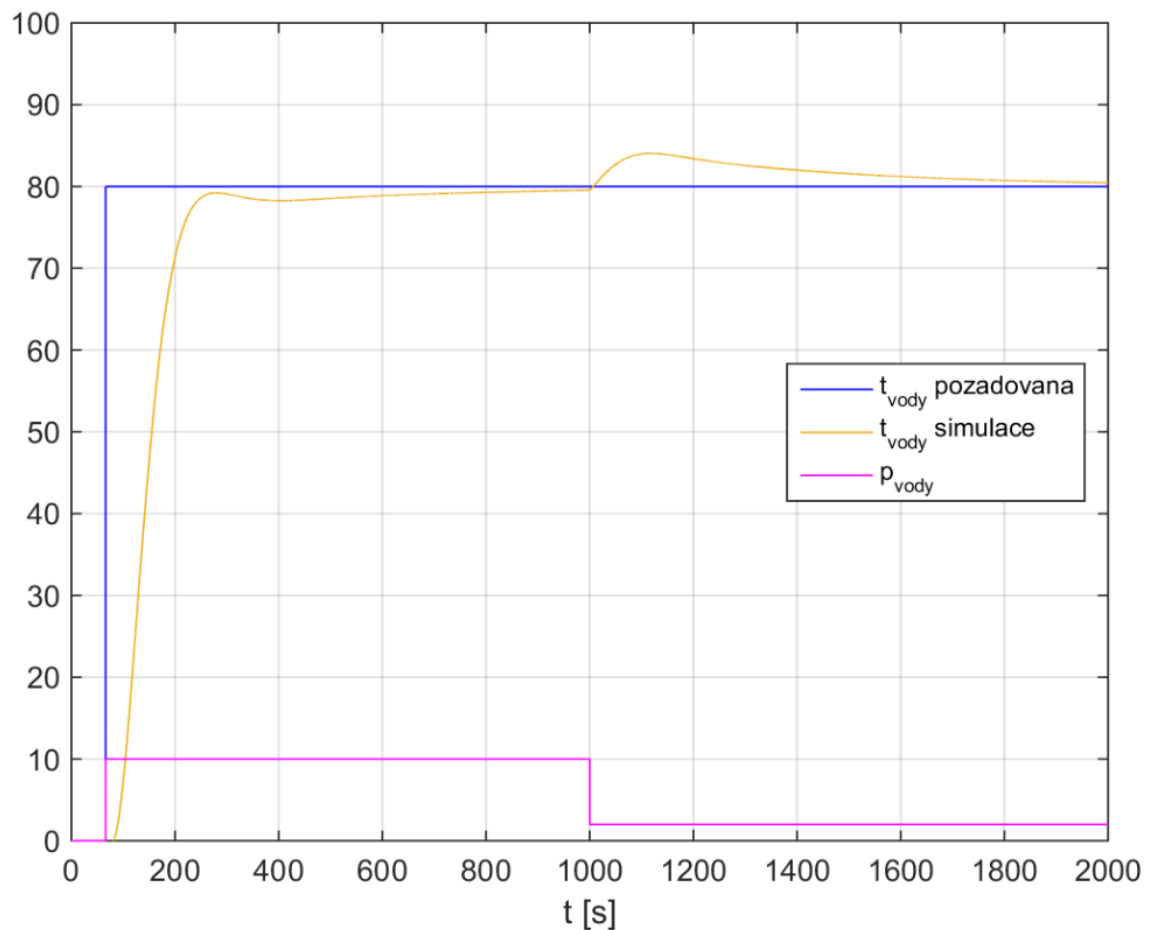


Obr. 4.10 Vývoj teploty dle modelu regulované soustavy

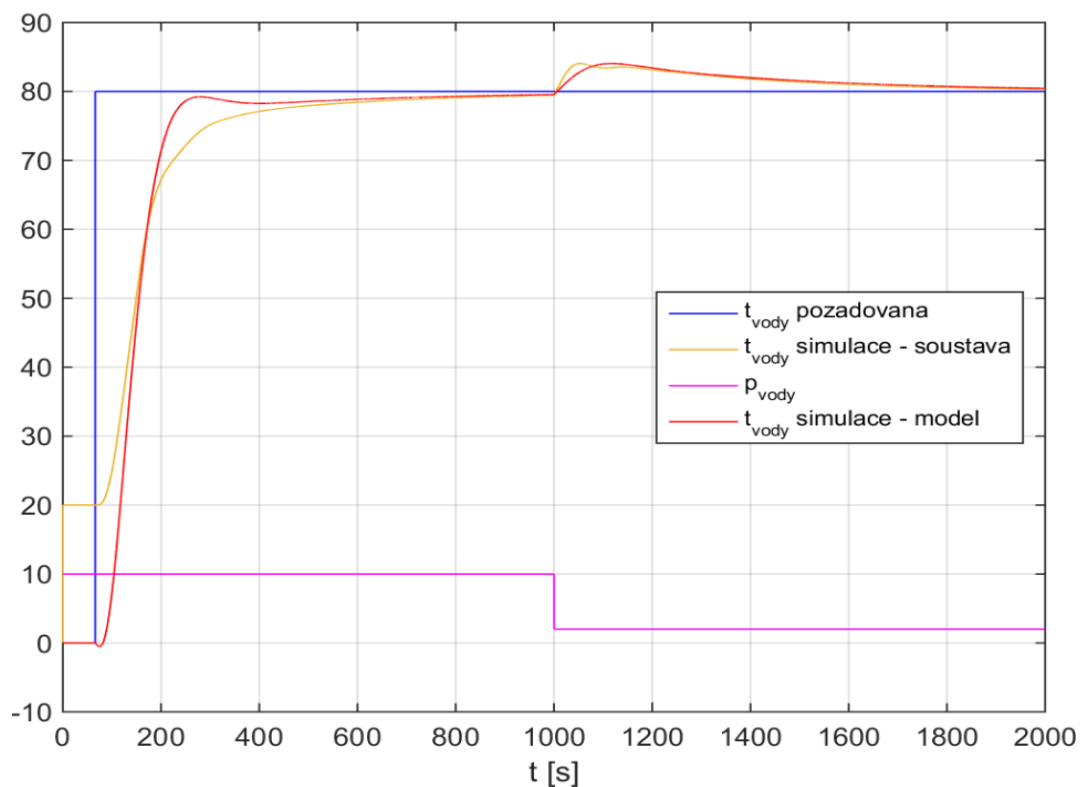
Přidáním dopředné složky do skriptu má vývoj teploty dynamický nárůst, což je vidět na části prvotního oteplení, překmit při změně tlaku však stále zůstává, přenos ještě není odladěný. I díky malým rozdílům v průtoku nám regulovaná soustava ovlivňuje nárůst teploty. Změna tlaku zůstává stejná Obr. 4.11.

