

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Praha 2008

Vladimír DVOŘÁK

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



Studijní program: BN1 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R029 – Kybernetika a měření (bakalářský)

**Návrh řízení teploty v sušičce
potravinářského škrobu**

Starch dryer temperature control design

Bakalářská práce

Autor: Vladimír Dvořák
Vedoucí BP práce: Doc. Ing. Petr Horáček, CSc.
Oponent BP práce: Ing. Jan Kolínský

V Praze 25. 2. 2008

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Vladimír Dvořák**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Návrh řízení teploty v sušičce potravinářského škrobu**

Pokyny pro vypracování:

Řízení teploty v potravinářském průmyslu je úloha klasicky řešená použitím PID regulátorů v kaskádním zapojení. V případě, že je řízený proces nelineární a odezva regulované veličiny na změnu akčního signálu má velké dopravní zpoždění, nesplňuje zpravidla toto standardní řešení požadavky na kvalitu regulace.

1. Seznamte se s koncepcí standardního algoritmu řízení teploty v sušičce
2. Sestavte jednoduchý simulační model řídicího systému
3. Analyzujte vlastnosti standardní architektury
4. Navrhněte alternativní algoritmus řízení
5. Nově navržený algoritmus nasimulujte, ověřte činnost řídicího systému a uveďte jeho výhody a nevýhody

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: doc. Ing. Petr Horáček, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009



prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry




doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce. Veškeré podklady (literární prameny, internetové stránky a software), které jsem v práci využil, jsou uvedené v přiloženém seznamu.

Souhlasím s použitím této práce jako školního díla ve smyslu § 60 zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 27.5.2008



podpis autora

Poděkování

Děkuji především panu Doc. Ing. Petru Horáčkovi, CSc., vedoucímu práce, za všestrannou pomoc a odborné vedení, které mi poskytoval během četných konzultací. Můj vděk patří i mé rodině, mé přítelkyni a mým kamarádům za podporou a inspiraci nejen během vzniku této práce ale i během celého dosavadního studia.

Název

Návrh řízení teploty v sušičce potravinářského škrobu

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou modelování a řízení teploty v potravinářském průmyslu s zaměřením na sušení škrobu. Je zde analyzována konvekční sušička s pneumatickým transportem materiálu. Zvláštní vlastností procesu je dopravní zpoždění, které souvisí přenosem materiálu skrze sušičku. Sušička potravinářského škrobu je složité zařízení, proto hlavní částí této práce je analýza systému a implementace modelu v Simulinku. Získaný model je pak řízen klasickým způsobem regulace. Nedostatky použitého řešení motivují návrh alternativního řídicího systému.

Klíčová slova: regulace teploty, simulace, dopravní zpoždění

Title

Starch dryer temperature control design

Abstract

This bachelor thesis describes temperature modeling and control in food industry and starch drying process in particular. Industrial convective pneumatic dryer was the process in question. The unique feature of the process is the transportation delay which is associated with transport of material through the dryer. Food starch dryer is a complicated device; thus the main focus is on the system analysis, modeling and simulation model implementation in Simulink. Standard control scheme of the starch dryer was simulated and analyzed. Reported drawbacks of the solution, currently used in practice, show needs for improvement. Thus an alternative control system is designed.

Key words: temperature control, simulation, transportation delay

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1.1: STRUKTURA ŠKROBOVÉHO ZRNA	4
OBRÁZEK 2.1: SCHÉMA SUŠÍČÍHO ZAŘÍZENÍ.....	6
OBRÁZEK 3.1: SEKCE SUŠÍČKY	8
OBRÁZEK 3.2: VÝKONOVÝ GRAF SEKCE 1	10
OBRÁZEK 3.3: VÝKONOVÝ GRAF SEKCE 2	11
OBRÁZEK 3.4: VÝKONOVÝ GRAF SEKCE 3	12
OBRÁZEK 4.1: FUNKCE VÝPOČTU HODNOTY SF_{ST} – BLOK SF_{STARCH}	13
OBRÁZEK 4.2: STRUKTURA BLOKU SF_{ST}	14
OBRÁZEK 5.1: PŘEDSIMULACE – (A) TEPLoty, (B) TEPELNÉ TOKY	16
OBRÁZEK 5.2: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK TEPLoty T_z – (A) TEPLoty, (B) TEPELNÉ TOKY	17
OBRÁZEK 5.3: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK RYCHLOSTI OTÁČENÍ V_{OT} – (A) TEPLoty,	18
OBRÁZEK 5.4: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK TEPLoty ŠKROBOVÉ KAŠE T_{ST} – (A) TEPLoty, (B) TEPELNÉ TOKY	19
OBRÁZEK 5.5: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK VLHKOSTI ŠKROBOVÉ KAŠE HUM_{ST} – (A) TEPLoty,.....	20
OBRÁZEK 5.6: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK TEPLoty OKOLÍ T_o – (A) TEPLoty, (B) TEPELNÉ TOKY	21
OBRÁZEK 6.1: TRANSFORMACE TEPLoty T_z	24
OBRÁZEK 6.2: SIMULAČNÍ SCHÉMA PID REGULÁTORU TEPLoty TI	27
OBRÁZEK 6.3: REGULOVANÝ PROCES VHODNÝ PRO KASKÁDNÍ REGULACI	28
OBRÁZEK 6.4: USPOŘÁDÁNÍ SMYČEK PRO KASKÁDNÍ REGULACI	29
OBRÁZEK 6.5: SCHÉMA ZAPOJENÍ FF SMYČKY	31
OBRÁZEK 6.6: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK HUM_{ST} – (A) TEPLoty, (B) REGULÁČNÍ ZÁSAHY	33
OBRÁZEK 6.7: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK T_{ST} – (A) TEPLoty, (B) REGULÁČNÍ ZÁSAHY	34
OBRÁZEK 6.8: ODEZVA SYSTÉMU NA SKOK T_o – (A) TEPLoty, (B) REGULÁČNÍ ZÁSAHY	35
OBRÁZEK 6.9: VLIV RŮZNÝCH NASTAVENÍ PARAMETRŮ FF NA TVAR ODEZVY SYSTÉMU	36
OBRÁZEK A.1: SIMULAČNÍ SCHÉMA SOUSTAVY.....	I
OBRÁZEK D.1: SCHÉMA KLASICKÉ KONCEPCE ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÉ SUŠÍČKY ŠKROBU	V
OBRÁZEK D.2: SCHÉMA NAVRHOVANÉ KONCEPCE ŘÍZENÍ PRŮMYSLOVÉ SUŠÍČKY ŠKROBU	VI

Seznam tabulek

TABULKA 6.1: PARAMETRY REGULÁTORŮ – KLASICKÁ KONCEPCE ŘÍZENÍ.....	27
TABULKA 6.2: PARAMETRY REGULÁTORŮ – NAVRHOVANÁ KONCEPCE ŘÍZENÍ.....	31
TABULKA C.1: PARAMETRY SYSTÉMU	IV

Seznam zkratek

ZKRATKA	VYSVĚTLIVKA
anti-windup	funkce omezení integrace
CV	control variable – řídicí veličina
DV	disturbance variable – poruchová veličina
FF, feed forward	dopředná regulační smyčka
From	typ tagu
fuzzy	“neostrý”
Goto	typ tagu
PI	typ spojitého regulátoru
PID	typ spojitého regulátoru
PSD	typ diskrétního regulátoru
Root-locus	geometrické místo kořenů, metoda návrhu regulátorů v komplexní rovině nul a pólů přenosové funkce
SP	set point – žádaná hodnota
tag	štítek, cedulka
windup	jev nastávající v regulátoru s I složkou při dosažení saturace akčního členu

Seznam symbolů

ZNAČKA	VYSVĚTLIVKA	JEDNOTKA
0	uzel typu nula	
1	uzel typu jedna	
C	tepelný kapacitor	
$C_1, C1$	tepelný kapacitor sekce 1	
$C_2, C2$	tepelný kapacitor sekce 2	
$C_3, C3$	tepelný kapacitor sekce 3	
C_{p1}, Cp_1	tepelná kapacita sekce 1	$Jkg^{-1}K^{-1}$
C_{p2}, Cp_2	tepelná kapacita sekce 2	$Jkg^{-1}K^{-1}$
C_{p3}, Cp_3	tepelná kapacita sekce 3	$Jkg^{-1}K^{-1}$
$D_c(s)$	přenos regulátoru	
ΔT_z	změna teploty páry T_z ve výměníku	$^{\circ}C$
Δv_{ot}	změna rychlosti otáčení	ot/min
e	regulační odchylka	viz Pozn. 2
$E(s)$	laplaceův obraz regulační odchylky	
FFg	feed forward gain – zesílení dopředné regulační smyčky	
Fan_{TD}	dopravní zpoždění – ventilátor	s

Φ_2, Phi_2	tepelný tok proudící do sekce 2	kW
Φ_3, Phi_3	tepelný tok proudící do sekce 3	kW
Φ_{in}, Phi_in	tepelný tok vstupujícího vzduchu	kW
Φ_{L1}, Phi_L1	tepelný tok ztrát sekce 1	kW
Φ_{L2}, Phi_L2	tepelný tok ztrát sekce 2	kW
Φ_{oa}, Phi_oa	zdroj tepelného toku odpadního vzduchu	kW
Φ_{os}, Phi_os	zdroj tepelného toku jímaného škrobu	kW
Φ_{sb}, Phi_st	tepelný tok vstupujícího škrobu	kW
Φ_z, Phi_z	tepelný tok výměníku	kW
g	zesílení	
Hum_{sb}, Hum_st	vlhkost škrobové kaše	%
k_D, kd	zesílení derivační části regulátoru	°Cs
k_i, ki	zesílení integrační části regulátoru	°Cs ⁻¹
k_p, kp	zesílení proporciální části regulátoru	
p_{lim}	procesní omezení	viz Pozn. 2
N	vzdálenost filtračního pólu	
$nominal$	nominální hodnota pro feed forward smyčku	%
R	tepelný rezistor	Wm ⁻¹ K ⁻¹
$R_1, R_2, R_{prim}, R_{sec}, R_{aux}$		
R_1, R_2, R_prim	regulátory	
R_sec, R_aux		
R_{L1}, R_L1	tepelný rezistor, model stěny sekce 1	Wm ⁻¹ K ⁻¹
R_{L2}, R_L2	tepelný rezistor, model stěny sekce 2	Wm ⁻¹ K ⁻¹
R_{L3}, R_L3	tepelný rezistor, model stěny sekce 3	Wm ⁻¹ K ⁻¹
R_z, R_z	tepelný rezistor – model stěny výměníku	Wm ⁻¹ K ⁻¹
s	funkční proměnná v laplaceově transformaci	
Se	zdroj úsilí (zdroj konstantní teploty)	
Se_o, Se_o	zdroj úsilí – teploty okolního prostředí	°C
Se_z, Se_z	zdroj úsilí – teploty páry ve výměníku	°C
Sf	zdroj tepelného toku	
Sf_2, Sf_2	zdroj tepelného toku proudícího do sekce 2	
Sf_3, Sf_3	zdroj tepelného toku proudícího do sekce 3	
Sf_{in}, Sf_in	tepelný tok vstupujícího vzduchu	
Sf_{oa}, Sf_oa	zdroj tepelného toku odpadního vzduchu	
Sf_{os}, Sf_os	zdroj tepelného toku jímaného škrobu	
Sf_{sb}, Sf_st	zdroj tepelného toku vstupujícího škrobu	
τ_d, t_d	filtrační konstanta	s
$T0$	teplota na vnějším povrchu výměníku, výstupní teplota výměníku	°C
$T1$	teplota v sekci 1	°C

T_2	teplota v sekci 2	°C
T_3	teplota v sekci 3	°C
T_D	derivační časová konstanta	s
T_I	integrační časová konstanta	s ⁻¹
T_o, T_o	teplota okolí	°C
T_s	vzorkovací perioda	s
T_{st}, T_{st}	teplota škrobové kaše	°C
t_{step}, t_{step}	čas přivození skokové změny	s
T_z, T_z	teplota páry ve výměníku, vstupní teplota výměníku	°C
u	akční zásah	%
$U(s)$	laplaceův obraz akčního zásahu	
u_{max}	saturace akčního členu	viz Pozn. 2
v_{ob}, v_{ot}	rychlost otáčení šnekového dopravníku	ot/min
w	žádaná hodnota	viz Pozn. 2
w_1	počáteční vlhkost materiálu	%
w_2	koncová vlhkost materiálu	%
y	výstup primárního procesu	
y_s	výstup sekundárního procesu	

Pozn. 1: U některých symbolů je použito dvojího značení. Jeden typ značení se vyskytuje ve zprávě a druhé v simulačních schématech

Pozn. 2: Fyzikální rozměr přebírá od veličiny, na kterou se vztahuje

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	VII
SEZNAM TABULEK	VII
SEZNAM ZKRATEK	VIII
SEZNAM SYMBOLŮ	VIII
OBSAH	XI
1 ÚVOD	1
1.1 KONCEPCE ŘEŠENÍ	2
1.2 ŠKROB	3
2 POPIS SOUSTAVY	6
3 ANALÝZA SOUSTAVY	8
3.1 SEKCE 1	9
3.2 SEKCE 2	10
3.3 SEKCE 3	11
4 NÁVRH SIMULAČNÍHO SCHÉMATU SOUSTAVY	13
5 OVĚŘENÍ DYNAMIKY SOUSTAVY	16
5.1 SKOK TEPLoty PÁRY T_z VE VÝMĚNÍKU	17
5.2 SKOK RYCHLOSTI OTÁČENÍ V_{OT} ŠNEKOVÉHO DOPRAVNÍKU	18
5.3 SKOK TEPLoty ŠKROBOVÉ KAŠE T_{ST}	19
5.4 SKOK VLHKOSTI ŠKROBOVÉ KAŠE HUM_{ST}	20
5.5 SKOK TEPLoty OKOLÍ T_o	21
5.6 SHRNU TÍ TESTŮ	22
6 ŘÍDICÍ SYSTÉM	23
6.1 PID REGULÁTORY	24
6.2 KLASICKÁ KONCEPCE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU	26
6.2.1 Sestavení řídicího systému	26
6.3 NAVRHOVANÁ KONCEPCE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU	28
6.3.1 Sestavení řídicího systému	30
6.4 TESTOVÁNÍ ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ	32
6.4.1 Skok vlhkosti škrobové kaše Hum_{st}	32
6.4.2 Skok teploty škrobové kaše T_{st}	33
6.4.3 Skok teploty okolí T_o	34
6.4.4 Ověření vlivu FF na tvar odezvy	35

7	POROVNÁNÍ ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ	37
8	ZÁVĚR.....	38
	LITERATURA	39
	A KNIŽNÍ PUBLIKACE A ELEKTRONICKÉ MATERIÁLY	39
	B INTERNETOVÉ STRÁNKY	39
	C SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE	40
	PŘÍLOHA A – SIMULAČNÍ SCHÉMA SOUSTAVY	I
	PŘÍLOHA B – SKRIPTY PRO MATLAB.....	II
	PŘÍLOHA C – PARAMETRY SYSTÉMU	IV
	PŘÍLOHA D – SCHÉMATA ŘÍDICÍCH SYSTÉMŮ.....	V
	1 EXISTUJÍCÍ KONCEPCE ŘÍZENÍ.....	V
	2 NAVRHOVANÁ KONCEPCE ŘÍZENÍ.....	VI
	PŘÍLOHA E – OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	VII
	1 SEZNAM ADRESÁŘŮ	VII
	2 OBSAH ADRESÁŘŮ	VII

1 Úvod

Příklady použití konvekčních pneumatických sušiček je možné nejčastěji nalézt především v potravinářském a papírenském průmyslu jako součásti větších technologických celků pro zpracovávání zrnin¹, brambor, potravinářského škrobu atd. Obecně lze tyto sušičky využít k sušení materiálů práškové konzistence a celistvých zrn. Jednoduchá konstrukce a relativně nízká spotřeba energie výrazným způsobem ovlivnily úspěšné použití sušiček tohoto typu ve výše uvedených průmyslových odvětvích. Konstrukce konvekční sušičky dovoluje simultánní přenos vlhkého materiálu a jeho sušení. Proces přenosu tepla v tomto zařízení je založen na principu přímého kontaktu sušeného materiálu a ohřátého vzduchu.