Teď můžeme vytvořit skript, na kterém porovnáme oba dva grafy, je zde vidět rychlejší regulace v případě grafu s dopřednou složkou.

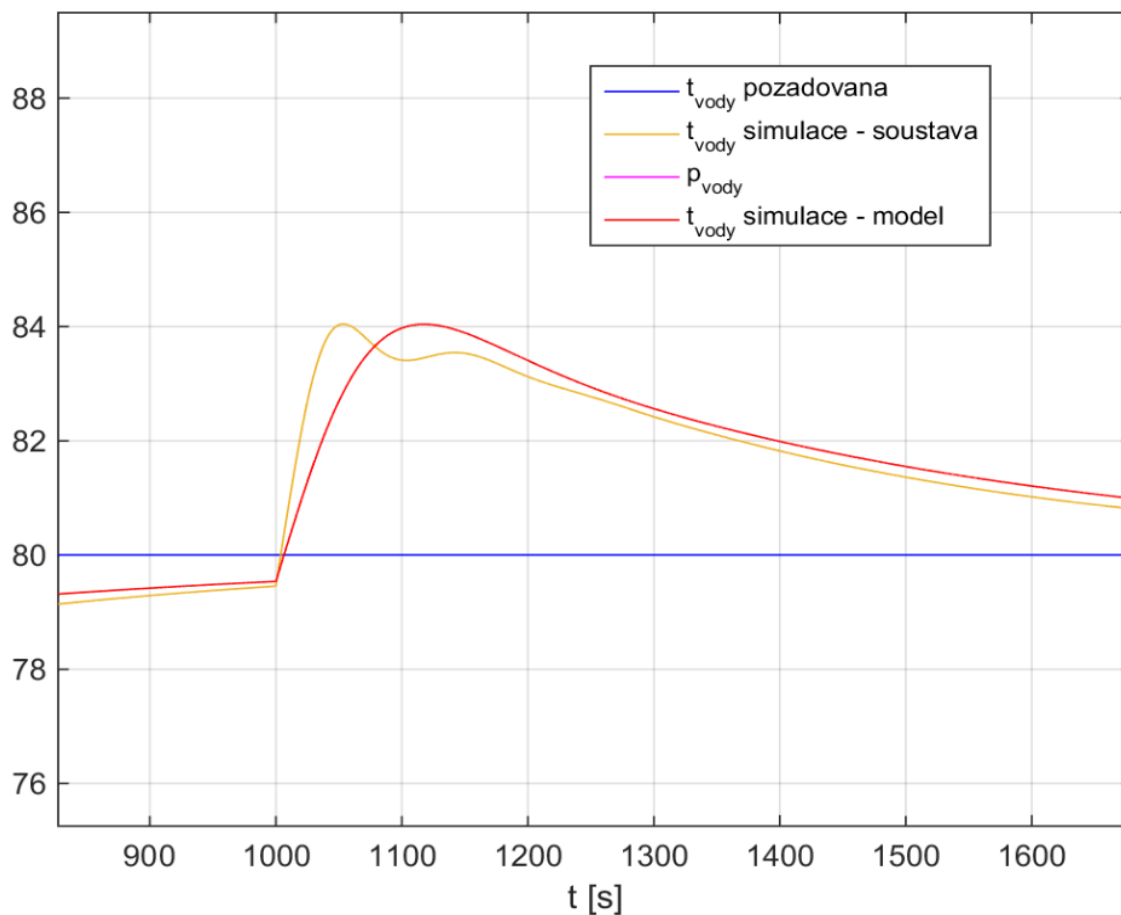
Na *Obr. 4.12* je porovnání obou křivek, pro lepší názornost byl na *Obr. 4.13* vytvořen detail, zobrazující část grafu, kdy dochází k nárůstu teploty vody, což ovlivnila změna průtoku.