Základní obecná data, vztahující se ke konvekčním pneumatickým sušičkám dle [5], jsou uvedena dále. V těchto sušičkách dochází k průběžnému sušení sypkých materiálů, koncentrace spadá do rozsahu (0,05 – 2,00) kg materiálu na 1 kg vzduchu. Průměrná velikost částic sušeného materiálu bývá (0,05 – 2,00) mm. Objemový průtok ohřátého média (vzduchu nebo obecně plynu) sušičkou je (10 – 30) ms⁻¹. Počáteční vlhkost sušeného materiálu může být $w_1 = (35 - 40) \%$, a zbytková vlhkost po proběhnutí procesu sušení je obvykle $w_2 = (10 - 15) \%$. Specifická spotřeba energie bývá (3900 – 5040) kJ kg⁻¹ odpařené vody. Efektivita takovýchto sušiček je vyčíslena podle stupně tepelného využití a dosahuje (66 – 75) %, v závislosti na použitém systému sušení (přímé nebo nepřímé). Množství vypařené vody na metr krychlový objemu v sušicím vzduchovém potrubí za jednotku času je přibližně (300 – 350) kg m⁻³ h⁻¹. Doba sušení v těchto sušičkách je velmi krátká, pouze několik sekund, tudíž mohou být zmíněné sušičky použity pro sušení materiálů citlivých na působení vysokých teplot.

Způsobů, jak řídit technologické zařízení pro sušení potravinářského škrobu, je mnoho. Například klasický přístup řízení prostřednictvím použití PID regulátorů, kaskádní zapojení PID regulátorů, nebo různé typy prediktivního řízení či aplikace fuzzy řízení. Otázkou je kvalita a přesnost těchto řešení, která v praxi velkou měrou závisí na použité technologii. Většina z uvedených řešení se skutečně používá, přesto však existuje prostor ke zlepšování.

¹ Proces vlhkého mletí pšenice nebo kukuřice

Jedním z problémů řízení sušiček škrobu je jednak zjištění přesných vstupních veličin (především vlhkosti škrobu) a také omezení nezanedbatelného vlivu dopravního zpoždění na kvalitu řízení.

Prvním problémem je uspokojivě řešen prostřednictvím speciálně designovaných senzorů kontinuálního měření vlhkosti škrobu, jak je zmíněno v [6]. Tyto senzory pracují na principu měření vodivosti škrobu. Závislost měření vlhkosti na teplotě materiálu se kompenzuje prostřednictvím elektronického systému s termistorem. Jiným možným řešením je použití poměrně složitějšího prediktoru, který na základě sady vstupních veličin (resp. vnitřních stavů systému) vypočítává vlhkost škrobu, která se dále používá jako vstupní veličina pro algoritmus řízení.

Druhý problém je řešen především použitím typu řídicího systému a jeho strukturou. Nejčastěji používaný typ řízení v tomto případě, jak bylo již řečeno, bývá klasické řízení PID regulátory. Toto řešení pracuje poměrně spolehlivě pouze v malém okolí pracovního bodu, což samo o sobě pro kvalitní řízení mnohdy stačí. Nevýhodou je špatná regulace při větších výkyvech mimo pracovní bod. Zde dochází k tomu, že je velká část škrobu buď nedosušena, nebo naopak přesušena. V obou případech je materiál dále nepoužitelný.

1.1 Koncepce řešení

Abychom mohli provádět bližší zkoumání reakcí klasického řídicího algoritmu na změny parametrů systému, je nutné se v první řadě zabývat sestavením odpovídajícího modelu soustavy – sušičky potravinářského škrobu. Přesný, avšak velmi složitý, model je možné získat použitím modelování na bázi konečných prvků. Tato metoda je však velmi složitá a svým rozsahem nevhodná pro bakalářskou práci. Jednodušším řešením bude rozdělit soustavu na několik málo částí a ty poté modelovat. Vztahy v soustavě bude rozumné popsat výkonovými grafy, z důvodu jejich názornosti a také proto, že z nich lze snadno sestavit simulační schéma. Nedílnou součástí konstrukce simulačního schématu bude i důkladné ověření jeho funkčnosti s důrazem na korektní chování všech důležitých proměnných. Na takto získaném modelu soustavy bude možné otestovat funkci klasické koncepce řízení a v zápětí navrhnout alternativní pojetí řídicího algoritmu. Součástí práce bude i srovnání výsledků dosažených použitím obou zkoumaných způsobů řízení.

1.2 Škrob

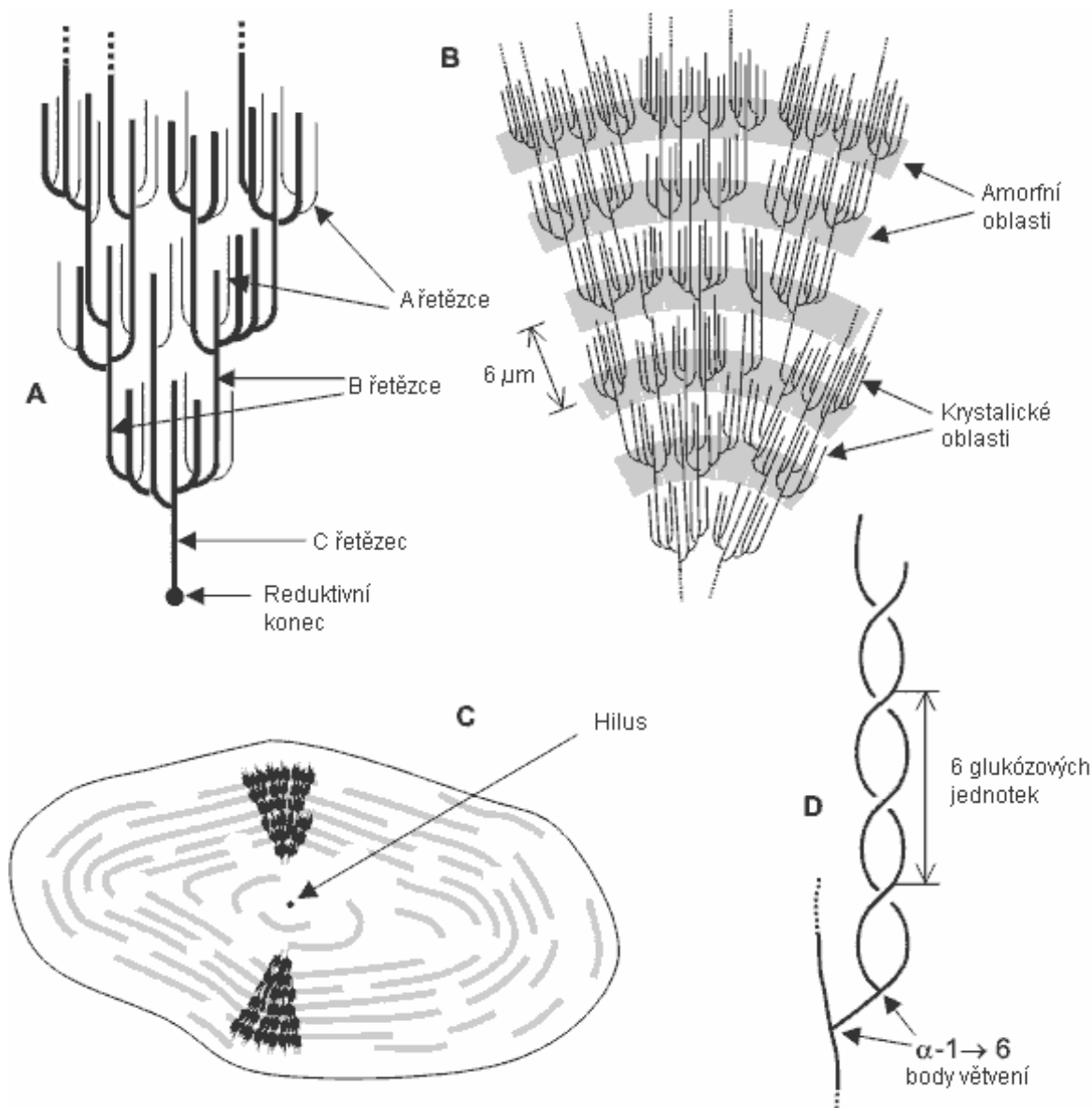
Dříve, než se pustíme do analyzování sušičky škrobu, je přínosné čtenáře alespoň rámcově seznámit s povahou sušeného materiálu – škrobu. Čtenář tak získá širší povědomí o vlastnostech škrobu, což se může hodit pro pochopení procesu sušení. Níže uvedené informace jsou čerpány z [6] a [7].

Škrob je hlavní zásobárnou cukru v hlízách a semenech rostlin. Vyskytuje se ve formě zrn, kde každé zrno typicky obsahuje několik milionů molekul amilopektinu (obvykle 70–80 %) a také několikrát více molekul amylozy (obvykle 20–30 %). Je zřejmé, že molekuly amylozy jsou rozměrově menší, než molekuly amilopektinu. Obrázky molekul obou látek jsou dostupné na [7].

Vzhledem k tomu, že se škrob převážně skládá z amilopektinu, podívejme se blíže na jeho strukturu. Molekula amilopektinu obsahuje až dva miliony glukózových reziduí v rámci kompaktní struktury s hydrodynamickým poloměrem 21–75 nm. Molekuly jsou v škrobovém zrně orientovány radiálně, a jak roste poloměr, tak roste i počet větví, které vyplňují daný prostor. Toto vede ke vzniku soustředných oblastí střídavě amorfní a krystalické struktury. Obrázek 1.1 níže zobrazuje: A – základní strukturu amilopektinu, B – organizaci amorfních a krystalických oblastí, které tvoří soustředné vrstvy „růstových kruhů“ viditelné pod mikroskopem, C – orientaci molekul amilopektinu v řezu idealizovaným škrobovým zrnem a D – dvojitou spirálu tvořenou sousedními řetězci.

Největším zdrojem škrobu je kukuřice následovaná dalšími používanými zdroji, jako jsou brambory, pšenice a rýže. V menší míře se škrob získává z banánů, sága, fazolí a mnoha dalších plodin. Genetiky modifikované zemědělské plodiny vedly k vývoji škrobů s lepšími vlastnostmi.

Škrob je víceúčelový a levný a má mnoho využití jako zahušťovadlo, stabilizátor emulzí, vodu vázající činidlo a prostředek gelatinizace. Škrob je často využíván jako základní přísada, ale také je přidáván pro svoje vlastnosti. Nejčastěji se setkáváme se škrobem ve formě bílého prášku, v závislosti na zdroji může být bez chuti a zápachu. Škrobový prášek se skládá z dehydrovaných zrn specifického původu a velikosti, např. rozměry zrna jsou 2–30 μm u kukuřičného škrobu, 1–45 μm u pšeničného škrobu a 5–100 μm bramborového škrobu.



Obrázek 1.1: Struktura škrobového zrna

Co se týče výživy, je škrob nejčastěji konzumovaným polysacharidem. Reprezentuje více než polovinu cukrů v nutričně bohaté stravě a ještě mnohem více v nutričně chudší stravě. Tradiční základní potraviny, jako jsou různé druhy zrnin a hlíz, tvoří hlavní zdroj škrobů v potravě.

Předvařený škrob může být použit k zahuštění pokrmů. Takto upravenému škrobu se říká „předgelatinizovaný“ škrob. V ostatních případech potřebuje škrob ke ztužení určité množství tepla, které závisí na typu škrobu.

Škrob je v průmyslu využíván k výrobě lepidel, papíru², dále stavebním průmyslu jako surovina v procesu výroby sádry, jako materiál pro výrobu různých forem, nebo se dokonce používá jako stabilizátor při těžbě ropy.

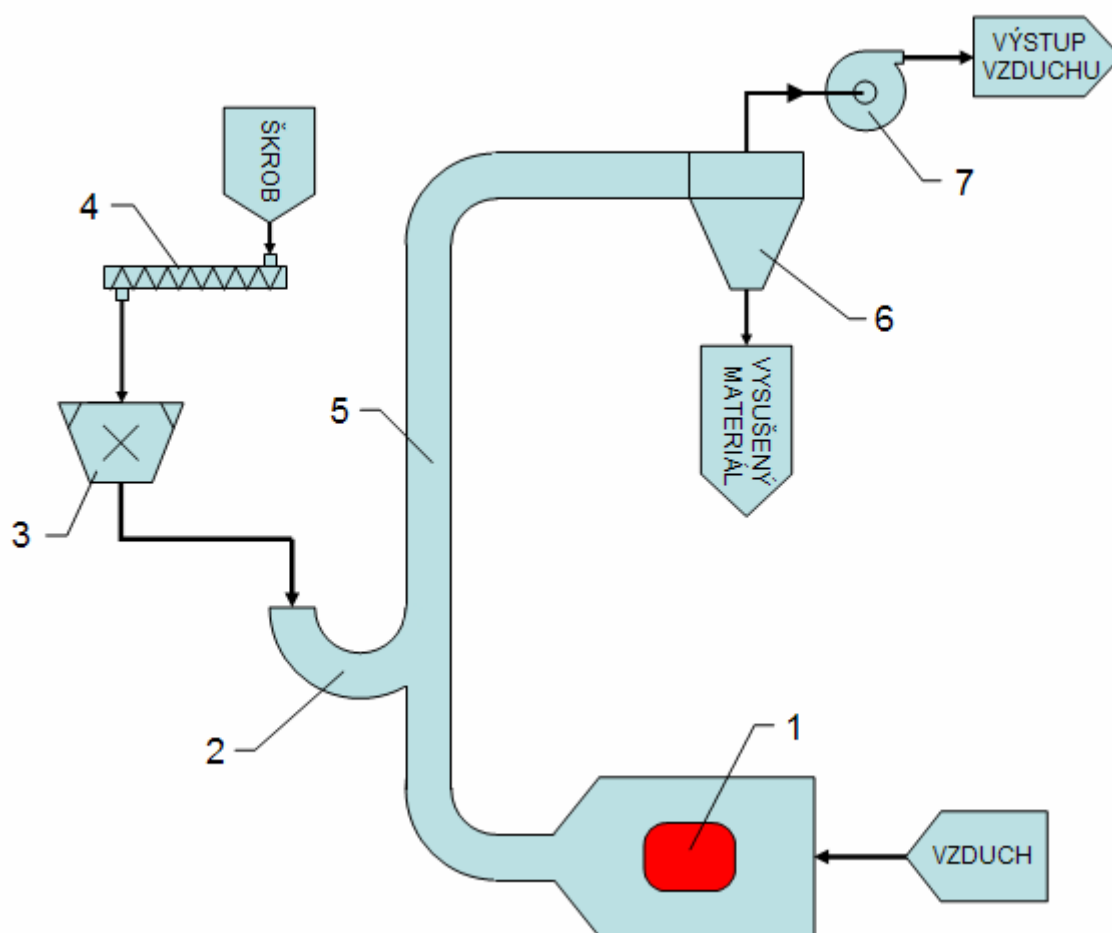
Zvýše uvedeného vyplývá, že škrob má mnohé využití a že se ho spotřebovává skutečně velké množství. Proto spolehlivě fungující proces výroby škrobu je pro zajištění dodávek, a tím pádem uspokojení poptávky po škrobu, klíčový.

Nyní, zevrubně obeznámeni s povahou sušeného materiálu, se můžeme vrátit k problému řešení problému řízení teploty v sušičce škrobu.

² Téměř 8% hmoty papíru je tvořeno škrobem, škrob zde slouží jako pojivo.

2 Popis soustavy

Jestliže chceme vytvořit dostatečně přesný model jakéhokoli systému, je nezbytně nutné se s tímto systémem dobře seznámit. Proto se v této kapitole budeme věnovat rozboru hlavních částí a funkčních celků naší soustavy – sušičky potravinářského škrobu. Sušička jako taková je poměrně komplexní zařízení technologické. Nicméně pro základní pochopení funkčních vztahů nám poslouží zjednodušené schéma pneumatické konvekční sušičky, viz obrázek 2.1.