Obr. 4.11 Vývoj teploty dle modelu regulované soustavy s dopřednou složkou



Obr. 4.12 Porovnání grafů – vývoj teploty bez a s dopřednou složkou

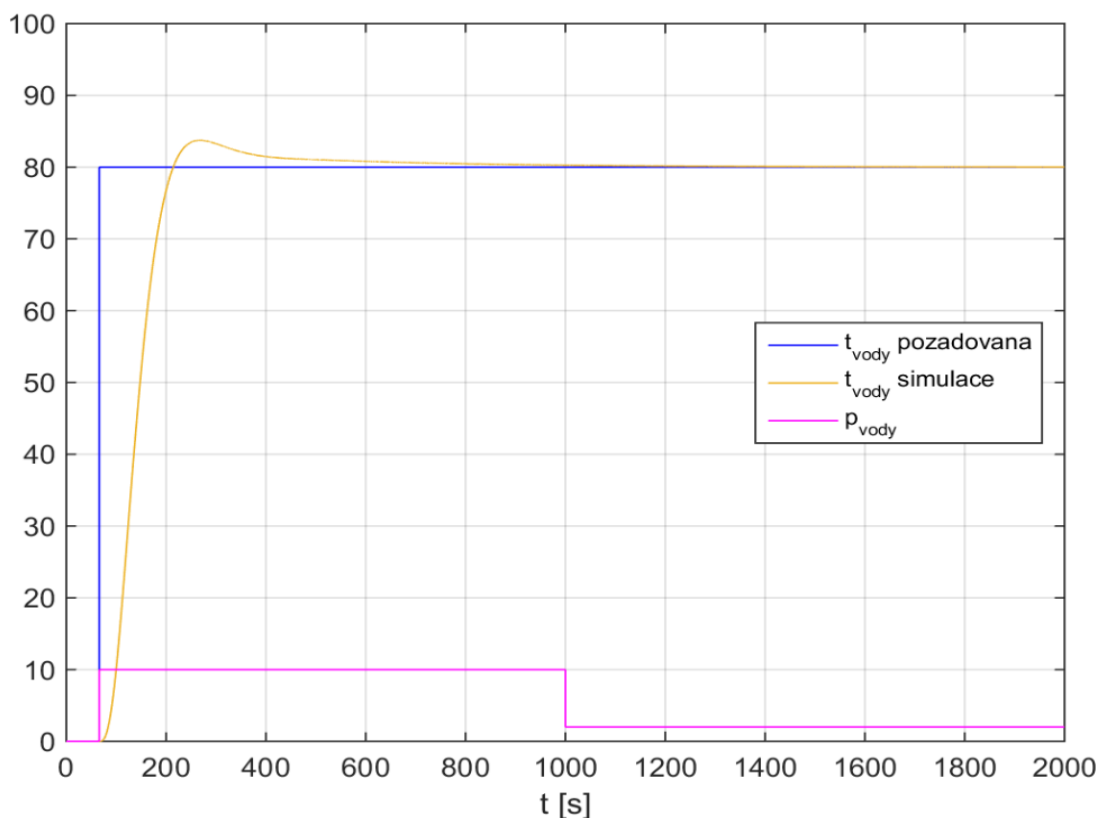


Obr. 4.13 Detail z předchozího grafu Obr. 4.12

Pro určení přenosu poruchové smyčky vycházím ze schématu na *Obr. 4.9* a výsledků simulace z grafu na *Obr. 4.13*. Výsledkem je poté znalost parametrů přenosu, které vycházejí z porovnání obou přechodových charakteristik – byla zde snaha co nejvíce přiblížit průběh simulované teploty, teplotě soustavy, aby byl přenos co nejpřesnější. Touto metodou se dostáváme k přenosu naší poruchové smyčky, odečtené ze Simulinku:

$$G_{d(s)} = \frac{-16\,000}{300s + 1} \quad (4.2)$$

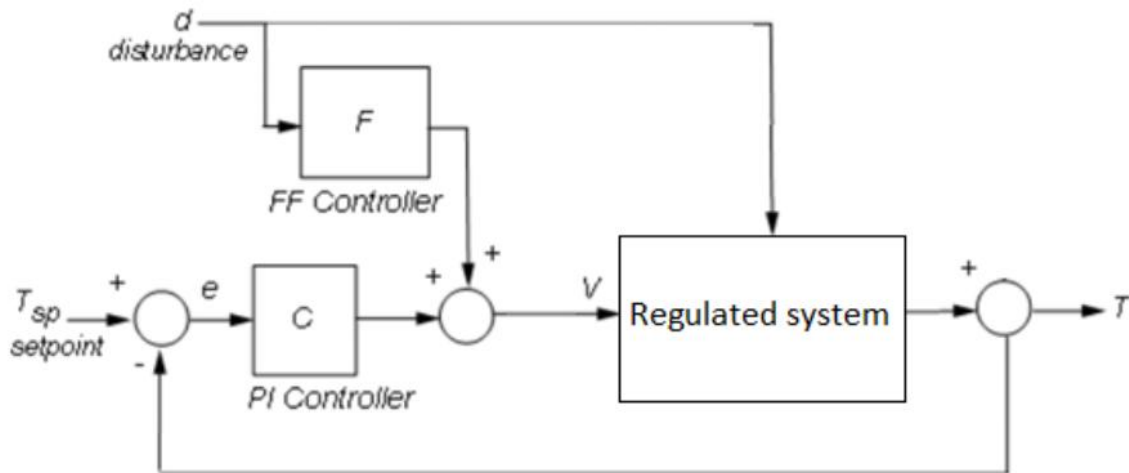
Nyní jsem při znalosti přenosu poruchové smyčky i přenosu regulované soustavy a odezvy regulované soustavy, vytvořil skript s doplněním o dopřednou složku. V grafu na *Obr. 4.14* je vidět, že již nedochází k nárůstu teploty při změně tlaku a zbývá nám tedy propojit regulovanou soustavu s regulátorem, porovnat výsledné, přechodové charakteristiky a určit přenos pro dopřednou složku.



Obr. 4.14 Přechodová charakteristika regulované soustavy, doplněná o dopřednou složku a poruchovou smyčku

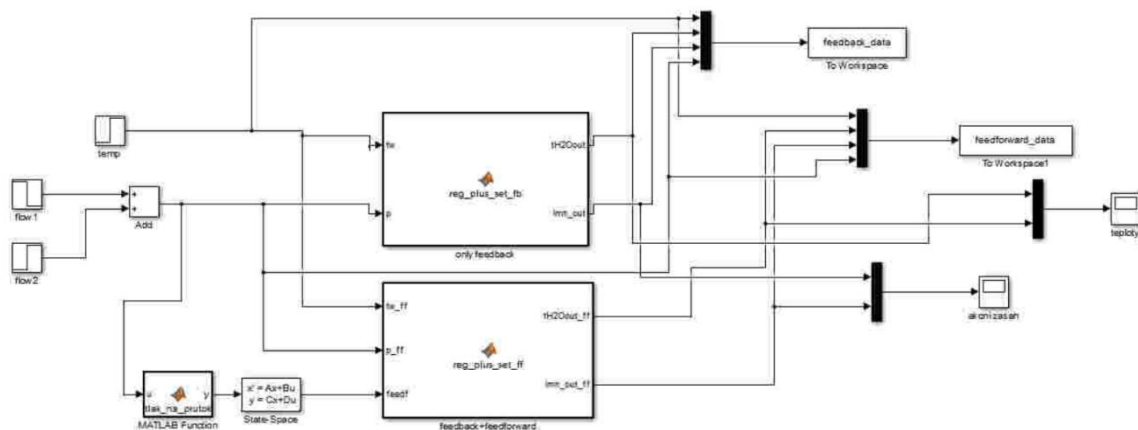
K určení přenosu poruchové smyčky a vykreslení grafů byl použit nástroj Matlabu s názvem Control system toolbox, což je přídatná aplikační knihovna určená k ladění parametrů regulátoru. Jako další nástroj pro identifikaci přenosu dopředné složky bylo nutné nainstalovat Simulink, který slouží k vytváření modelů dynamických soustav pomocí blokových schémat.

Nejprve jsem upravil schéma na *Obr. 4.9*. Poruchová smyčka byla vložena do regulované soustavy a úprava vypadá následovně na *Obr. 4.15*.



Obr. 4.15 Úprava modelu zpětné vazby s dopřednou složkou

V Simulinku se analogicky vytvořilo schéma jednotlivých bloků *Obr. 4.16* i s převodem tlaku na průtok. Tím se dostáváme na přesnější model přenosu dopředné složky. V této podobě můžeme sledovat dynamiku celého systému a vytvořit grafy přechodových charakteristik.



Obr. 4.16 Blokové schéma celého systému v Simulinku

Byla zde snaha o co nejvěrnější přiblížení skutečnosti, proto se při simulaci provedla změna tlaku nejprve z 10 barů na 2 bary, a když se teplota ustálila, tlak jsem navýšil z 2 barů na 6 barů, abych sledoval i změnu v opačném gardu, tzn. přechod z nižšího tlaku na vyšší tlak.

Pro určení přenosu dopředné složky vycházím ze schématu na *Obr. 4.9* a metodiky, která je uvedena na oficiálních stránkách. Výsledkem je poté znalost přenosu, vycházející z následujících vzorců, kdy nejprve uvažujeme s nulovým parametrem poruchy F , tudíž ho položíme rovno nule a poté vyjádříme funkci F , kde G_p je přenos regulované soustavy:

$$G_p F + G_d = 0 \rightarrow F = -\frac{G_d}{G_p} \quad (4.3) [8]$$

Ze Simulinku byl poté odvozen přenos pro dopřednou složku jako funkce, která má tento matematický zápis Laplaceovy transformace:

$$F = \frac{1,108^{10}s^4 + 2,914^9s^3 + 2,577^8s^2 + 7,836^6s + 16\,000}{480s + 1,6} \quad (4.4)$$

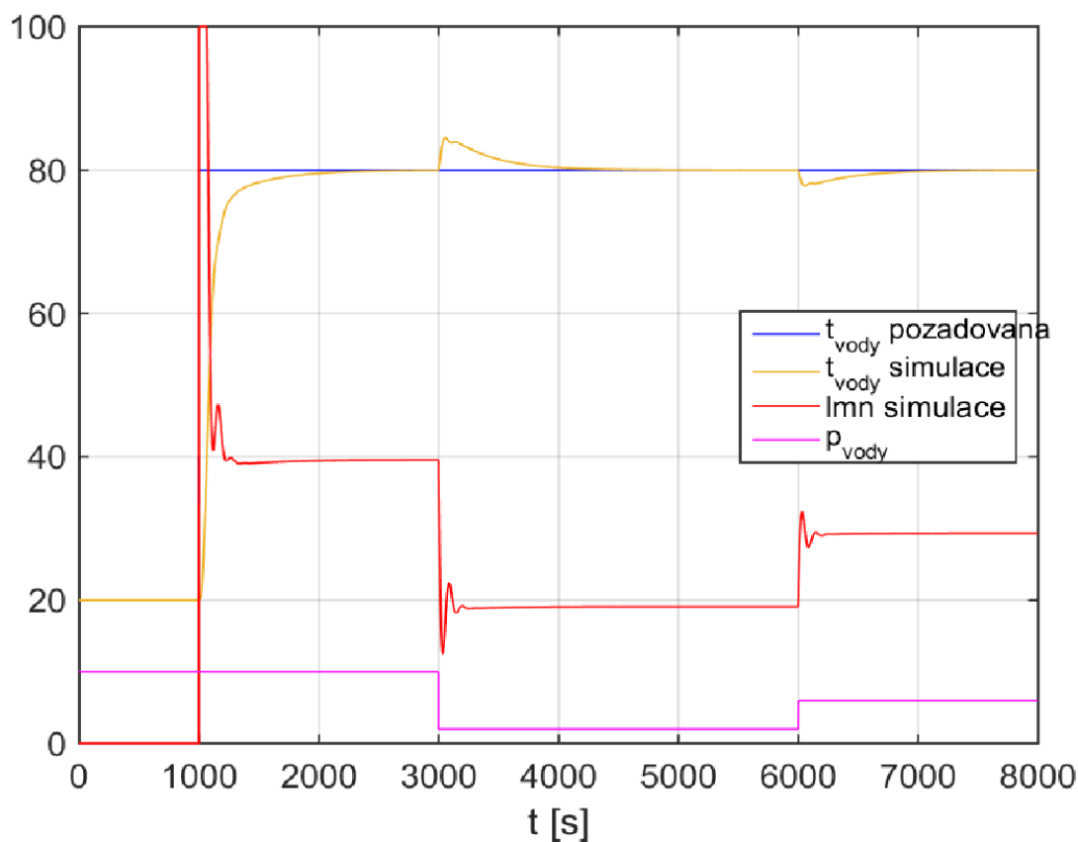
Z následujícího vzorce vyplývá, že se jedná o čtyři derivační bloky za sebou a dávají dohromady přenos celé dopředné složky.

Pro porovnání předkládám graf přechodové charakteristiky bez dopředné složky na *Obr. 4.17* a s dopřednou složkou na *Obr. 4.18*. Na obou grafech je aktuální vývoj teploty s překmitem, pokud dojde ke změně tlaku. Regulace je však rychlejší s dopřednou složkou a překmit je způsoben skutečností, že regulovaná soustava byla pouze aproximována, protože se nepodařilo změřit adekvátní hodnoty průtoku v reálných podmínkách.

Pro zjednodušení přenosu a jeho implementaci do řídicího systému uvažujeme z rovnice (4.4) pouze jmenovatel, který je směrodatný pro dynamiku celého procesu. Tento postup vychází z metody na oficiálních stránkách [10]. Provedu úpravu přenosu a poté ověření simulací v Simulinku, zda se křivky budou shodovat. Po vytknutí 1,6 dostaneme následující přenos za předpokladu, že zanedbáme proměnné „s“ v čitateli:

$$F = \frac{10\,000}{300s + 1} \quad (4.5)$$

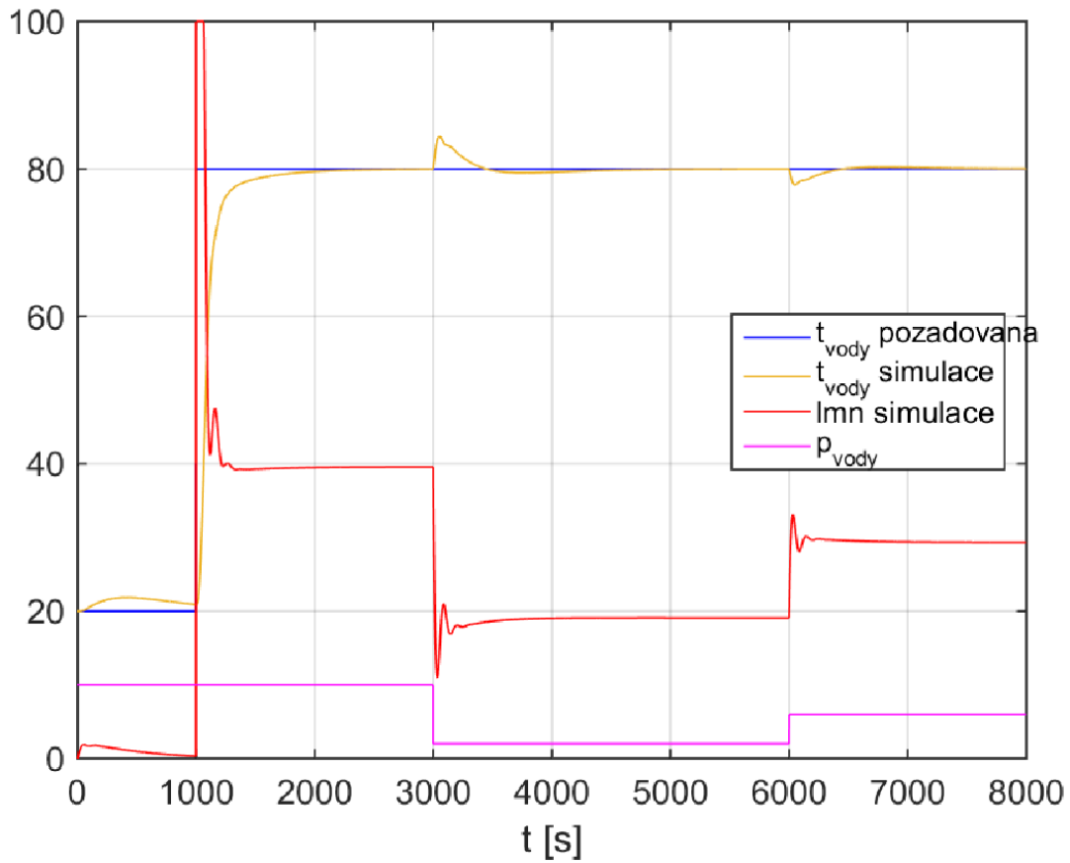
Z grafu na Obr. 4.19 je patrné, že se křivky shodují, tudíž je přenos aproximován správně a rovnice (4.5) skutečně představuje dopřednou složku.