Obrázek 2.1: Schéma sušícího zařízení: 1 – tepelný výměník, 2 – vstup vlhkého materiálu, 3 – dávkovač, 4 – šnekový dopravník, 5 – sušící trubice, 6 – odstředivka, 7 – odsávací ventilátor

Sušící médium³ je vháněno z vnějšího prostředí a ohřáno průchodem přes tepelný výměník (1). Sušení probíhá jednoduše přímým kontaktem vlhkého materiálu a horkého plynu. Jedná se o přímé sušení. Sušeným materiálem je potravinářský škrob⁴. Dávkování vlhkého materiálu se provádí dávkovačem (3), do kterého je materiál přiváděn šnekovým dopravníkem (4). Dávkovač zde zároveň i promíchává materiál a dodává mu tak požadovanou konzistenci. Vlhký materiál je pak na vstupu sušeného materiálu do soustavy (2) unášen proudem horkého média. Hlavní část sušení probíhá během průchodu směsi vzduch – škrob skrze sušící trubici (5). Následně materiál prochází systémem odstředivek (6), ve kterých se pomocí gravitace a proudění vzduchu oddělují částice vysušeného škrobu od sušícího média. Vysušený materiál se pak odvádí ze soustavy ven systémem šnekových dopravníků do zásobníků, kde je připraven k dalšímu zpracování. Procedura následné přepravy a zpracování materiálu nás však v rámci řízení teploty zajímat nebude, proto její části nejsou na obrázku 2.1 znázorněny. Odpadní horký vzduch je pak odsáván ventilátorem (7). Vzhledem k tomu, že odpadní vzduch obsahuje nezanedbatelné množství zbytkového tepla, je tento vzduch přiváděn do rekuperačních výměníků, kde odevzdává podstatnou část tepelné energie. Díky tomu lze dosáhnout vysoké energetické účinnosti a relativně nízkých provozních nákladů pneumatických konvekčních sušiček.

Je dobré poznamenat, že tah generovaný zmíněným ventilátorem je hlavní hybný element sušícího média v celé soustavě. Jako vedlejší hybný element lze označit přirozený tah soustavy jakožto určitého typu komína.

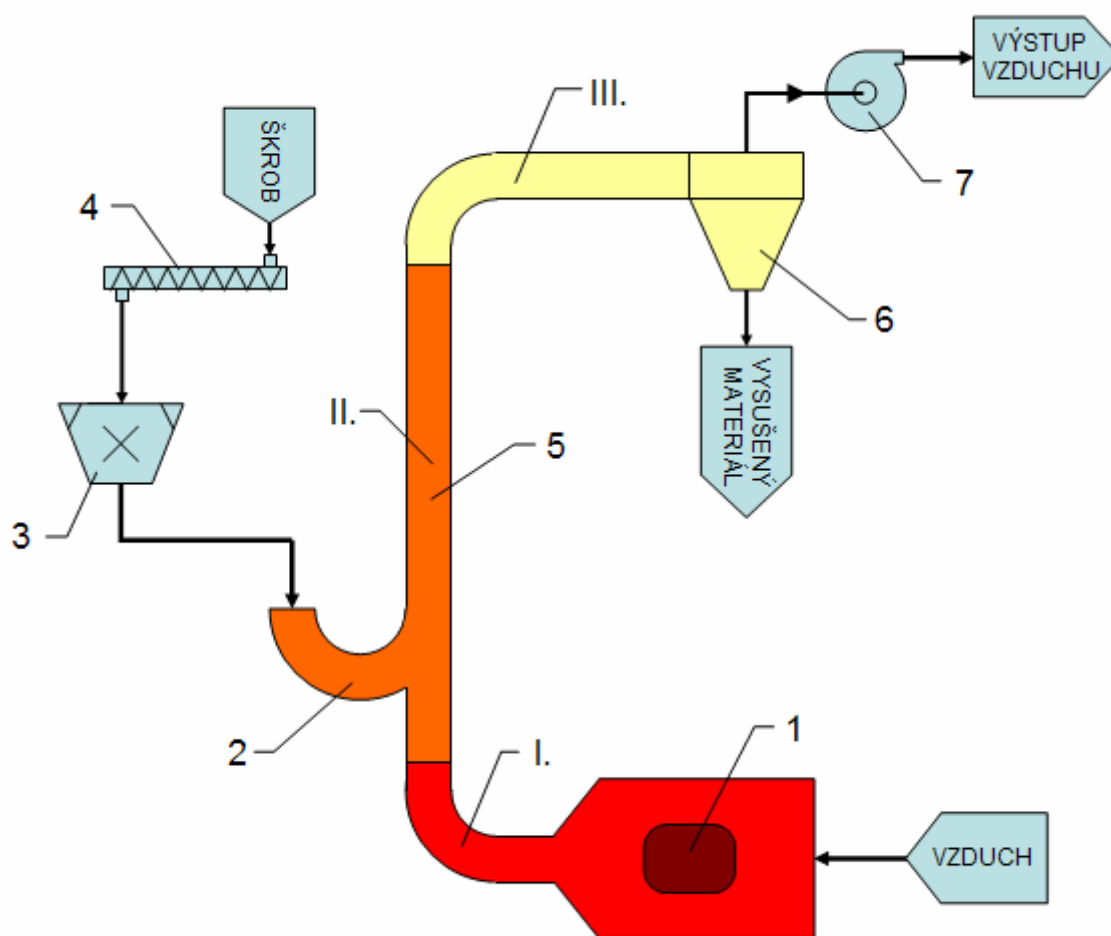
V praxi se lze potkat s několika zásadními odlišnostmi na různých typech sušiček. Nejpodstatnějším rozdílem, který v popisované soustavě chybí, je recirkulace sušeného materiálu za účelem zvýšení jeho homogenity na výstupu. Jedná se o situaci, kdy je část materiálu na konci sušící trubice a na výstupu soustavy odváděna zpět do dávkovače.

³ V tomto konkrétním případě se jedná o vzduch.

⁴ Nejčastěji se jedná o škrob kukuřičný nebo bramborový.

3 Analýza soustavy

V této kapitole se blíže podíváme na vztahy uvnitř sušičky. Dle kapitoly koncepce řešení použijeme jednoduchý model reálného systému. Bude nás tedy zajímat pouze přibližná aproximace chování soustavy. Z toho důvodu si rozdělíme sušičku na tři základní sekce jmenovitě sekce 1, sekce 2 a sekce 3, viz obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Sekce sušičky: I. – Sekce 1, II. – Sekce 2, III. – Sekce 3
(ostatní popisky viz obrázek 2.1)

Jednotlivé sekce tvoří funkční elementy, jejichž vzájemné vztahy se na rozdíl od komplexního celku snáze popisují. Na základě těchto vztahů vytvoříme příslušný výkonový graf dané sekce. Znázornění pomocí výkonových grafů je výhodné a to z důvodu, že z výkonových grafů pak můžeme velmi jednoduše přejít přímo na

simulační schéma. Podle [1] existují dvě základní modifikace výkonových grafů pro modelování tepelných systémů. Jedná se o výkonové grafy s pravou vazbou nebo s pseudovazbou. Druhý jmenovaný případ využijeme zde, protože je snazší na pochopení.

Výkonové grafy popisující tepelný systém obsahují několik elementárních prvků. Mezi ně patří uzly typu **0** a **1**, tepelný rezistor **R**, tepelný kapacitor **C**, zdroj úsilí **Se** a zdroj toku **Sf**. Podrobné informace o vnitřní struktuře těchto prvků jsou dostupné ve [1].

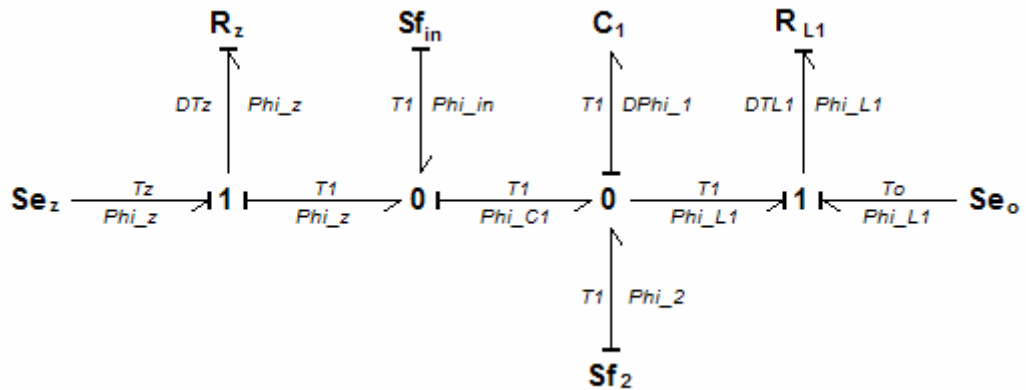
3.1 Sekce 1

Tato sekce tvoří přípravnou část sušícího zařízení na zpracování sušícího média. Obsahuje vstupní nasávání vzduchu. Nasávaný vzduch je pak následně ohřán soustavou tepelných výměníků (jako médium se používá přehřátá pára o tlaku 12 bar a 2 bar) na teplotu cca 200 °C. Takto ohřátý vzduch proudí do následující sekce. Je pochopitelné, že jisté množství tepla ze sekce 1 bude unikat přes stěny do okolí.

Nyní se rozmysleme, jak zmíněnou reálnou situaci vhodně reprezentovat částmi výkonového grafu. Je zřejmé, že proud vstupního vzduchu o venkovní teplotě s sebou do sekce přináší určité množství tepla, budeme jej proto modelovat zdrojem tepelného toku Sf_{in} . Další součástí je tepelný výměník. Přehřátou páru můžeme zjednodušeně považovat za zdroj konstantní teploty T_z a tedy za zdroj úsilí Se_z . Následně dochází k přenosu tepla přehřáté páry přes stěnu výměníku. Tuto budeme aproximovat jako tenkou stěnu – tepelným rezistorem R_z . Vzniklý tepelný tok Φ_z se sečte s tepelným tokem Φ_{in} , jenž je určován zdrojem Sf_{in} . Výsledný tepelný tok se bude akumulovat v objemu sušícího média, které se v daném časovém okamžiku nachází uvnitř prostoru vymezeného sekci 1. Jako průvodní jev budeme pozorovat růst teploty $T1$ v sekci 1 do té doby, než bude dosaženo rovnováhy mezi přicházejícím a odcházejícím teplem. Toto budeme reprezentovat tepelným kapacitorem C_1 . Ztráty přestupem tepla přes stěny sekce 1 do okolí, jehož teplotu T_o budeme považovat za konstantní, budeme modelovat tepelným tokem Φ_{L1} . Tento bude určen zdrojem úsilí Se_o a modelem tenké stěny v podobě tepelného rezistoru R_{L1} . Ohřátý vzduch proudící ze sekce 1 do sekce 2 sebou odnáší značné

množství tepla. To budeme modelovat tepelným tokem Φ_2 , který bude určován zdrojem tepelného toku Sf_2 .

Z výše uvedených prvků teď snadno sestavíme příslušný výkonový graf, viz obrázek 3.2 níže.



Obrázek 3.2: Výkonový graf sekce 1

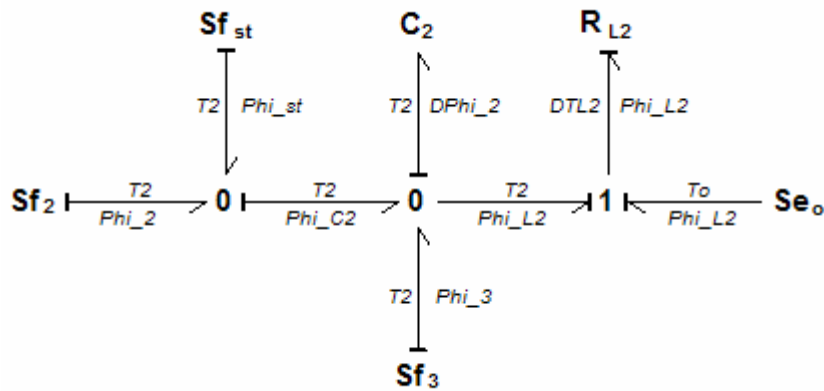
3.2 Sekce 2

Sekce 2 je střední částí sušicího zařízení. Zde probíhá samotný proces sušení. Na vstupu do této sekce proudí ohřátý vzduch ze sekce 1. Dále prostřednictvím dávkovače je do sekce přiváděna vlhká škrobová kaše určená k sušení. Škrob je unášen proudem vzduchu až na výstup sekce 2. Nezanedbatelné množství tepla odchází přes stěny sekce formou ztrát do okolí.

Obdobně jako v případě první sekce postupně analyzujeme část reálného zařízení tak, abychom našli odpovídající výkonový graf, který toto zařízení bude přiměřeně přesně popisovat. V předchozí podkapitole jsme si definovali zdroj tepelného toku Sf_2 a jím určený tepelný tok Φ_2 . Tyto nám budou tepelně napájet sekci 2. Dalším důležitým tepelným tokem je vstupující vlhká škrobová kaše. Zavedme proto zdroj tepelného toku Sf_{st} , který bude generovat tepelný tok Φ_{st} . Tepelné toky Φ_2 a Φ_{st} se sečtou a následně se budou ukládat do tepelného kapacitoru C_2 – objemu směsi vzduchu, vodní páry a vlhkého škrobu, který se právě nachází uvnitř sekce 2. To se navenek projeví růstem teploty $T2$ v sekci 2 až do doby dosažení rovnováhy tepelné bilance. Je zřejmé, že teplota $T2$ nebude zdaleka dosahovat takových hodnot jako teplota $T1$ a to jednak v důsledku ztrát, ale také tím,

že hodnota C_2 bude větší než hodnota C_1 . I v tomto případě budeme uvažovat ztráty přestupem tepla přes stěny sekce 2 do okolí – tepelný tok Φ_{L2} . Použijeme obdobou konstrukci jako v předchozí podkapitole. Zavedeme model tenké stěny v podobě tepelného rezistoru R_{L2} (jeho hodnota se bude lišit od hodnoty R_{L1} především díky rozdílné velikosti sekce 1 a sekce 2). Zdroj úsilí Se_o zůstává stejný. Na výstupu sekce 2 sebou odnáší směs vzduchu, škrobu a vodní páry teplo reprezentované tepelným tokem Φ_3 a zdrojem tepelného toku Sf_3 .

Výsledný výkonový graf je na obrázek 3.3.



Obrázek 3.3: Výkonový graf sekce 2

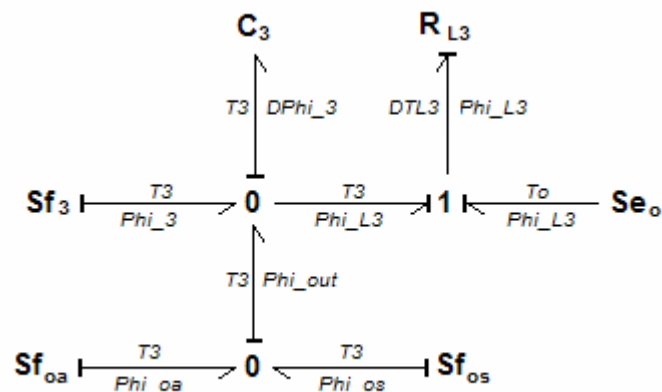
3.3 Sekce 3

Sekce 3 poslední část sušícího zařízení, kde se odděluje vysušený práškový škrob od vzduchu, který převzal podstatou část počáteční vlhkosti. Průměrná teplota T_3 uvnitř sekce 3 je nižší, než průměrné teploty v ostatních sekcích, přesto však dochází k ztrátám tepla jeho prostupem přes stěny a únikem do okolního prostředí.

Tvorba výkonového grafu poslední sekce je celkem jednoduchá. Tato sekce je napájena zdrojem tepelného toku Sf_3 , a jím generovaným tepelným tokem Φ_3 . Teplo se akumuluje do tepelného kapacitoru C_3 , který nám podobně, jako v předchozích případech, reprezentuje objem veškerého materiálu uvnitř sekce v daný časový moment. Dále si musíme uvědomit, že sušený materiál spolu se vzduchem, který je ze soustavy odčerpáván výkonným ventilátorem, má určitou výstupní teplotu a tudíž odvádí ze soustavy část tepla. Zmíněnou situaci musíme

v rámci zachování dostatečné věrnosti modelu zakomponovat do výkonového grafu jako dva zvláštní zdroje tepelného toku – Sf_{oa} pro odpadní vzduch a Sf_{os} pro jímány škrob. Samozřejmě k těmto zdrojům tepelného toku náleží příslušné tepelné toky Φ_{oa} a Φ_{os} . Tepelné ztráty Φ_{L3} budeme modelovat přestupem tepla přes tenkou stěnu (tepelný rezistor R_{L3}) a zdrojem úsilí Se_o jakožto okolní prostředí o konstantní teplotě T_o .

Tímto dostaneme výkonový graf sekce 3, viz obrázek 3.4.