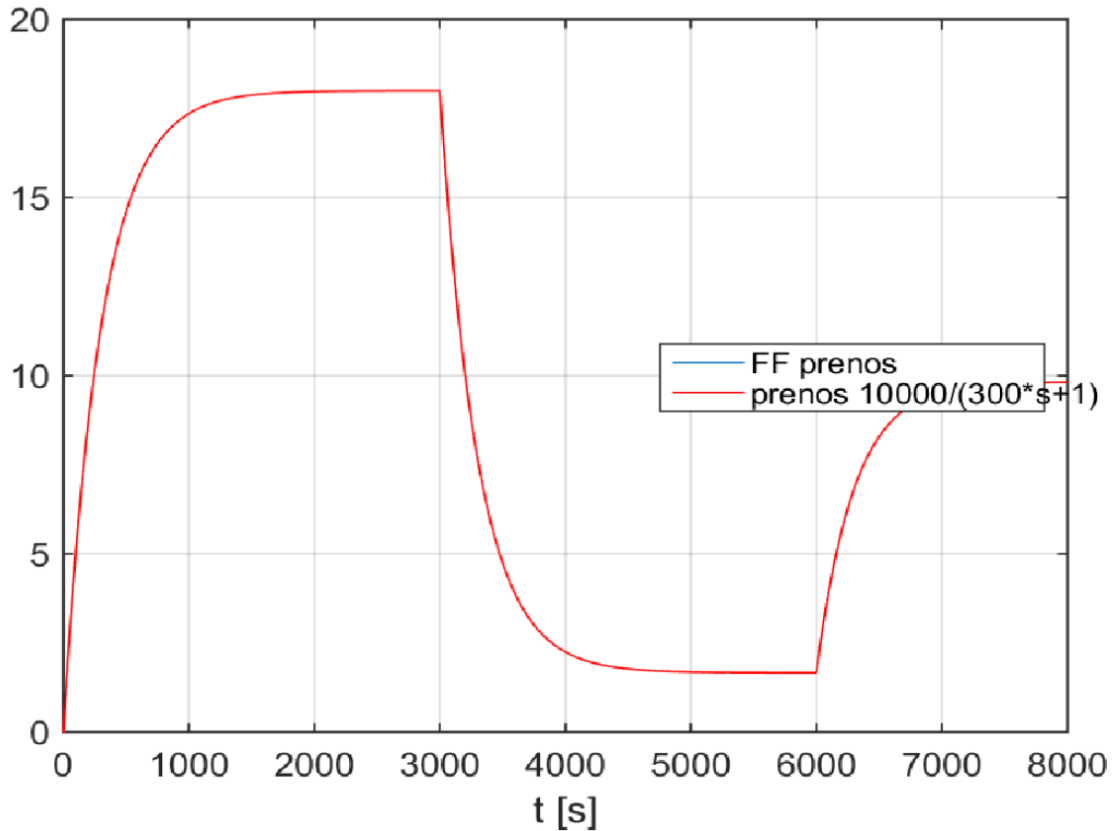
Obr. 4.17 Přechodová charakteristika celého systému bez dopředné složky

Rovnici (4.5) nyní upravíme a dle Laplaceova slovníku [9] převedeme na tento tvar skutečné funkce. Složitý vztah, který vedl na řešení diferenciální rovnice čtvrtého řádu, jsme tedy poměrně jednoduchou úpravou převedli na tuto exponenciální funkci:

$$\frac{10\,000}{300s + 1} = \frac{100}{3 \cdot (s + \frac{1}{300})} = \frac{\frac{100}{3}}{(s + \frac{1}{300})} \rightarrow f(x) = 33,33 \cdot e^{-\frac{1}{300}x} \quad (4.6)$$

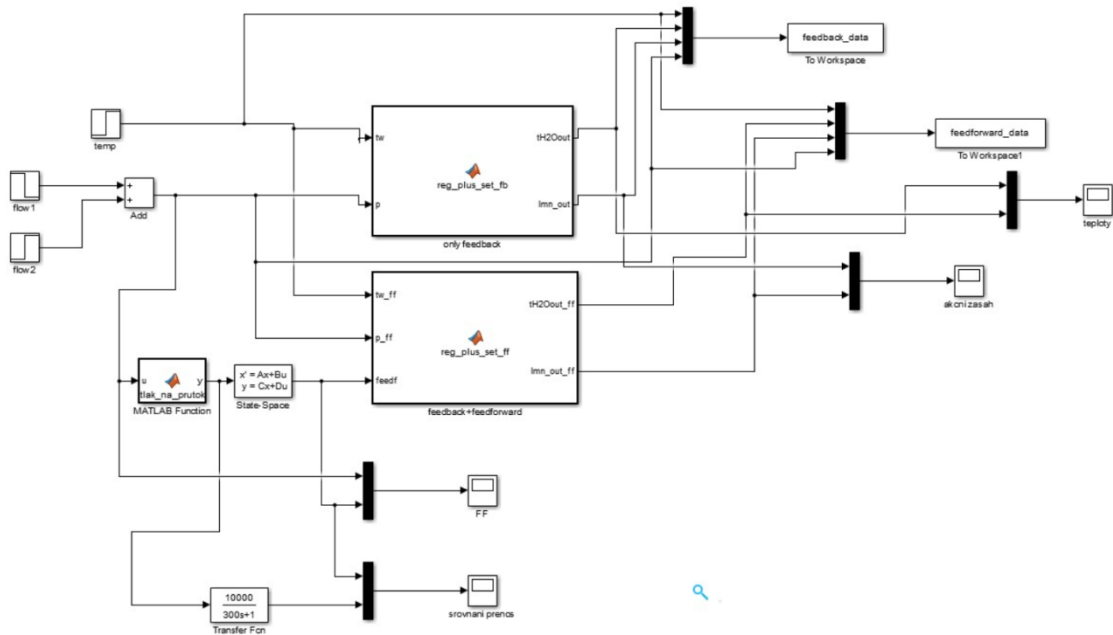


Obr. 4.18 Přechodová charakteristika celého systému s dopřednou složkou



Obr. 4.19 Porovnání přenosů – dopředná složka a aproximace

Na základě získaných hodnot pro omezení integrační složky anti-windup metodou a určení přenosu pro dopřednou složku implementujeme výsledky simulací do řídicího systému Siemens. Pro správnou funkci je však třeba s ohledem na možnosti a omezení prostředí, obzvláště funkčního bloku FB 58 výsledky této kapitoly upravit. Tato problematika je popsána v následující kapitole. Na závěr schéma aproximace dopředné složky v Simulinku pro ověření správnosti vztahu (4.5) na Obr. 4.20 a opět část skriptu z Matlabu Obr. 4.21.



Obr. 4.20 Blokové schéma v Simulinku – porovnání obou přenosů

```
%q_p=[0,0.3,1,2,3,4,5,6,7,10,20,35;0,0.02,0.03,0.04,0.05,0.055,0.06,0.067,0.08,0.09,0.12,0.16];% [bar],[lt/min] závislost prutoku na tlaku
q_p=[0,2,10;0,0.01,0.108];% [bar],[lt/min] závislost prutoku na tlaku
q_p(2,:)=q_p(2,:)/60; % [bar,kg/s]
q=interp1(q_p(1,:),q_p(2,:),p); %prtok z tabulky
ch20=4180; %[J/kg/K] merna tepelna kapacita vody
pNspiraly=2000; %jmenovity vykon spiraly
th20in=20; %teplota vstupni vody
alfa=340/60; %[W/K] salani nadoby do okolí (z namerenych prubehu s regulatorem v ustalenem stavu)

tokoli=20;

pom=find(lmnMereni);
pom=pom(1);
twMereni=lmnMereni; %pozadovana teplota
twMereni(pom:end)=80;

%pocatecni podminky
x2=0;
x3=x2;
pSpiraly=x3;
th20=20;
lmnI=0;%37 protoze byla vypnuta spirala ale w=80, naintegrovano
ef=0;

for it=1:ikonec
t=it*dt;

% if p==10 && t>350 th20in=8; end %snaha o hrb na krivce chladnuti, dotekla studena?
% if p==2 && t>400 th20in=8; end %snaha o hrb na krivce chladnuti, dotekla studena?

tw=interp1(tMereni,twMereni,t);

lmn=PID_reg(dt,tw,th20,kr,Tr,Td,0,1,1);

x1=pNspiraly*lmn/100;

dpSpiraly=1/tau*(x3-pSpiraly);
dx3=1/(tau/1)*(x2-x3);
dx2=1/(tau/1)*(x1-x2);
dth20=1/Cnadoba*(pSpiraly-q*ch20*(th20-th20in)-alfa*(th20-tokoli));

x2=x2+dx2*dt;
x3=x3+dx3*dt;
pSpiraly=pSpiraly+dpSpiraly*dt;
th20=th20+dth20*dt;

out(it,:)=t,lmn,pSpiraly/100,lmn,th20;
end
```

Obr. 4.21 Ukázka skriptu – metoda feed-forward

5 Možnost ověření získaných parametrů regulátoru v reálné soustavě

5.1 Omezení integrační složky

Z hlediska nastavení parametrů pro funkční blok FB 58 není možné přímo omezit výstup integrační složky LMN_I. V řídicím systému je tedy třeba sledovat, kdy bude výstup z regulátoru saturovat a výstupní hodnotu LMN_I odečíst.

Mimo regulátor poté provedeme úpravu, kdy porovnáme aktuální hodnotu LMN_I s odečtenou hodnotou a v případě, že se rovnají, či je první jmenovaná vyšší, aktivujeme parametr INT_HPOS, což je zastavení běhu integrační složky v pozitivním směru.

Tím dosáhneme efektu zastavení integrace a hodnotu tím udržujeme na saturačním limitu výstupu regulátoru. Ohled samozřejmě bereme i na skutečnost, zda má výstup z regulátoru stejné znaménko, jako regulační odchylka. Pokud tomu tak není, integrační složku neomezujeme. Po změně podmínek následně dojde k deaktivaci této funkce a omezení vypínáme.

Pro přepis do řídicího systému Siemens provedeme následující úpravy:

- 1) Porovnáme výstupní hodnotu LMN_I s hodnotou, která byla zjištěna ze simulace.
- 2) Vynásobíme mezi sebou výstup z regulátoru LMN a aktuální regulační odchylku.
- 3) Pokud bude splněna podmínka 1) a výsledek podmínky 2) bude kladný, parametr INT_HPOS aktivujeme. V opačném případě bude omezení deaktivováno.

5.2 Parametr pro feed-forward

Funkční blok FB 58 pracuje s potlačením poruch na vstupu do soustavy. Parametr DISV však lze nastavit pouze jako konstantu. Funkce dopředné složky z předchozí kapitoly vychází dle rovnice (4.6) jako exponenciální. Protože dle tabulky Obr. 2.1 se průtoky mění lineárně v závislosti na změně tlaku, provedeme druhý způsob identifikace parametru na základě lineární funkce a aktuální změny tlaku. Pro oba mezní tlaky máme simulacemi odvozené průtoky. U druhé metody aplikujeme pro náš případ lineární polarizaci obou mezních hodnot za předpokladu, že tlak lze měnit v rozmezí 0,1 až 10,0 barů.