Obrázek 3.4: Výkonový graf sekce 3

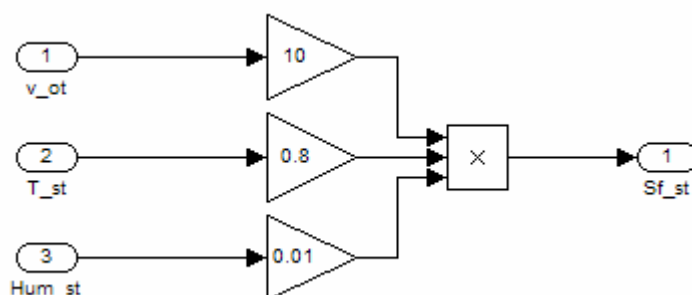
Poznámka k výkonovým grafům: Je patrné, že každý z výše uvedených výkonových grafů by bylo možné zjednodušit podle pravidel redukce uzlů, viz [1]. Avšak pro zachování přehlednosti jsou v grafech ponechány redundantní uzly.

4 Návrh simulačního schématu soustavy

V této kapitole vytvoříme jednoduché simulační schéma soustavy – sušičky potravinářského škrobu. Na tomto schématu ověříme nejen funkčnost, ale i formální správnost získaných výkonových grafů. Případné nedostatky odstraníme tak, aby finální simulační schéma bylo použitelné pro účely návrhu řídicího systému.

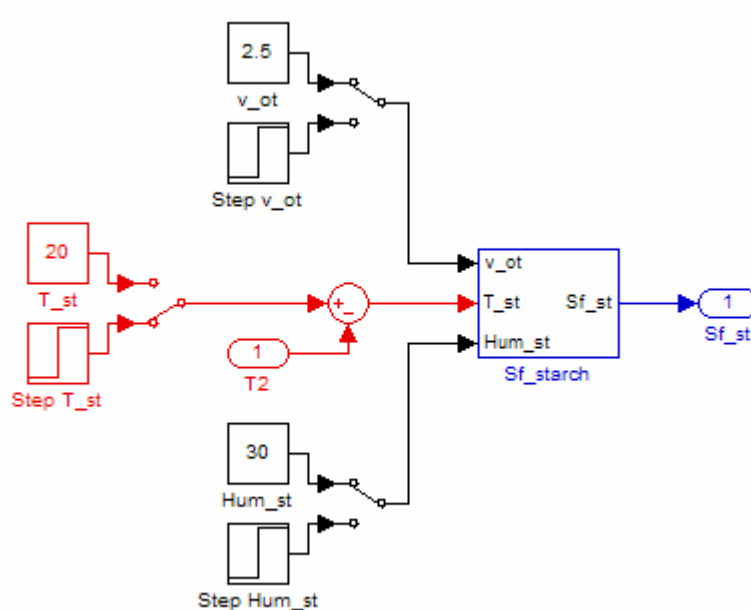
Správnost výkonových grafů zkontrolujeme pomocí simulačního schématu, které nám poslouží k vizualizaci vztahů mezi jednotlivými částmi soustavy. K sestavení simulačního schématu z výše uvedených výkonových grafů použijeme pravidel, viz [1]. Jednotlivé elementární prvky výkonových grafů budou mít lineární charakteristiky. Fyzikální rozměry ani reálné hodnoty prvků nebudeme v tomto okamžiku uvažovat. Nicméně hodnoty jednotlivých prvků budeme volit takovým způsobem, aby výstupy simulačního schématu nebyly nesmyslné, ale aby přinejmenším řádově odpovídaly těm, kterých by mělo být dosaženo ve finálním simulačním schématu. Výkonové grafy příslušných sekcí soustavy jsme propojili skrze zdroje toku odsávající teplo z jedné sekce a zároveň napájející následující další sekci (s výjimkou poslední sekce, kde tento zdroj toku představuje „výfuk“ ze soustavy).

Zvláštní pozornost věnujme konstrukci bloku Sf_{st} . Velikost hodnoty tepelného toku Φ_{st} generovaného tímto blokem je závislá na rychlosti otáčení šnekového dopravníku v_{ot} , teplotě škrobové kaše T_{st} a její vlhkosti Hum_{st} . Přesnou funkci závislosti neznáme, proto pouze přibližně odhadneme hodnotu tohoto tepelného toku jako funkci výše zmíněných veličin a tří parametrů. Parametry zvolíme tak, aby funkce tepelného toku Sf_{st} nabývala hodnot v řádu stovek.



Obrázek 4.1: Funkce výpočtu hodnoty Sf_{st} – blok Sf_{starch}

Na obrázku 4.1 je zobrazena použitá empirická funkce výpočtu hodnoty Sf_{st} .



Obrázek 4.2: Struktura bloku Sf_{st}

Obrázek 4.2 znázorňuje celkovou strukturu bloku Sf_{st} . Důležitou částí schématu je rozdíl teplot T_2 a T_{st} . Díky tomuto rozdílu teplot bude škrob vstupující do soustavy ochlazovat sekce, kterými prochází. Jinak by naopak tyto sekce ohříval. Škrobová kaše sama o sobě do soustavy určité teplo dodává, ale také většinu tepla spotřebovává na vypaření přebytečné vody, kterou v hojné míře obsahuje. Proto tento tok modelujeme se záporným znaménkem, jinak řečeno o záporné znaménko se postará právě zmíněný rozdíl teplot, protože teplota v sekci 2 bude vždy vyšší než teplota škrobové kaše. Ta se ve skutečnosti pohybuje v rozmezí od 10 °C do 40 °C.

Pozorný čtenář si jistě všimne přítomnosti teploty okolního prostředí T_o (dále jen teplota okolí), která je společná pro všechny sekce. Předpokládá se totiž, že celé zařízení je umístěno v samostatné budově. Teplotu budeme uvažovat přibližně stejnou pro všechny části budovy. Je velmi pravděpodobné, že se během roku bude tato teplota měnit v závislosti na venkovní teplotě⁵. Tento jev bude mít v důsledku dosti velký vliv na chod celé soustavy, proto ho nesmíme zanedbat. Dynamika změn teploty okolí T_o je ve skutečnosti relativně pomalá.

⁵ Především je míněn rozdíl teplot v zimním a letním období.

Dále si povšimněme umístění dopravních zpoždění, které, alespoň rámcově, aproximuje činnost reálného systému. Stejně tak neuniknou pozornosti jednak rozdíly v hodnotách C_{p1} , C_{p2} a C_{p3} , které vyjadřují různou tepelnou kapacitu odpovídajících sekcí, ale také rozdílné hodnoty R_{L1} , R_{L2} a R_{L3} , jenž vyjadřují odlišnost rozměrů příslušných sekcí.

Je zřejmé, že celá soustava se chová spojitě v čase. Přivedeme-li na vstup výměníku skok teploty T_z , v reálném případě nedojde ke skokové (a tedy nespojitě) změně teploty na jeho výstupu $T0$. Výstupní teplota $T0$ začne pozvolna růst, tak jak se začnou ohřívat stěny výměníku. Z toho důvodu je do simulačního schématu vložen blok systému prvního řádu, který tuto nespojitost odstraní, časovou konstantu můžeme později dodatečně zvolit s důrazem na věrné sledování skutečného systému. Tímto blokem aproximujeme tepelnou kapacitu stěn výměníku. Parametry bloku prvního řádu jsou uvedeny v příloze (Příloha B) ve formě skriptu „Chování výměníku“.

Soustavu jako takovou není možné simulovat bez nastavení patřičných počátečních podmínek. Abychom se vyhnuli jejich častému a relativně pracnému přenastavování v rámci každého jednotlivého bloku, použijeme k tomuto účelu vytvořený „Skript nastavení počátečních podmínek předsimulace“ a „Skript nastavení počátečních podmínek pracovního bodu“, viz Příloha B. Pro ještě snazší práci se soustavou jsou v modelu umístěna tlačítka, která zmíněné skripty spouští.

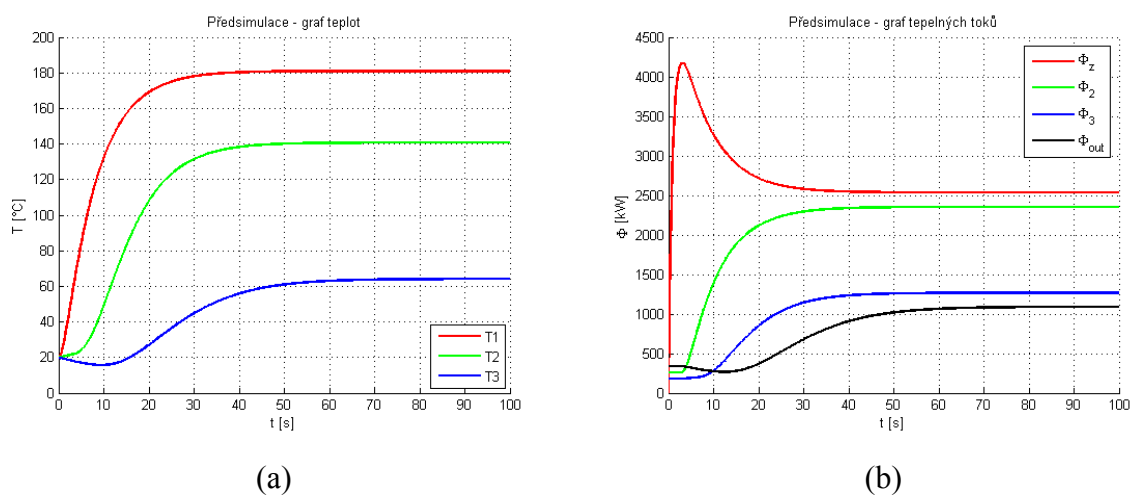
Z důvodu zajištění bezproblémové čitelnosti schématu jsme využili bloků typu „From“ a „Goto“ tzv. „tagů“ – bloků, které se používají pro přenos signálu bez klasického signálového propojení. Získané finální simulační schéma soustavy je uvedeno v příloze (Příloha A).

5 Ověření dynamiky soustavy

V této kapitole se dostáváme k ověření dynamiky soustavy reprezentované simulačním schématem, které je popsáno v předchozí kapitole. V rámci ověřování budeme sledovat skokové změny vstupních, manipulovatelných a poruchových proměnných (viz Příloha C) a následně budeme diskutovat získané průběhy.

Dynamiku soustavy budeme porovnávat s reálným systémem z kvalitativního hlediska a to z toho důvodu, že reálná data nebyla k dispozici. O kvantitativní přesnosti můžeme jen spekulovat.

Pro začátek provedme takzvanou předsimulaci, tzn. odezvu systému na definované počáteční podmínky takové, abychom mohli odečíst ustálený stav – pracovní bod, ze kterého budeme soustavu posléze vychylovat. Zmíněné počáteční podmínky se sestávají z nastavení teploty 20 °C na většině dynamických prvků (integrátory a dopravní zpoždění) a z nastavení některých dalších parametrů. Pro vytvoření ucelené představy si čtenář může prohlédnout příslušný skript v příloze (Příloha B).



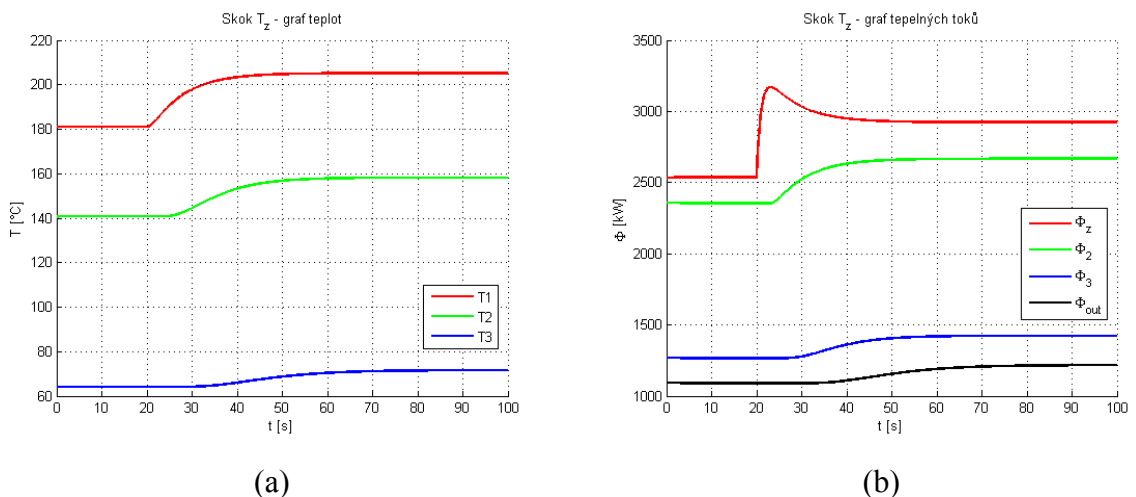
Obrázek 5.1: Předsimulace – (a) teploty, (b) tepelné toky

Z grafů, viz obrázek 5.1, snadno nahlédneme, že teploty (a) jsou správně odstupňované, což kvalitativně odpovídá realitě. Dopravní zpoždění způsobuje u teploty T_3 chování blízké se odezvě systému s neminimální fází. To je způsobeno tepelnými ztrátami – přestupem tepla do okolního prostředí v mezidobí, než tepelný

tok projde celou soustavou až do poslední sekce. Chování tepelného toku Φ_z kvalitativně odpovídá reálné situaci. Před ohřátím média v sekci 1 je tepelný tok stěnami výměníku větší, ale s rostoucí teplotou média v sekci 1 tento tok pochopitelně klesá zvolna tak, jak se postupně zmenšuje rozdíl teploty na vnějším povrchu výměníku $T0$ a teploty $T1$ v sekci 1. Z grafu na obrázku 5.1 lze také odečíst hodnoty teplot ustáleného stavu, který zvolíme pro další simulace jako pracovní bod. Jmenovitě hodnoty teplot v tomto ustáleném stavu činí $T1 = 181,0 \text{ }^\circ\text{C}$, $T2 = 140,7 \text{ }^\circ\text{C}$ a $T3 = 64,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.1 Skok teploty páry T_z ve výměníku

Nyní se podíváme na chování soustavy při skokové změně teploty páry T_z ve výměníku. Je třeba zmínit, že se jedná o řídicí veličinu, pomocí které budeme ovládat teplotu vzduchu proudícího soustavou. Nejprve nastavíme počáteční podmínky soustavy na hodnoty pracovního bodu získaného v předchozí podkapitole. K tomu s výhodou použijeme související skript v příloze (Příloha B). Výchozí hodnota vstupní teploty výměníku je $T_z = 350 \text{ }^\circ\text{C}$. V čase $t_{step} = 20 \text{ s}$ přivedeme na vstup výměníku skokovou změnu teploty o $\Delta T_z = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, takže výsledná hodnota vstupní teploty výměníku T_z bude $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Ostatní parametry systému ponecháme na hodnotách, viz Příloha C.



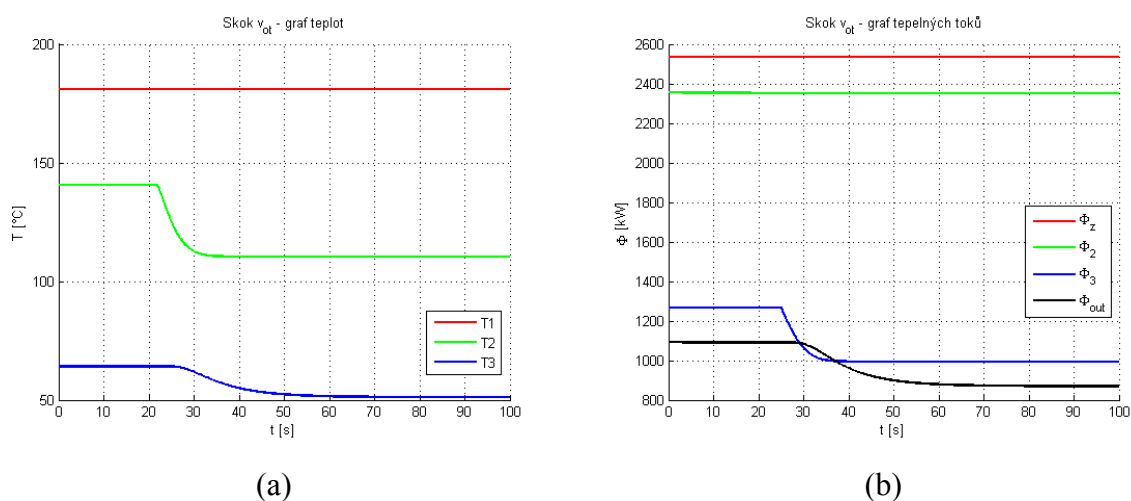
Obrázek 5.2: Odezva systému na skok teploty T_z – (a) teploty, (b) tepelné toky

Z grafů na obrázku 5.2 můžeme vidět, jak se skok teploty T_z postupně propaguje soustavou v podobě růstu teplot v odpovídajících sekcích. V každé

následující sekci se počátek skoku zpožďuje díky dopravnímu zpoždění a také je menší kvůli tepelným ztrátám do okolí. Teploty se po odeznění přechodového děje ustálily na hodnotách $T1 = 205,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $T2 = 158,2 \text{ }^\circ\text{C}$ a $T3 = 71,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Na grafu tepelných toků si na první pohled všimneme výrazného překmitu tepelného toku Φ_z , který je způsoben postupným vyrovnáváním teplot a dynamikou dopravních zpoždění.