Skutečná teplota musí být v pásmu požadované teploty se spodní a horní hranicí ± 5 °C. V potaz bereme i skutečnost, zda tlak snižujeme, či zvyšujeme a dle toho bude hodnota parametru kladná, nebo záporná. Tlak se mění skokově, jak je vidět na grafu přechodové

charakteristiky Obr. 4.18. Parametr tedy vytvoříme za těchto podmínek v hlavním cyklu dle následujících postupů. První vychází jako funkce, kterou jsme odvodili ze simulací a u druhého provedeme lineární závislost. Nejprve popíšeme první metodu:

- 1) Jako první provedeme přepočítání tlaku na průtok.
- 2) Před uvedením do provozu dochází k prvnímu natopení spirály. Teplota je regulována s největší regulační odchylkou. Tlak je nastaven na konstantní hodnotu. V této fázi parametr DISV neaktivujeme.
- 3) Aktuální hodnotu přepočteného průtoku ukládáme do pomocné proměnné. V tuto chvíli se požadovaná a skutečná sobě rovnají a DISV aktivujeme.
- 4) Při změně rychlosti je nastaven nový, požadovaný tlak (průtok), který odečteme od pomocné proměnné.
- 5) Rozdíl z bodu 4) je proměnná pro exponenciální funkci.
- 6) Výstup funkce z bodu 5) je parametr pro DISV – změna, která upravuje výstup z regulátoru.
- 7) Pokud bude hodnota z funkce kladná, k výstupu z regulátoru parametr DISV přičítáme a naopak.

Druhý způsob je jednodušší, protože vychází z lineární závislosti. Zde je postup:

- 1) Stejně jako v předchozím případě při prvním natopení spirály parametr DISV neaktivujeme.
- 2) Na základě znalostí u dvou mezních tlaků, jsme ze simulace zjistili konstanty o hodnotě 40% z výstupu LMN, při rozdílu tlaků 8 barů. Uvažujeme nulovou hodnotu konstanty při tlaku 10 barů.
- 3) Dle následujících vzorců odvodíme rovnici přímky jednoduchou úpravou.

Vycházíme z těchto předpokladů:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y}{\Delta x} &= \frac{40 - 0}{10 - 2} \rightarrow y = -5x + c \rightarrow 40 = -10 + c \rightarrow y = \\ &= -5x + 50 \end{aligned} \quad (5.1)$$

což je lineární rovnice, pro výpočet parametru DISV.

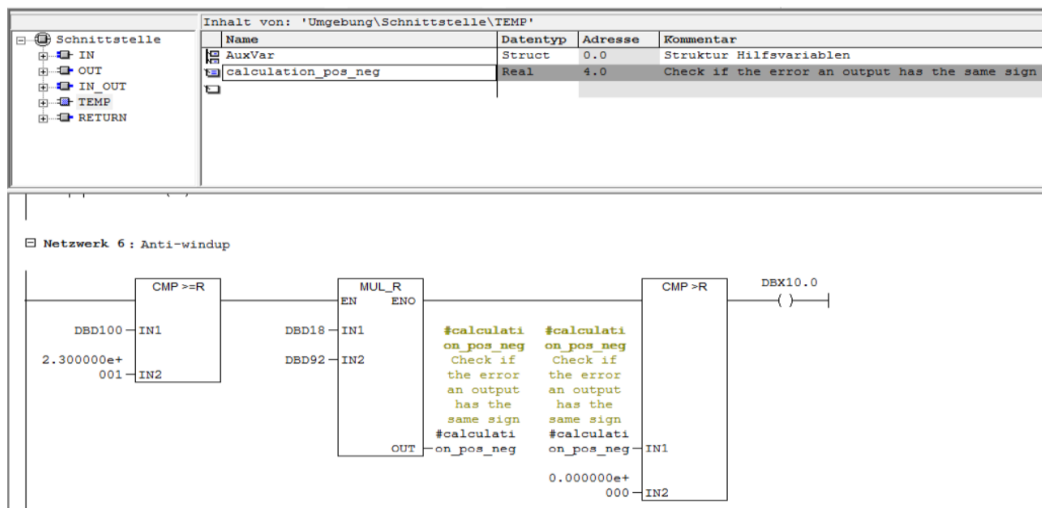
- 4) Při prvním cyklu programu uložíme skutečnou hodnotu tlaku do pomocné proměnné. Pokud se v každém následujícím cyklu tyto dvě proměnné sobě rovnají, parametr je neaktivní.
- 5) Při změně rychlosti stroje, dojde automaticky ke snížení tlaku. Odečteme novou

hodnotu od pomocné proměnné a dosadíme ji do funkce z bodu 3).

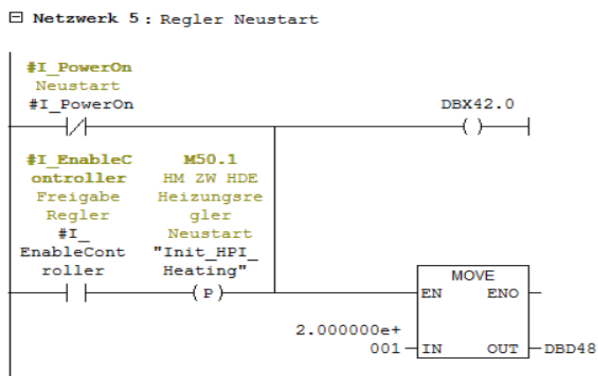
- 6) Pokud bude hodnota z podmínky 3) kladná, k výstupu z regulátoru parametr DISV přičítáme a naopak.

5.3 Implementace do prostředí Siemens a ověření parametrů v praxi

Při každém restartu řídicího systému a restartu regulátoru nejprve provedeme inicializaci všech hodnot – přiřazujeme počáteční či nulovou hodnotu. Omezení integrační složky využijeme pouze při prvním natopení spirály, taktéž vypínáme parametr pro dopřednou složku. Probíhá ohřev z teploty okolí na požadovanou hodnotu. Využijeme buď omezení integrační složky v pozitivním směru bez nutnosti restartu jednotlivých LMN složek, což je verze před výsledky bakalářské práce, nebo restart provedeme za předpokladu, že výstupní složce integračního členu LMN_I přiřadíme počáteční hodnotu. Na přiložených obrázcích jsou ukázky realizace obou případů v prostředí Siemens. Metoda omezení *Obr. 5.1* a přiřazení hodnoty integrační složce *Obr. 5.2*.



Obr. 5.1 Doplnění funkce regulátoru o omezení funkce integrační složky – Siemens



Obr. 5.2 Doplnění funkce regulátoru o restart a přiřazení počáteční hodnoty integrátoru – Siemens

Pro ověření správně nastavené dopředné složky, vycházím z tohoto vzorce:

$$LMN = LMN_p + LMN_I + LMN_D + DISV \quad (5.2)$$

Výstup z regulátoru ovlivňujeme třemi složkami výstupu PID a dopřednou složkou, která nabývá kladných i záporných hodnot. Parametr DISV je pro obě metody přepočítán na procenta. Vycházíme ze základního nastavení výstupu regulátoru, kde je hodnota normována parametry LMN_HLM, což je maximální hodnota, kterou nastavíme na 100 a parametr LMN_LLM je potom minimem se spodním omezením 0.