5.2 Skok rychlosti otáčení v_{ot} šnekového dopravníku

Další veličina, jejíž změna může podstatným způsobem ovlivnit chod sušičky je rychlost otáčení v_{ot} šnekového dopravníku. Předpokládejme, že zvýšení hodnoty této veličiny bude mít za následek pokles teploty jednak v sekci 2 a posléze i teploty v sekci 3. Nikoliv však v sekci 1, protože do sekce 1 by se sušený materiál vůbec neměl dostat, resp. budeme předpokládat přenos materiálu pouze v dopředeném směru. Všechny parametry systému ponecháme neměnné na hodnotách (viz Příloha C), kromě v_{ot} , jejíž hodnotu změním v čase $t_{step} = 20 \text{ s}$ přivedením skoku o velikosti $\Delta v_{ot} = 2,5 \text{ ot/min}$. Hodnota v_{ot} pak bude rovna 5 ot/min .



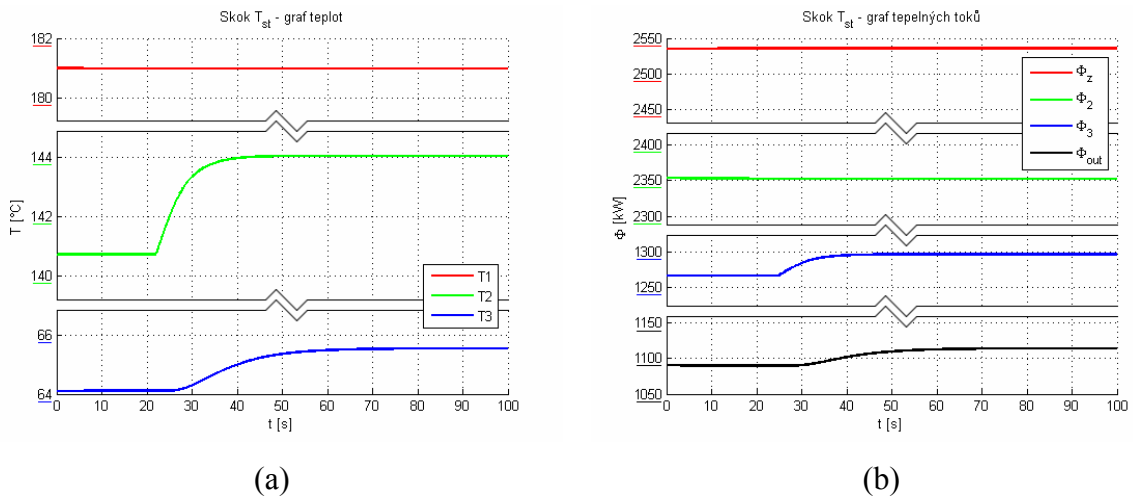
Obrázek 5.3: Odezva systému na skok rychlosti otáčení v_{ot} – (a) teploty, (b) tepelné toky

Grafy na obrázku 5.3 vypovídají o chování na výše zmíněnou skokovou změnu hodnoty v_{ot} . Systém se chová podle našich předpokladů. Hodnota teploty $T1$ zůstala nedotčena. Podobné chování můžeme pozorovat i v případě tepelných toků,

kdy Φ_z a Φ_2 nejsou ovlivněny. Teplota T_2 klesla z 140,7 °C na 111,4 °C a teplota T_3 klesla z 64,1 °C na 52,5 °C. Pozorného čtenáře může napadnout, zda je velikost změny v hodnotě T_2 adekvátní. Odpověď je nasnadě. V našem případě se totiž spokojíme alespoň s přibližným chováním, které bude zhruba aproximovat chod reálného systému. Nicméně pro lepší věrnost není vyloučena i částečná úprava parametrů, aby bylo dosaženo přesnějšího chování.

5.3 Skok teploty škrobové kaše T_{st}

První testovanou poruchovou veličinou je teplota škrobové kaše T_{st} . S rostoucí teplotou T_{st} bude do soustavy proudit větší tepelný tok, než v případě, kdy by byla teplota škrobové kaše nižší. Respektive sušící zařízení nebude muset tolik ohřívat sušený materiál, aby bylo dosaženo obdobného stupně vlhkosti na výstupu, při současně nižší teplotě škrobové kaše. Stejně jako v předchozích případech testů i zde použijeme jako výchozí hodnoty všech veličin a parametrů takové, jaké odpovídají získanému pracovnímu bodu, viz Příloha C. V počátku tedy bude $T_{st} = 20$ °C. Poté v čase $t_{step} = 20$ s skokově zvýšíme hodnotu T_{st} na 30 °C.



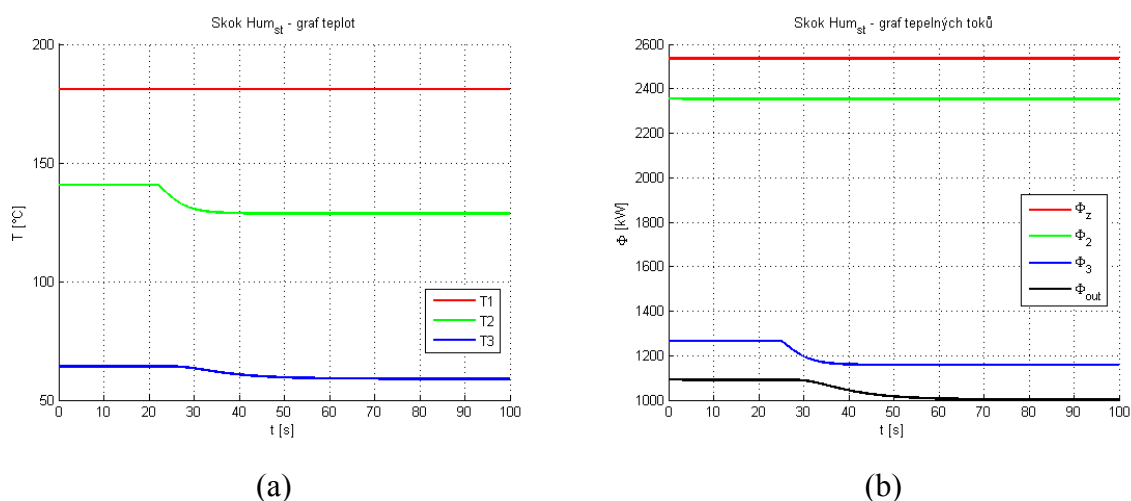
Obrázek 5.4: Odezva systému na skok teploty škrobové kaše T_{st} – (a) teploty, (b) tepelné toky

Z obrázku 5.4 můžeme snadno nahlédnout, že zvýšením teploty T_{st} skutečně vedlo k růstu teplot a tepelných toků v sekcích 2 a 3. Změna teplot není nikterak výrazná, jmenovitě T_2 vzrostla o 3,3 °C na 144 °C a T_3 vzrostla o 1,4 °C na 65,4 °C. Tepelné toky Φ_z a Φ_2 zůstaly pochopitelně změnou T_{st} nedotčeny.

Přestože skok T_{st} nevyvolal markantní změnu v rozložení ostatních teplot v soustavě, bude rozumné tuto poruchovou veličinu brát v potaz. Je totiž dosti pravděpodobné, že na reálném systému je působení této veličiny významnější.

5.4 Skok vlhkosti škrobové kaše Hum_{st}

Další veličinu, kterou podrobíme zkoumání je vlhkost škrobové kaše Hum_{st} . Za zmínku stojí, že jde o poruchovou veličinu. Její náhodné změny budou vychylovat systém sušičky škrobu z nastaveného pracovního bodu. V souladu s realitou předpokládáme, že zvýšení této veličiny způsobí pokles teplot v sekci 2 a 3. To je vyvoláno přítomností většího množství vody v sušeném materiálu. Pro odpaření této přebytečné vody je pak nutné dodat více tepla. V našem případě je však množství tepla přicházejícího do soustavy v pracovním bodě konstantní a tedy celá situace vyústí v pokles teploty. Výchozí hodnota Hum_{st} bude odpovídat 30%. V čase $t_{step} = 20$ s vyvoláme skokový přechod této veličiny na hodnotu 40%.



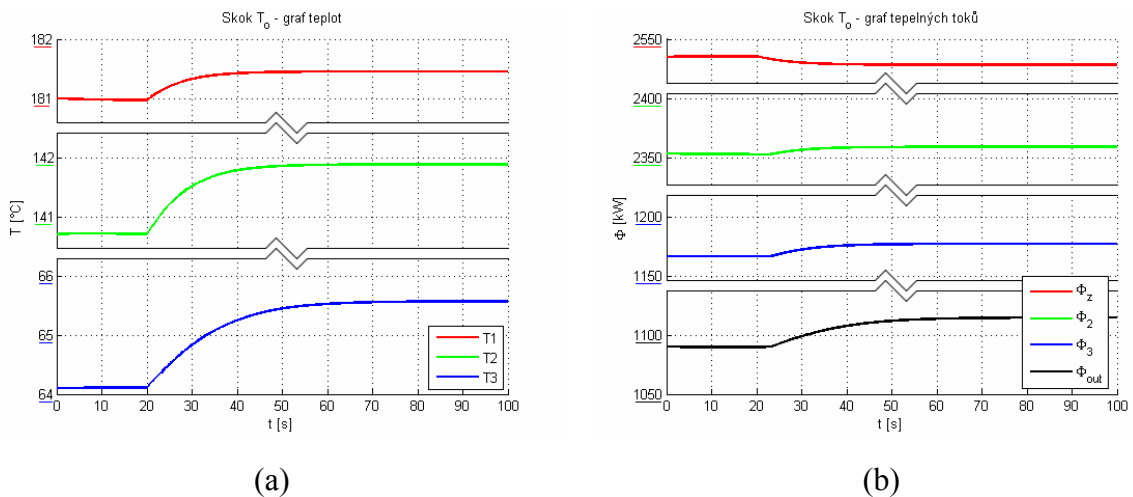
Obrázek 5.5: Odezva systému na skok vlhkosti škrobové kaše Hum_{st} – (a) teploty, (b) tepelné toky

Grafy na obrázku 5.5 potvrzují výše stanovené předpoklady. Po přivedení skoku došlo k poklesu teploty T_2 o 12,1 °C na 128,6 °C a T_3 klesla o 5,1 °C. na 59 °C. Teplota T_1 se nezměnila. Stejně zůstaly rovněž i tepelné toky Φ_z a Φ_2 , které jsou spojené se sekci 1, jenž není ovlivnitelná děním v sekci 2. Rovněž pozorujeme

pokles hodnot tepelných toků Φ_3 a Φ_{out} . To souhlasí s výše popsanou situací vypařování dodatečné vody.

5.5 Skok teploty okolí T_o

Jako poslední testovanou veličinu vezměme teplotu okolí T_o . Tato veličina patří také mezi poruchové veličiny. Z reálného světa očekáváme změny této teploty v průběhu dne a také v dlouhodobém pohledu v rámci střídání ročních období. Vesměs se však bude jednat o dlouhodobější změny. Přesto však v rámci testování provedme skokovou změnu této veličiny. A to z výchozí hodnoty, která činí $20\text{ }^\circ\text{C}$ a je určena pracovním bodem (viz Příloha C), na hodnotu $25\text{ }^\circ\text{C}$. Čas skokové změny t_{step} ponechme stejně jako v předchozích případech na 20 s .



Obrázek 5.6: Odezva systému na skok teploty okolí T_o – (a) teploty, (b) tepelné toky

Z grafů na obrázku 5.6 můžeme zjistit, že se teploty v příslušných sekcích po odeznění přechodového děje ustálily na hodnotách $T1 = 181,5\text{ }^\circ\text{C}$, $T2 = 141,9\text{ }^\circ\text{C}$ a $T3 = 65,6\text{ }^\circ\text{C}$. Což v porovnání s teplotami v pracovním bodě je zvýšení o $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ v případě sekce 1, o $1,2\text{ }^\circ\text{C}$ v sekci 2 a nakonec $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ v sekci 3. Změna je relativně malá, ale ve vztahu k poměrně velkým objemům materiálu procházejícího sušičkou ji nelze zanedbat. I v případě tepelných toků je změna nepatrná.

5.6 Shrnutí testů

Výsledek provedených testů ukazuje, že průběhy všech teplot i tepelných toků kvalitativně odpovídají reálné situaci a můžeme říci, že dostatečně přesně aproximují chování skutečného systému. Dalším laděním parametrů bychom jistě docílili ještě o něco lepších výsledků, avšak náplní této práce není pouze tvorba modelu soustavy. Žádné podstatné anomálie v chování testovacího schématu nejsou přítomny. Můžeme proto prohlásit, že struktura dynamického modelu postaveného na výkonových grafech je správná. Simulační schéma lze použít pro další fázi – návrh řídicího systému.

6 Řídicí systém

V této kapitole se zaměříme na analýzu klasického uspořádání řídicího systému průmyslové sušičky potravinářského škrobu. Dalším úkolem je návrh alternativního řídicího systému. Na základě doporučení vedoucího práce jsem z mnoha možných řešení vybral relativně jednoduché, leč poměrně účinné uspořádání řídicího systému, a to kaskádní zapojení regulátorů.

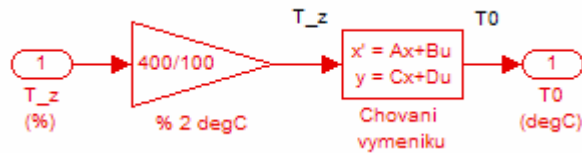
Jako řízený systém nyní s výhodou použijeme model reprezentovaný dříve navrženým simulačním schématem. Na tomto jednoduchém modelu ověříme funkci jednotlivých koncepcí řídicího systému.

Účelem řídicího systému je v případě sušičky udržovat stanovenou teplotu na výstupu. Tímto se dosahuje žádané vlhkosti vysušeného škrobu. Další účel řízení spočívá v maximalizaci množství vysušeného materiálu. Zmíněné dvě úlohy jsou v rozporu a není jednoduché dosáhnout obou cílů najednou. Východiskem je určitý kompromis. Zde se budeme primárně zabývat řízením výstupní teploty, tedy teploty v sekci 3.

Dříve než se pustíme do návrhu řídicího systému, musíme upravit simulační schéma tak, aby jej bylo možné pro řízení použít. Je tedy nutné vyvést řídicí, stavové a poruchové veličiny ze systému. V kapitole 5 jsme označili T_z a v_{ot} jako řídicí veličiny. Poruchové veličiny jsou T_{st} , Hum_{st} a T_o a nakonec stavové veličiny jsou $T1$, $T2$ a $T3$.

Další, co musíme přizpůsobit, jsou fyzikálních rozměry řídicích veličin. V praxi je obvyklé, že regulátory pracují v rozsahu 0 – 100 % velikosti řídicí veličiny. Má to svoje opodstatnění. Především odpadá starost o správnou reprezentaci fyzikálních rozměrů, navíc lze regulační zásahy snadno zobrazovat do jediného grafu. K transformaci fyzikálních rozměrů použijeme procesní omezení příslušných veličin, která jsou daná tabulkou v příloze (Příloha C). Do schématu vestavíme zesílení, jenž bude transformovat hodnotu akčního zásahu v procentech na příslušnou hodnotu řídicí veličiny.

Jako příklad je uvedeno zesílení pro transformaci rozměru teploty T_z , viz obrázek 6.1 dále.



Obrázek 6.1: Transformace teploty T_z

Maximální hodnota teploty T_z je v tomto případě 400 °C. K výpočtu hodnoty zesílení použijeme jednoduchý vztah:

$$g = \frac{p_{lim}}{100}, \quad (6.1)$$

kde g je hodnota zesílení, p_{lim} je procesní omezení dané veličiny a 100 jsou procenta.

Obdobný postup použijeme i při transformaci hodnoty v_{ot} . Ostatní veličiny ponecháme beze změn⁶. Takto upravené simulační schéma zapouzdříme do bloku podsystému, který nazveme *Starch dryer*.