Provedeme změny tlaku v jednotlivých časových intervalech s dostatečnou délkou a sledujeme vývoj teploty. V reálných podmínkách též neprobíhá modifikace tlaku v rádech sekund, nýbrž minut. Přepis do řídicího systému však bude složitější. Musíme zasahovat do více funkcí a upravovat jejich algoritmus, proto ho zde nepředkládám. Výsledkem by při změně tlaku (průtoku) měl být průběh skutečné teploty bez překmitu. Nesmí docházet k jejímu velkému poklesu ani nárůstu a odchylka od požadované musí být minimální. Tím ověříme správnost nastavení. Takto bych postupoval v reálných podmínkách a v samotném systému navíc doporučil tyto změny:

- 1) Úpravu parametrů PID – regulace může být nyní „rychlejší“
- 2) Zrušení offsetu a postupného snižování tlaku (průtoku) – díky dopředné složce (feed-forward) není potřebné
- 3) Pokusit se naměřit reálné průtoky vhodným měřicím přístrojem, který umožňuje identifikovat malé změny průtoku, řádově desetiny ml/min.
- 4) Přesun čidla pro měření tlaku blíže do oblasti trysky, čímž dosáhneme větší efektivity při zásahu dopředné složky.

Závěr

Tato práce navazovala na vlastní bakalářský projekt z roku 2017. S ohledem na ověření upravených parametrů u zákazníka bylo cílem tohoto projektu optimalizovat stávající regulační algoritmy a využít na základě měření dalších veličin metodu predikce regulátoru (feed-forward).

Nejprve byla provedena analýza bloku FB 58, možnosti parametrů a současný regulační zásah v řídicím systému firmy Siemens. Na základě literatury byl sestaven simulační model a blokové schéma celé funkce. Pro praktické účely jsem sestavil skript v Matlabu, který funguje na podobném principu jako výše popsán blok.

Z hlediska omezení integrační složky je popsán případ, kdy se omezuje výkon regulátoru přítomností nelineárních efektů, protože všechny fyzické systémy podléhají saturaci akčního členu. Metodou anti-windup byla zjištěna limitní hodnota výstupní integrační složky LMN_I a uvedeny dva způsoby využití v prostředí Siemens. Jeden využívá resetování regulátoru a druhým přiřazujeme složce její počáteční hodnotu.

Posledním úkolem bylo zavést do regulátoru dopřednou vazbu pro účely predikce tzv. feedforward. Metodika se opírala o měření průtoků v reálných podmínkách za předpokladu změny tlaku vody v systému. Na základě velkého rozdílu, kdy naměřené hodnoty nekorespondovaly s těmi, které jsou uvedené v tabulce od výrobce nelze považovat měření za směrodatné. Byla tedy provedena simulace se znalostí přenosu regulační soustavy z bakalářské práce a na jejím základě byl odladěn přenos poruchové smyčky a dopředné složky. V přechodových charakteristikách jsem poté porovnal aktuální vývoj teploty v závislosti na změně tlaku. Analýza byla provedena s feed-forwardem i bez něj. U grafů, kde je použit tento parametr zaznamenáváme výrazně rychlejší regulační zásah a kratší dobu, kdy se vyvolanou poruchou teplota opět ustálí. Přenos ovšem vychází s mocninou čtvrtého řádu a pro tyto účely byl aproximován na exponenciální funkci (4.6), což je první metoda. Druhý způsob se opírá o skutečnost, že dle tabulky na Obr. 2.1 je nárůst teploty od 0 do 10 barů lineární. Byla tedy na základě znalosti průtoků při obou mezních hodnotách tlaku, nárůstu teploty v čase provedena lineární aproximace a odvozena rovnice přímky. Opírám se o fakt, že derivace průtoku za čas je lineární. Vytvořil jsem tedy lineární rovnici (5.1), do které dosadím rozdíl mezi původní a novou hodnotou tlaku s ohledem na skutečnost, zda parametr k původnímu výstupu z regulátoru přičítáme, nebo odečítáme. Jednoduchým výpočtem zjistíme funkční hodnotu, což je parametr dopředné složky již

přepočtený na procenta, a poté ladíme vstup DISV v rovnici (5.2) na bloku FB 58.

Na závěr byla ještě naplánována návštěva u zákazníka v pivovaru Krombach Ko&KG, kde se mělo ověřit nastavení a optimalizace nových, regulačních algoritmů v reálné soustavě.

Důvodem byla snaha, abychom vycházeli z naprosto stejného systému, jako v bakalářské práci. Tato poslední část se bohužel nepodařila z důvodu omezení, která měla za následek karanténní opatření s nemožností vycestovat do zahraničí a co nejvíce omezit kontakt s lidmi, díky nepříznivému vývoji koronaviru, jenž se od poloviny března 2020 stal hrozbou pro nás všechny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Obrazovky operačního panelu plnicího stroje – vytvořeno vývojovým střediskem firmy Krones.
- [2] Manuál k funkčnímu bloku FB 58 – vytvořeno společností Siemens. Dostupné na přiloženém médiu ve formátu pdf.
- [3] Konstrukční nákresy a soupis materiálu pro výrobní proces – strojní konstrukce firmy Krones.
- [4] BP Michal Kozubík: *Metody anti-windup při řízení lineárních dynamických systémů*, kapitola 2.2.1 a 2.2.2, VUT Brno 2017 – str. 16-18.
<https://www.vutbr.cz>
- [5] Odborný článek technické univerzity Istanbul H.Markaroglu, M.Guzelkaya, I.Eksin, E.Yesil: *Tracking time adjustment in back calculation anti-windup scheme*, May 2014 – str. 3-4.
<https://www.academia.edu>
- [6] Internetové stránky řídicích systémů Česko, autor článku: Peter Nachtwey, Delta computer systems: *Doplnění regulace PID o dopředné složky*, červenec 2015.
<http://www.controlengcesko.com>
- [7] Vlastní bakalářská práce – uloženo na stránkách ZČU Plzeň, 2017
<https://otik.zcu.cz>
- [8] Řešené ukázky případů regulace a návody pro vytvoření skriptu u teplotních regulátorů pro prostředí Matlab
<https://de.mathworks.com>
- [9] Laplaceův slovník – str. 2, 1. sloupec, 7. Řádek
Internetové stránky TU Liberec, <http://kap.fp.tul.cz>
- [10]
Řešené ukázky případů aproximace diferenciální rovnice vyšších řádů
<https://de.mathworks.com/simulink>