6.1 PID regulátory

Co se týče druhu regulátorů, budeme používat tzv. PID regulátory. V případě řízení teploty v sekci 1 by bylo možné použít i PI regulátor, avšak v reálné situaci by byl s ohledem na větší složitost systému zvolen také PID regulátor. Jak je uvedeno v [2], tyto regulátory jsou tvořeny kombinací výrazů, které jsou proporciální, integrační a derivační vůči regulační odchylce. PID regulátory jsou široce používané v procesním průmyslu a robotice. Tvar kompletního PID regulátoru je popsán rovnicí jmenovitě,

$$D_c = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_I}{s} + k_D s, \quad (6.2)$$

nebo, ekvivalentně rovnicí často využívanou v procesním průmyslu, tedy

⁶ Jestliže budeme předpokládat, že do regulátorů budou vstupovat netransformované veličiny, pak bude nutné provést transformaci veličin i na straně výstupu regulátorů.

$$D_c = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right], \quad (6.3)$$

kde integrační časová konstanta T_I v sekundách a derivační časová konstanta T_D rovněž v sekundách mají fyzikální význam. Pak je pro operátora řádově snazší tyto konstanty nastavit a tím vyladit regulátor. Obě dvě výše zmíněné formy PID regulátoru se používají pro didaktické účely. Problém tkví v jejich realizovatelnosti. Obecně platí, že ideální derivátor nelze vytvořit. To je způsobeno nekauzálností přenosu derivátoru. V důsledku pak dochází k zesilování vysokofrekvenčních šumů. Navíc když e prodělá rychlou změnu (například jednotkový skok), derivativní složka vyletí prudce vzhůru, což vyústí v neúměrně velký regulační zásah. Obecně se problém nerealizovatelnosti derivátoru řeší pomocí filtrace. Místo ideálního derivátoru $D_{dif} = k_D s$ zavedeme

$$D_{dif} = k_D \frac{s}{\frac{k_D}{Nk_p} + 1}, \quad (6.4)$$

kde N bývá typicky od 10 do 20. Další vhodná úprava spočívá v tom, že budeme aplikovat derivační složku PID pouze na $y(s)$ – skutečnou procesní veličinu místo přímé aplikace na regulační odchylku. PID bude mít přenos ve tvaru

$$D_c = \frac{U(s)}{E(s)} + \frac{U(s)}{Y(s)} = \left[k_p + \frac{k_I}{s} \right] + \left[k_D \frac{s}{\frac{k_D}{Nk_p} s + 1} \right]. \quad (6.5)$$

V simulačních schématech bude uváděna úprava, která spočívá v zavedení

$$\tau_d = \frac{k_D}{Nk_p}. \quad (6.6)$$

Konstrukci určenou rovnicí (6.5) budeme implementovat v simulinkových schématech regulačních systémů.

6.2 Klasická koncepce řídicího systému

Jedná se o standardní jednosmyčkové řízení. Klasické pojetí řídicího systému se skládá ze dvou samostatných PID regulátorů. Pro lepší představu je k nahlédnutí obrázek D.1 v příloze (Příloha D). První regulátor řídí vstupní teplotu sušičky. Na základě měřené teploty na vstupu (pro nás teplota $T1$) ovládá ventil s přehřátou párou. V simulačním schématu toto aproximujeme přímým řízením teploty uvnitř výměníku. Druhý PID regulátor řídí výstupní teplotu (pro nás $T3$) tím, že ovládá rychlost motoru šnekového dopravníku. Proces regulace se odehrává bez znalosti stavu druhého regulátoru. Proto můžeme čekat, že tyto regulátory nebudou reagovat na změnu poruchových veličin koordinovaně. V určitém případě je pravděpodobné, že akční zásah jednoho regulátoru bude v saturaci, a přesto nebude dosaženo žádané hodnoty na výstupu soustavy. Více bude patrné v podkapitole 6.4, která se věnuje testování řídicího systému.

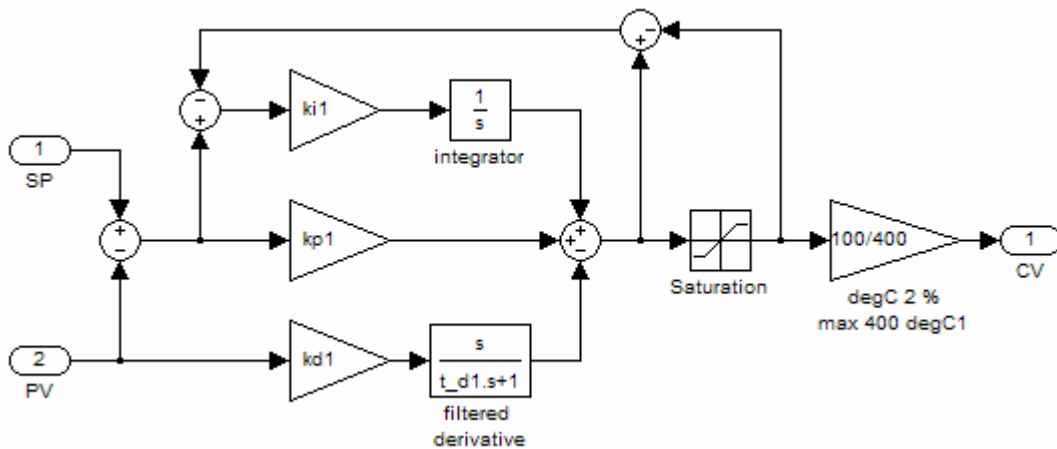
6.2.1 Sestavení řídicího systému

Parametry klasicky pojatého řídicího systému získáme pomocí empirické metody Ziegler-Nichols. Účinnost této metody bude pravděpodobně snížena vlivem dopravního zpoždění, proto můžeme jednotlivé složky regulátoru iteračně poopravit pro dosažení ještě lepší odezvy. Jak již bylo řečeno výše, použijeme k vyjádření PID regulátoru vztah (6.5). V simulinku pak bude takto definovaný PID regulátor vypadat stejně jako na obrázku 6.2.

Častým problémem řídicích systémů je tzv. windup jev. Jde o stav, kdy bez ohledu na to, že akční člen už dosáhl saturace⁷ u_{max} , integrační složka regulátoru i nadále pokračuje v integraci řídicí odchylky e a signál akčního zásahu u roste. Pokud saturace bude trvat dlouhou dobu, pak bude dlouho trvat, než se díky záporné řídicí odchylce e integrátor dostane do lineárního pásma, kde řízení není v saturaci. Výrazným způsobem je tak ovlivňován tvar odezvy, prodlužuje se reakce a zhoršuje se kvalita regulace. Z toho důvodu do simulačního schématu zabudujeme jako tzv. antiwindup obvod. Ten slouží k „vypnutí“ integrační složky regulátoru v případě dosažení saturačních hodnot akčního zásahu u_{max} na akčním členu. K tvorbě

⁷ Například omezení maximální rychlosti pohonu, maximální teploty páry atp.

uvedeného antiwindup obvodu použijeme saturace definované procesními omezeními pro v_{ot} a T_z z tabulky, viz Příloha C.



Obrázek 6.2: Simulační schéma PID regulátoru R_1 teploty T_1

Výše zmíněným způsobem sestavíme dva PID regulátory, zapouzdříme je do bloků podsystémů a poté je zapojíme podle schématu v příloze (Příloha D, obrázek D.1). Přehled nastavených parametrů obou regulátorů je uveden v tabulce 6.1.

Řízená veličina	Akční veličina	N	k_p	k_i	k_d
Regulátor 1					
T1 (°C)	T_z (%)	10	8,942	2,863	5,428
Regulátor 2					
T3 (°C)	v_{ot} (%)	15	0,203	0,014	0,743

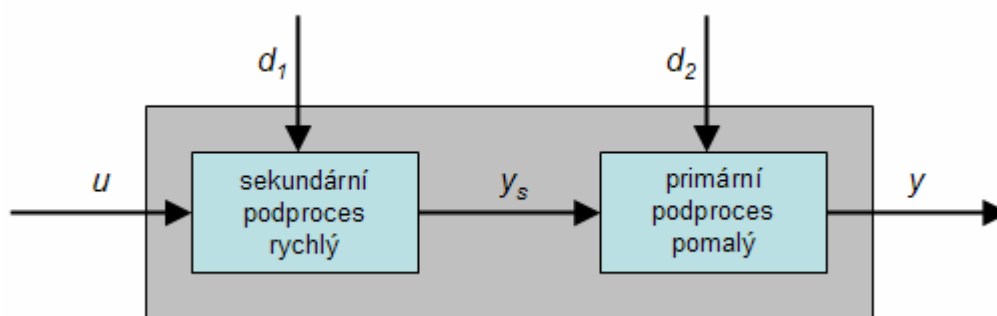
Tabulka 6.1: Parametry regulátorů – klasická koncepce řízení

V průmyslové praxi se klasické spojité regulátory již téměř nepoužívají. S nástupem počítačů je nahradily jejich diskrétní ekvivalenty tzv. PSD regulátory. Proto před případným nasazením do praxe by na tomto místě musela následovat diskretizace spojitých regulátorů. V našem demonstračním případě si vystačíme pouze se spojitými regulátory.

6.3 Navrhovaná koncepce řídicího systému

Z mnoha možných pojetí řídicího systému sušičky potravinářského škrobu jsme vybrali kaskádní regulaci spolu s dopřednou (feed forward) smyčkou. Přednosti kaskádní regulace jsou zmíněny níže.

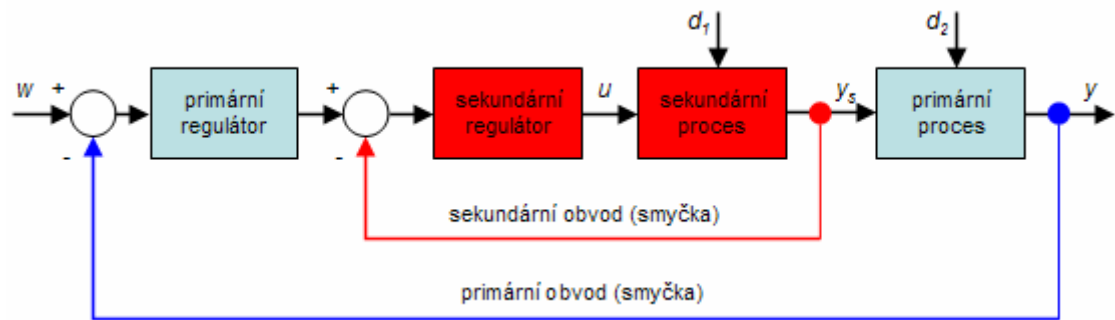
Kaskádní regulace podle [3] má určitá specifika. Je použitelné především tehdy, můžeme-li regulovaný proces rozdělit na dvě samostatné části – první část s rychlejší dynamikou a druhou část s pomalejší dynamikou nebo s dopravním zpožděním. Příklad takového systému je na obrázku 6.3. Základním předpokladem pro použití kaskádní regulace je, že můžeme měřit výstupy obou částí regulovaného procesu y_s a y . První část regulovaného procesu má menší časovou konstantu T , druhé část má v porovnání s první částí časovou konstantu větší. Poruchy d_1 a d_2 mohou působit na obě části.



Obrázek 6.3: Regulovaný proces vhodný pro kaskádní regulaci

Pro takový proces je možné použít klasický jednosmyčkový regulační obvod s PI regulátorem pro y jako regulovanou veličinu a u jako akční veličinu. Kaskádní uspořádání však způsobí podstatně rychlejší a kvalitnější potlačení vlivu poruch působících na jednu nebo obě části procesu podle obrázku 6.3. Jednoduše řečeno, v kaskádní regulaci využijeme obě měřené veličiny jednoho procesu, což představuje více informací než při klasické regulaci. Použití více informací se projeví ve zlepšení kvality regulace. V některých případech to je více než desetinásobně menší přeregulování při kompenzaci poruchy a více než třikrát kratší doba ustálení oproti klasické jednosmyčkové regulaci.

Kaskádní obvod současně tvoří dvě smyčky: vnější, také primární nebo hlavní (*outer loop*) smyčka a vnitřní, také sekundární nebo pomocná (*inner loop*). Zjednodušené blokové schéma kaskádní regulace je na obrázku 6.4.



Obrázek 6.4: Uspořádání smyček pro kaskádní regulaci

Základní výhody kaskádní regulace oproti klasické jednosmyčkové regulaci jsou tři.

- První výhodou je, že poruchu, která působí na sekundární proces, potlačí sekundární regulátor před tím, než začne ovlivňovat primární proces. Účinek na primární regulovanou veličinu tak bude minimální.
- Druhou výhodou je, že se urychlí reakce sekundárního procesu. To je výhodné v případě přítomnosti dopravního zpoždění.
- Třetí výhodou je, že sekundární regulátor tlumí vliv změny zesílení sekundárního procesu a tak zlepšuje celkovou robustnost regulace.

Je rovněž vhodné, je-li sekundární smyčka rychlejší než primární. Poměr doby odezvy v primární smyčce ku době ustálení v sekundární smyčce má být přinejmenším 5.

Jedna z možných koncepcí kaskádního řídicího systému aplikovaného na sušičku škrobu se skládá ze tří PID regulátorů, z nichž dva jsou zapojeny do kaskády. Jak je uvedeno výše, je nutné řízený proces sušení škrobu rozdělit na dva podprocesy ideálně s určitými charakteristickými vlastnostmi. V našem případě se řešení přímo nabízí. Jako hlavní proces s relativně pomalou dynamikou a přítomným dopravním zpožděním zvolme řízení teploty T_3 ovládním množství vstupujícího škrobu do soustavy, řízení bude zajišťovat regulátor R_{prim} . Sekundární proces s poměrně rychlejší dynamikou bude pak řízení teploty T_1 prostřednictvím ovládním ventilu přívodu páry do výměníku. Tento proces bude řízen regulátorem R_{sec} . Dále zavedme třetí regulátor R_{aux} , který bude dopomáhat regulovat hlavní proces. Nakonec přidejme dopřednou smyčku rychlosti otáčení šnekového dopravníku v_{ot} . Schéma zapojení je v příloze (Příloha D, obrázek D.2). Můžeme očekávat, že se přidaná informace

v řízení pozitivně projeví na kvalitě regulace. Doba ustálení v takto řízeném systému by měla být lepší, než v případě klasického řídicího systému.

6.3.1 Sestavení řídicího systému

V této fázi můžeme použít již navržené bloky regulátorů z kapitoly 6.2.1. Konstrukce PID regulátorů bude naprosto stejná. Co se však bude lišit, je nastavení jejich zesílení k_p , k_I a k_d .

V případě navrhovaného řídicího systému použijeme pro nastavení regulátorů rovněž empirického upravování jednotlivých složek regulátorů. Navíc však využijeme obecná pravidla pro nastavení parametrů regulátorů v kaskádním zapojení podle [4]:

- a) Seřizovat začínáme vnitřní smyčku. Vnitřní smyčka musí být dostatečně rychlá, takže se používá zpravidla P nebo PI regulátor. Seřízení je možno provést ručně. Překmit maximálně 5%.
- b) Je-li vnitřní smyčka seřizena, začínáme se seřizováním vnější smyčky. Používá se zpravidla PI nebo PID regulátor. Seřízení může být provedeno ručně.
- c) Seřízení je možno řešit jako optimalizační úlohu, tak aby byla respektována omezení na akční veličině.

Přepínání obou regulátorů na automatický režim činnosti má přesné pořadí, jeho dodržení se vyhneme zbytečným nárazům. Podle [3] je vhodné přepnutí provádět postupně v následujících krocích (ze stavu, kdy jsou oba regulátory v manuálním režimu):

- a) Nastavit žádanou hodnotu sekundárního regulátoru na y_s (regulovaná veličina sekundárního procesu, viz obrázek 6.4).
- b) Přepnout sekundární regulátor do automatického režimu s interní žádanou hodnotou z bodu 1.
- c) Nastavit primární regulátor tak, že jeho žádaná hodnota bude rovna y a jeho akční veličina bude rovna žádané hodnotě sekundárního obvodu.
- d) Zaměnit interní žádanou hodnotu sekundárního regulátoru za externí žádanou hodnotu.

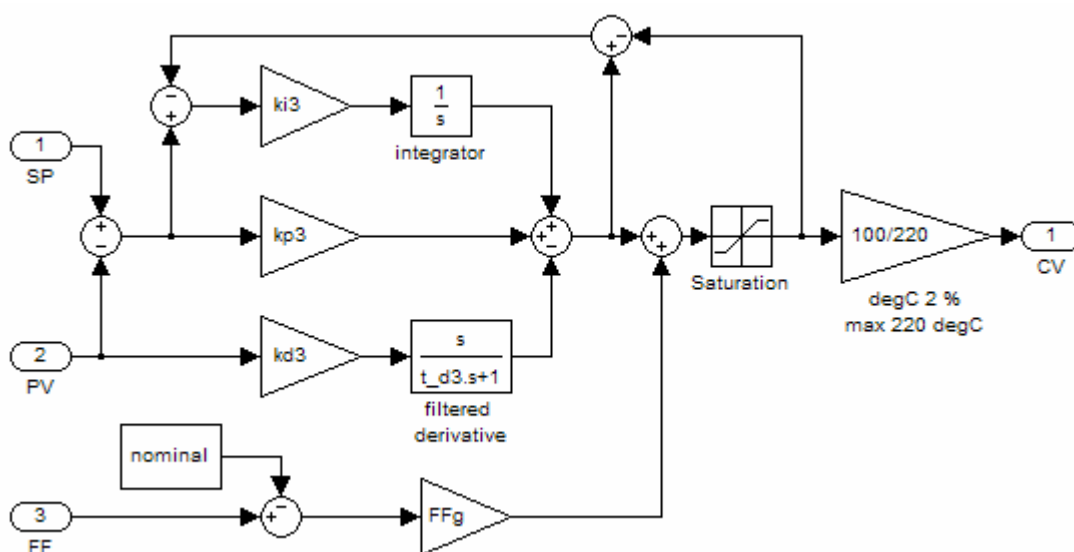
e) Přepnout primární regulátor do automatického režimu.

Poté, co regulátory zapouzdříme do bloků podsystému, je zapojíme do simulinkového modelu sušičky škrobu. Využijeme k tomu schéma v příloze (Příloha D, obrázek D.2). Dále pomocí výše uvedených postupů provedeme vyladění všech tří regulátorů. Přehled nastavených parametrů všech tří regulátorů je uveden v tabulce 6.2.

Řízená veličina	Akční veličina	N	k_p	k_i	k_d
Regulátor 1					
T1 (°C)	T_z (%)	10	3,229	1,310	2,971
Regulátor 2					
T3 (°C)	v_ot (%)	18	0,140	0,010	0,521
Regulátor 3 (primární regulátor)					
T3 (°C)	T1(%)	10	0,160	0,031	0,386

Tabulka 6.2: Parametry regulátorů – navrhovaná koncepce řízení

Smyčku FF sestavíme z konstanty, která bude sloužit jako nominální hodnota, a ze zesílení, které bude upravovat účinek FF na regulátor potažmo na odezvu. Proměnná, kterou jsme použili jako vstup FF, je rychlost otáčení šnekového dopravníku v_{ot} .



Obrázek 6.5: Schéma zapojení regulátoru R_{prim} a FF smyčky

Celé zapojení FF smyčky je uvedeno na obrázku 6.5 výše. Nastavené parametry FF smyčky jsou $FFg = -0,1$ a $nominal = 42 \%$.

Obdobně jako v kapitole 6.2 musíme konstatovat, že pro použití v praxi by bylo nutné získané regulátory diskretizovat.

6.4 Testování řídicích systémů

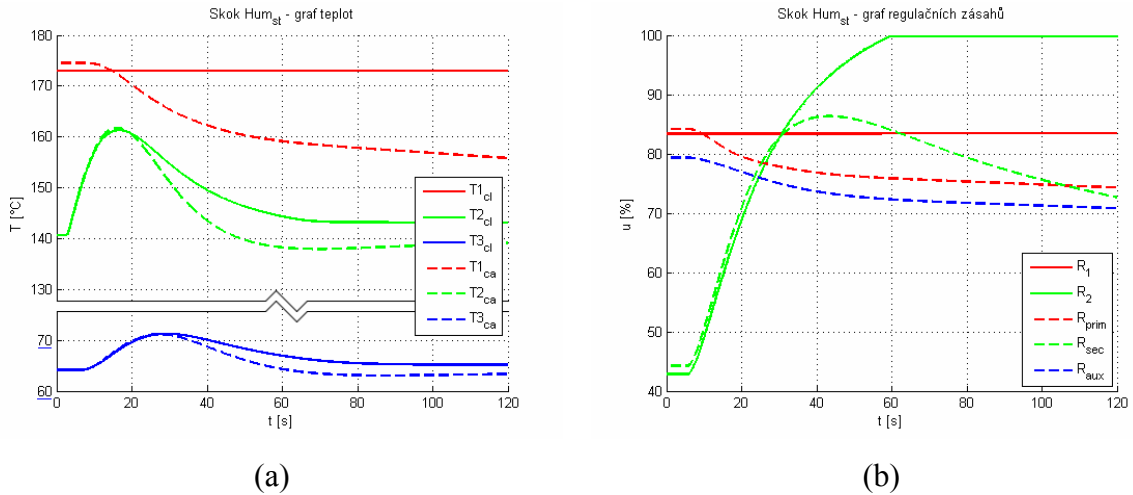
Chování řídicích systémů budeme sledovat především během přechodových dějů vyvolaných skokovou změnou jedné z poruchových veličin T_{st} , Hum_{st} a T_o . Zajímat nás budou rovněž průběhy stavových veličin, tedy teplot $T1$, $T2$ a $T3$, a akčních zásahů příslušných regulátorů. Do grafů vyneseme reakce obou řídicích systémů a budeme porovnávat případné rozdílnosti zobrazených průběhů. Plnou čarou budou znázorněny průběhy veličin klasické regulace, čárkovanou čarou budou znázorněny průběhy veličin kaskádní regulace. Navíc se podíváme, jaký vliv bude mít na chování systému změna parametrů FF smyčky.

Jako výchozí hodnotu žádané veličiny zvolíme $T3$ v pracovním bodě. I ostatní parametry ponechme na hodnotách odpovídajících pracovnímu bodu, viz Příloha C. K nastavení parametrů systému použijeme skript velmi podobný skriptu použitému v kapitole 5.1, jsou zde však určité odlišnosti. Zájemci si mohou tento skript vyhledat na přiloženém CD.

6.4.1 Skok vlhkosti škrobové kaše Hum_{st}

V této podkapitole ověříme reakci řídicích systémů na skok vlhkosti škrobové kaše Hum_{st} . Na rozdíl od kapitoly 5.4 se bude jednat o změnu hodnot Hum_{st} z počátečních 30% a koncových 12%. Čas změny bude v počátku, tedy $t_{step} = 0$ s. V praxi tato změna nebude tak velká. Pokud přece jen dojde k takto výrazné změně hodnoty vlhkosti škrobové kaše, je pravděpodobné, že vlivem otáčení šnekového dopravníku se materiál ještě před vstupem do sušící trubice promíchá. Potom přechod nebude tak ostrý. Nicméně jedná se o extrémní případ, který může nastat. Zároveň nám tato modelová situace poslouží jako ukázka hlavního nedostatku klasického řídicího systému.

Předpokládáme, že pro potlačení poruchy nebude stačit akční zásah regulátoru ovládajícího rychlost otáčení šnekového dopravníku. Na akčním členu bude dosaženo saturace.



Obrázek 6.6: Odezva systému na skok Hum_{st} – (a) teploty, (b) regulační zásahy

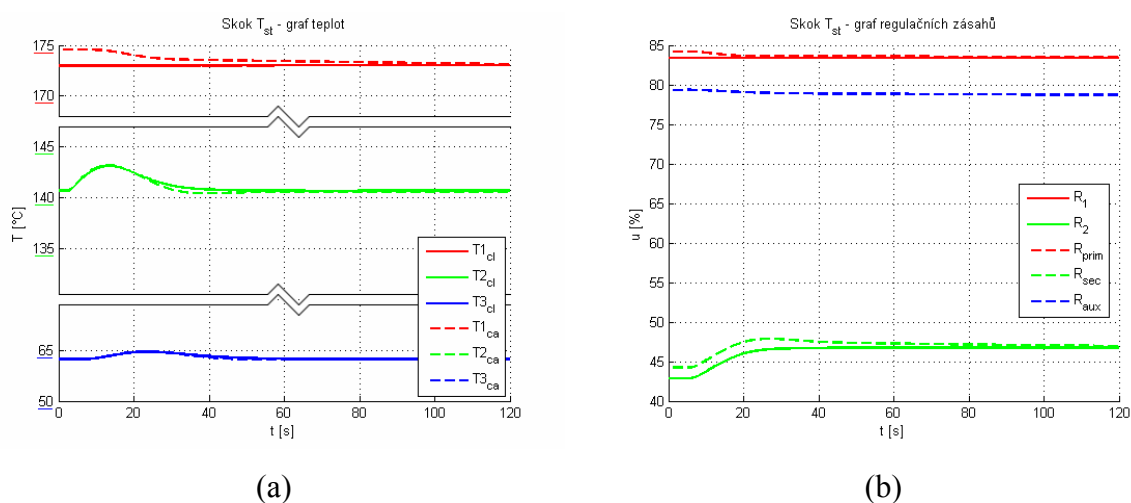
Z grafů na obrázku 6.6 můžeme vidět, jak na klasiky řízené soustavě skutečně došlo k saturování akčního členu šnekového dopravníku. To mělo za následek, že se hodnota teploty $T3$ ustálila na 65,15 °C, tedy mimo pracovní bod. Na rozdíl od tohoto kaskádně řízený systém potvrdil svoji hlavní přednost – koordinované chování regulátorů. Zároveň s růstem regulačního zásahu regulátoru R_{aux} se zmenšily regulační zásahy regulátorů R_{prim} a R_{sec} , tím se nedostal motor šnekového dopravníku do saturace, což mělo ve výsledku pozitivní vliv na dodržení SP teploty $T3$. Dále můžeme vidět, že FF bude postupně vyšší míru produkce snižovat na nominální hodnotu. Je otázkou, zda jde o pozitivní či negativní jev. V praxi předpokládejme snahu o maximalizování produkce do určité míry⁸, tedy pozorované chování není úplně vyhovující.

6.4.2 Skok teploty škrobové kaše T_{st}

Jako další budeme pozorovat, jakým způsobem řídicí systémy vykompenzují skokovou změnu teploty škrobové kaše T_{st} . Výchozí hodnota T_{st} bude rovna 20 °C.

⁸ Rozumí se zvyšování produkce tak, aby dodavatelské i navazující technologické celky mohly plnit svoji funkci bez zbytečného hromadění materiálu

Změnu vyvoláme v počátku, tedy v čase $t_{step} = 0$ s. Díky tomu bude možné sledovat přítomnost dopravního zpoždění. Konečná hodnota T_{st} bude 30 °C .



Obrázek 6.7: Odezva systému na skok T_{st} – (a) teploty, (b) regulační zásahy

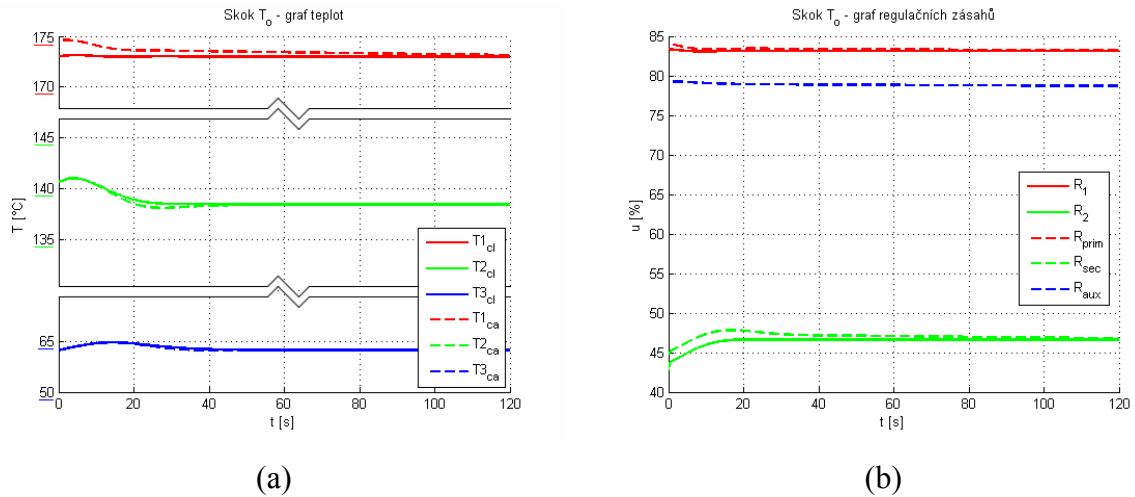
Z grafů na obrázku 6.7 je vidět, že oba dva systémy mají v podstatě stejnou délku odezvy. Regulační zásah regulátoru R_{aux} kaskádního řídicího systému má nepatrný překmit na rozdíl od odpovídajícího regulačního zásahu klasického řídicího systému, který je bez překmitu. Kmitání akčního zásahu by v praxi působilo nadměrné mechanické a elektrické namáhání akčního členu a tedy snížení jeho životnosti. Řešením je zavedení vzorkování výstupu R_{aux} , čímž by se opotřebení akčního členu (v tomto případě motoru) snížilo.

6.4.3 Skok teploty okolí T_o

Poslední ze všech tří poruchových veličin je teplota okolí T_o . Jak již bylo řečeno v kapitole 5.5, změny hodnot této veličiny budou spíše dlouhodobějšího charakteru. Přesto je vhodné ověřit si, jakým způsobem budou na případné výkyvy této veličiny reagovat řídicí systémy. Jako modelový případ vezmeme skokovou změnu T_o z výchozích 20 °C na koncových 25 °C . Čas skoku $t_{step} = 0$ s.

Z grafů na obrázku 6.8 níže vidíme, že kaskádní řídicí systém rychleji vykompenzuje poruchu a tím se celá soustava dostane rychleji do ustáleného stavu. Je vidět, že regulační zásah regulátoru R_{aux} má překmit. Následky z toho plynoucí jsou stejné jak v předchozí podkapitole.

Lze také pozorovat, jak regulátory pracují koordinovaně. Zvýšení teploty okolí T_o má za následek, že se o něco sníží tepelné ztráty. V návaznosti na to není potřeba tolik „topit“, aby bylo dosaženo SP na výstupu. Změna teploty $T1$ je v případě kaskádního řídicího systému výraznější, protože regulátor R_{prim} promítně do akčního zásahu pokles tepelných ztrát ve všech třech sekcích, kdežto regulátor R_2 klasického řídicího systému reaguje pouze na změnu poměrů v sekci 1.



Obrázek 6.8: Odezva systému na skok T_o – (a) teploty, (b) regulační zásahy

6.4.4 Ověření vlivu FF na tvar odezvy

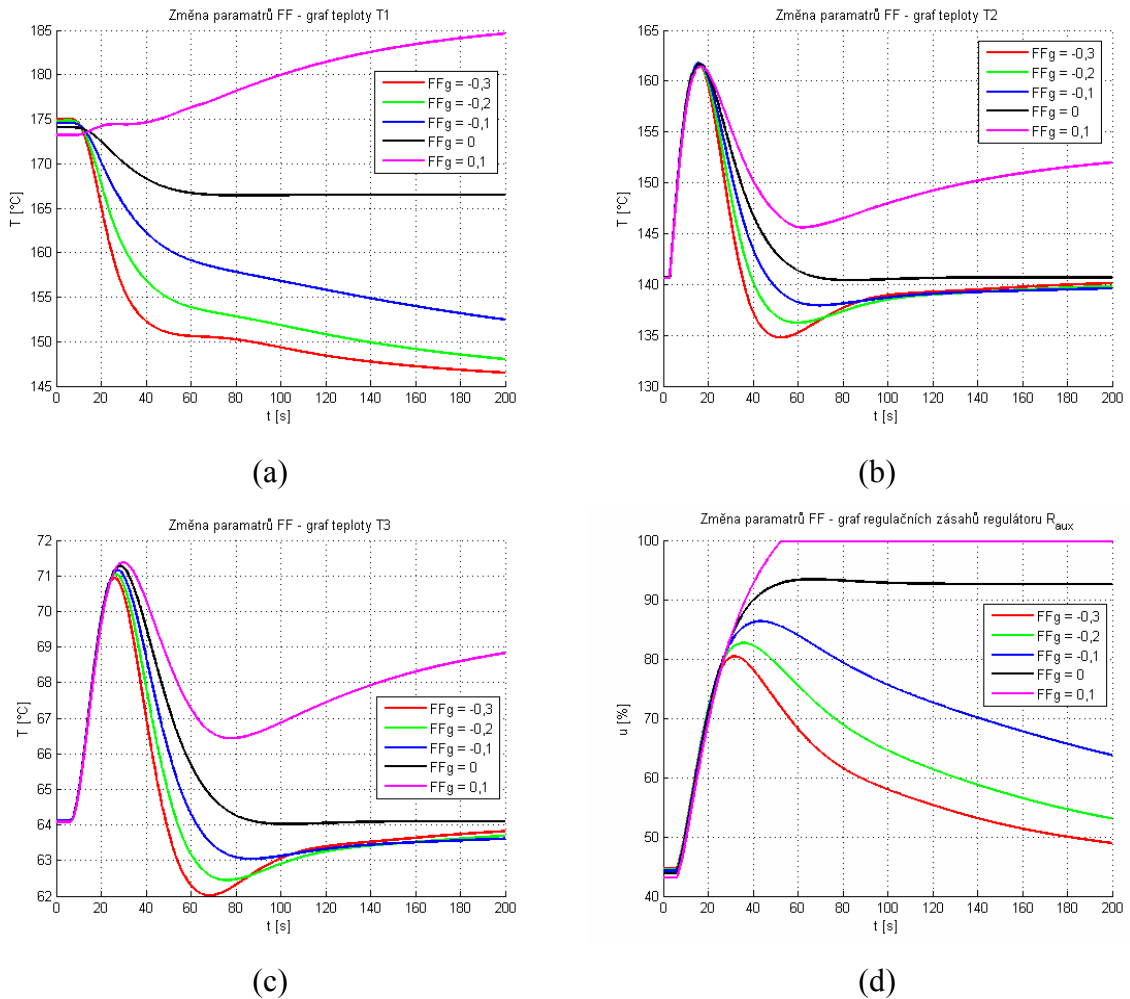
Nyní se podíváme, jakým způsobem ovlivňují parametry FF smyčky tvar odezev systému. Vezměme například skok Hum_{st} z podkapitoly 6.4.1. Jak bylo naznačeno v kapitole 6.3.1, FF smyčka má dva parametry. Nominální hodnotu vstupní veličiny a konstantu úměrnosti (zesílení FFg).

Vliv nominální hodnoty je na první pohled patrný. FF smyčka bude upravovat akční zásah regulátoru R_{prim} tak, aby se akční zásah regulátoru R_{aux} přibližoval nominální hodnotě. To bude ve výsledku znamenat snižování produkce v případě podobnému skokové změně Hum_{st} .

Vliv hodnoty zesílení FFg je patrný z grafů na obrázku 6.9. Zde jsme měnili hodnotu zesílení FFg v rozsahu od -0,3 do 0,1 s krokem 0,1. Je vidět, že záporné hodnoty FFg soustavu stabilizují. Na regulačním zásahu R_{aux} (viz obrázek 6.9 (d)) můžeme pozorovat, jak se pro tyto hodnoty časové průběhy přibližují nominální hodnotě, která je v našem případě nastavena na 42 %. Avšak příliš nízké hodnoty zesílení FFg způsobují zakmitávání teploty $T2$ a $T3$, viz obrázek 6.9 (b) a (c),

hodnoty $FFg = -0,3$ a $-0,2$. Nulová hodnota FFg znamená odpojenou FF smyčku, pro toto zesílení je systém také stabilní. Nestabilita se začíná projevovat pro $FFg > 0$, kdy bude FF smyčka vždy zvětšovat regulační zásah R_{prim} a v důsledku i regulační zásah ostatních regulátorů, dokud nebude dosaženo jejich saturací.

Dále si můžeme povšimnout, že FF smyčka pro záporné hodnoty parametru FFg nepatrně snižuje překmit teploty $T3$. Pro kladné hodnoty FFg jej zvětšuje.



Obrázek 6.9: Vliv různých nastavení parametrů FF na tvar odezvy systému
 (a) teplota T1, (b) teplota T2, (c) teplota T3, (d) regulační zásahy regulátoru R_{aux}

Pro vizualizaci vlivu parametru FFg na tvar průběhů regulačních zásahů jsme vybrali pouze případ regulátoru R_{aux} , protože regulační zásahy ostatních regulátorů nebyly tak názorné.

7 Porovnání řídicích systémů

Z testů provedených v předcházející kapitole vyplývá, že použití kaskádního řídicího systému přináší nepatrné zrychlení odezev systému, nicméně za cenu překmitů regulačních zásahů na akčním členu šnekového dopravníku.

Výhodou kaskádního řídicího systému je, že výrazně omezuje možnost vzniku saturace během výrazných změn vlhkosti přiváděné škrobové kaše. Při použití sofistikovanější metody výpočtu parametrů regulátoru by se pravděpodobně dalo docílit ještě určitého zlepšení.

Nevýhodou kaskádního řídicího systému je více kmitavé chování, které by mělo vliv na životnost pohonu šnekového dopravníku. Další nevýhodou je také to, že v případě jeho použití přicházíme o možnost regulovat přímo teplotu $T1$.

Rovněž se ukázalo, že vliv FF smyčky na kvalitu řízení je spíše negativní. FF smyčka přidává do systému zakmitávání teplot $T2$ a $T3$ a tím zhoršuje kvalitu regulace. Nastavení kladného parametru FFg dokonce systém destabilizuje. Proto dospíváme k závěru, že použití FF smyčky jako součásti kaskádního řízení v tomto případě není vhodné.

Oproti tomu klasický řídicí systém vykazoval relativně dobré výsledky s ohledem na jeho hlavní nevýhodu, kterou je nekoordinovanost řízení.

Nicméně hlavní problém u obou regulačních systémů (tj. klasického i navrhovaného kaskádního) přetrvává. Tím je výrazný překmit teploty $T3$, který by v praxi mohl za určitých podmínek způsobit přesušení materiálu a tím by mohl vytvořit podmínky pro jeho explozi.

8 Závěr

Tato práce se zabývala návrhem řídicího systému pro průmyslovou sušičku potravinářského škrobu. Aby bylo možné vůbec řídicí systém navrhnout, bylo nutné se v první části práce věnovat popisu technologického zařízení sušičky škrobu. Součástí uvedeného popisu byla dekompozice soustavy na logicky na sebe navazující celky – sekce, viz kapitola 3.

Na základě tohoto popisu byla v následující kapitole provedena analýza funkce soustavy. Zároveň byly dále díky získané znalosti principu zařízení sestaveny výkonové grafy modelující jednotlivé části sušičky. Důvod použití výkonových grafů je, že z těchto grafů lze poměrně snadno sestavit simulační schéma.

Tvorbě simulačního schématu je vyhrazena kapitola 4. Hlavním problémem byla v této části neznalost přesných vztahů mezi jednotlivými veličinami. Proto jsou tyto vztahy určeny z větší části intuitivně tak, aby bylo dosaženo výstupů podobných realitě. Správnost výkonových grafů a potažmo správnost chování získaného simulačního schématu je ověřena v kapitole 5 provedením série testů. Prvním základním testem je nalezení pracovního bodu při určitých vstupních podmínkách, pak následují testy odezev na skokovou změnu veličin, jmenovitě T_z , v_{ob} , T_{st} , Hum_{st} , T_o . V testech lze pozorovat vliv dopravního zpoždění. Všechny testy skončily uspokojivým výsledkem. Proto bylo v další kapitole přistoupeno k návrhu řídicího systému.

V kapitole 6 je nastíněn výběr řešení. Zvolené koncepce řídicího systému jsou klasická a alternativní s kaskádním zapojením regulátorů. Dále je zde krátce zmíněn účel řídicího systému a jeho samotné provedení s použitím PID regulátorů. Poté jsou popisována jednotlivá řešení. Následuje sestavení simulačních schémat příslušných řídicích systémů a jejich testování.

Závěrem lze říci, že alternativní kaskádní řídicí systém nesplnil většinu požadavků na regulaci, a proto by jeho nasazení v praxi mnoho výhod ve srovnání se standardním řídicím systémem nepřineslo.

Tuto práci a její výsledky lze použít jako podklad pro další analýzu procesu a návrh jiných algoritmů řízení, například algoritmů prediktivní regulace pracující s modelem řízeného systému.

Literatura

A Knižní publikace a elektronické materiály

- [1] HORÁČEK, P., (2000) *Systémy a modely*, Vydavatelství ČVUT, Praha
- [2] FRANKLIN, G. F., Powell, J. D., Emami-Naeini, A., (2006) *Feedback Control of Dynamic Systems*. Pearson Education, Inc., New Jersey
- [3] KLÁN, P., *Metody zlepšení PI regulace*, (2001) *Automa*, číslo 12
- [4] MODRÁK, O., *Regulační systémy v mechatronice - Rozvětvené regulační obvody - studijní materiály*, (2007) Technická Univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Katedra řídicí techniky
- [5] PRVULOVIC, S., Tolmac, D. a Lambic M., (2007) *Convection Drying in the Food Industry*. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Invited Overview, No. 9. Vol. IX.

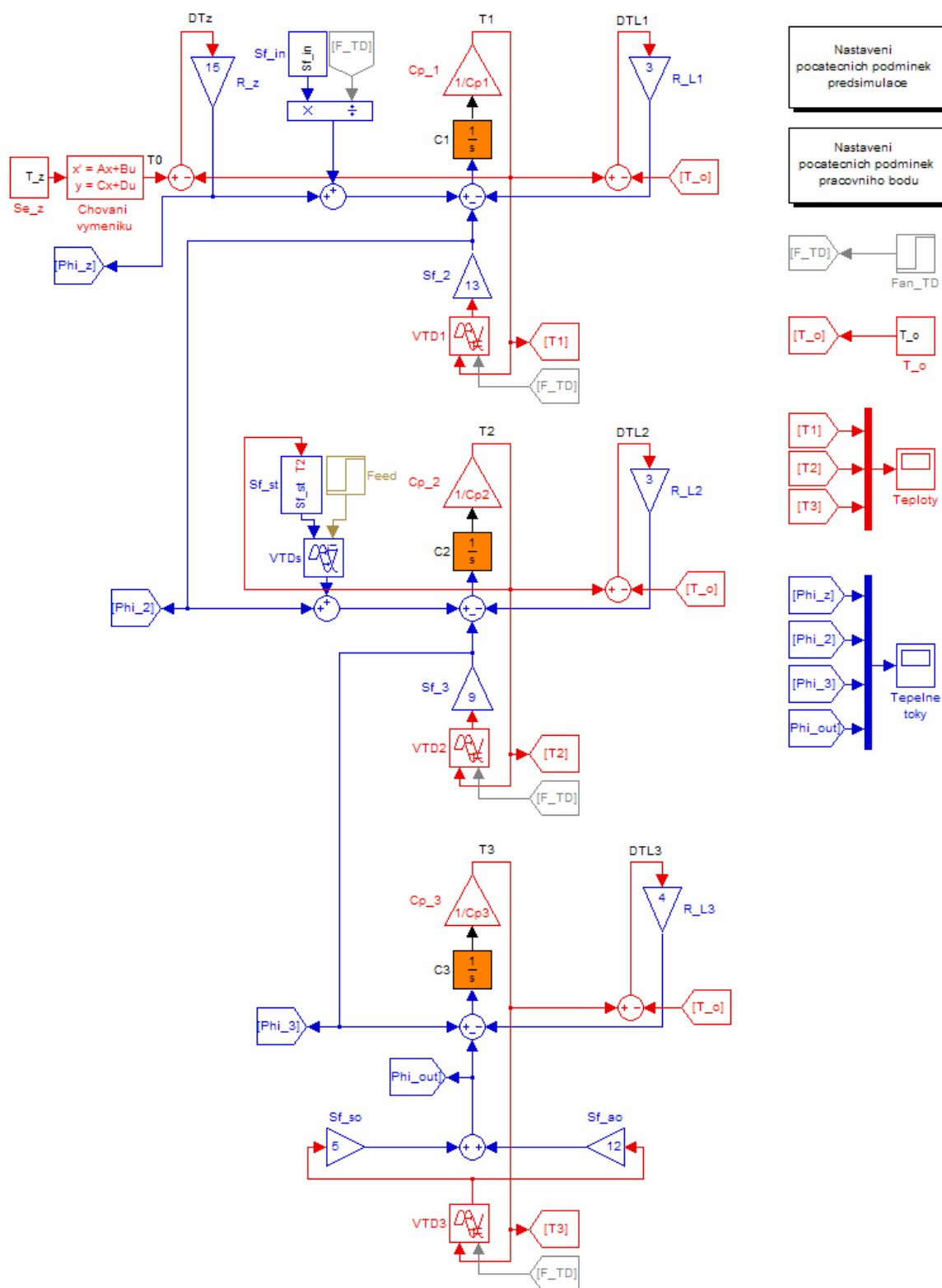
B Internetové stránky

- [6] BORUCH, M., BRZEZIŃSKI, S., PALŁKA, A. PIERZGLASKI, T., *The Automatic Control of Starch Drying Process*, Technical University, Institute of Chemical Technology of Food, Łódź, (1981), [online]. Dostupné na: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/113432349/ABSTRACT?CRETRY=1&SRETRY=0>
- [7] CHAPLIN, M., *Water Structure and Science*, London South Bank University Dostupné na <http://www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html>
- [8] WHALES, J, *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. (2001), poslední aktualizace: 14. 4. 2008. Dostupné na www.wikipedia.org

C Seznam použitého software

- [9] *20-sim* [počítačový program]. Ver. 4.0.1.3. Controllab Products B.V., 2008
- [10] *Adobe Acrobat* [počítačový program]. Ver. 7.0. Adobe systems, Inc., 2004
- [11] *Adobe Photoshop CS2* [počítačový program]. Ver. 9.0. Adobe systems, Inc., 2005
- [12] *MATLAB* [počítačový program]. Ver. 7.3.0 (R2006b). The MathWorks, Inc., 2005
- [13] *Microsoft Office 2003* [počítačový program]. Ver. 11.6568.6568. Microsoft Corporation, 2003.
- [14] *Simulink* [počítačový program]. Ver. 6.5., The MathWorks, Inc. 2006

Příloha A – Simulační schéma soustavy



Obrázek A.1: Simulační schéma soustavy

Příloha B – Skripty pro Matlab

Skript „Chování výměníku“

```
% Skript pro návrh systému prvního řádu - Chování výměníku  
% (kvůli počátečním podmínkám)
```

```
% časová konstanta
```

```
tau = 1;
```

```
Num = 1;
```

```
Den = [1 1/tau];
```

```
% matice systému
```

```
[A B C D] = tf2ss(Num,Den);
```

Skript pro nastavení počátečních podmínek předsimulace

```
% Konfiguraci skript - nastavení počátečních podmínek pro  
předsimulaci
```

```
% teplota prostředí uvnitř továrny
```

```
T_o=20;
```

```
% čas skoku
```

```
t_step = 100;
```

```
% počáteční podmínky teploty ve výměníku
```

```
T_z_init = 20;
```

```
% tepelné kapacity
```

```
Cp1 = 270;
```

```
Cp2 = 135;
```

```
Cp3 = 243;
```

```
% počáteční podmínky integrátoru
```

```
C1_init = 20 * Cp1;
```

```
C2_init = 20 * Cp2;
```

```
C3_init = 20 * Cp3;
```

```
% počáteční podmínky dopravních zpoždění
```

```
VTD1_init = 20;
```

```
VTD2_init = 20;
```

```
VTD3_init = 20;
```

```
VTDS_init = 0;
```

```
disp('Inicializace předsimulace dokončena');
```

Skript nastavení počátečních podmínek pracovního bodu

```
% Konfiguraci skript - nastavení počátečních podmínek pro pracovní  
bod
```

```
% teplota prostředí uvnitř továrny
```

```
T_o=20;
```



```
T_o_final = 30;

% cas skoku
t_step = 20;

% pocatecni podminky teploty ve vymeniku
T_z_init = 350;

% pocatecni rychlost posuvu
v_ot_init = -2.52;

% tepelne kapacity
Cp1 = 270;
Cp2 = 135;
Cp3 = 243;

% pocatecni podminky integratoru
C1_init = 181 * Cp1;
C2_init = 140.7 * Cp2;
C3_init = 64.1 * Cp3;

% pocatecni podminky dopravnich zpozdeni
VTD1_init = 181;
VTD2_init = 140.7;
VTD3_init = 64.1;
VTDs_init = -724;

disp('Inicializace pracovniho bodu dokoncena');
```

Příloha C – Parametry systému

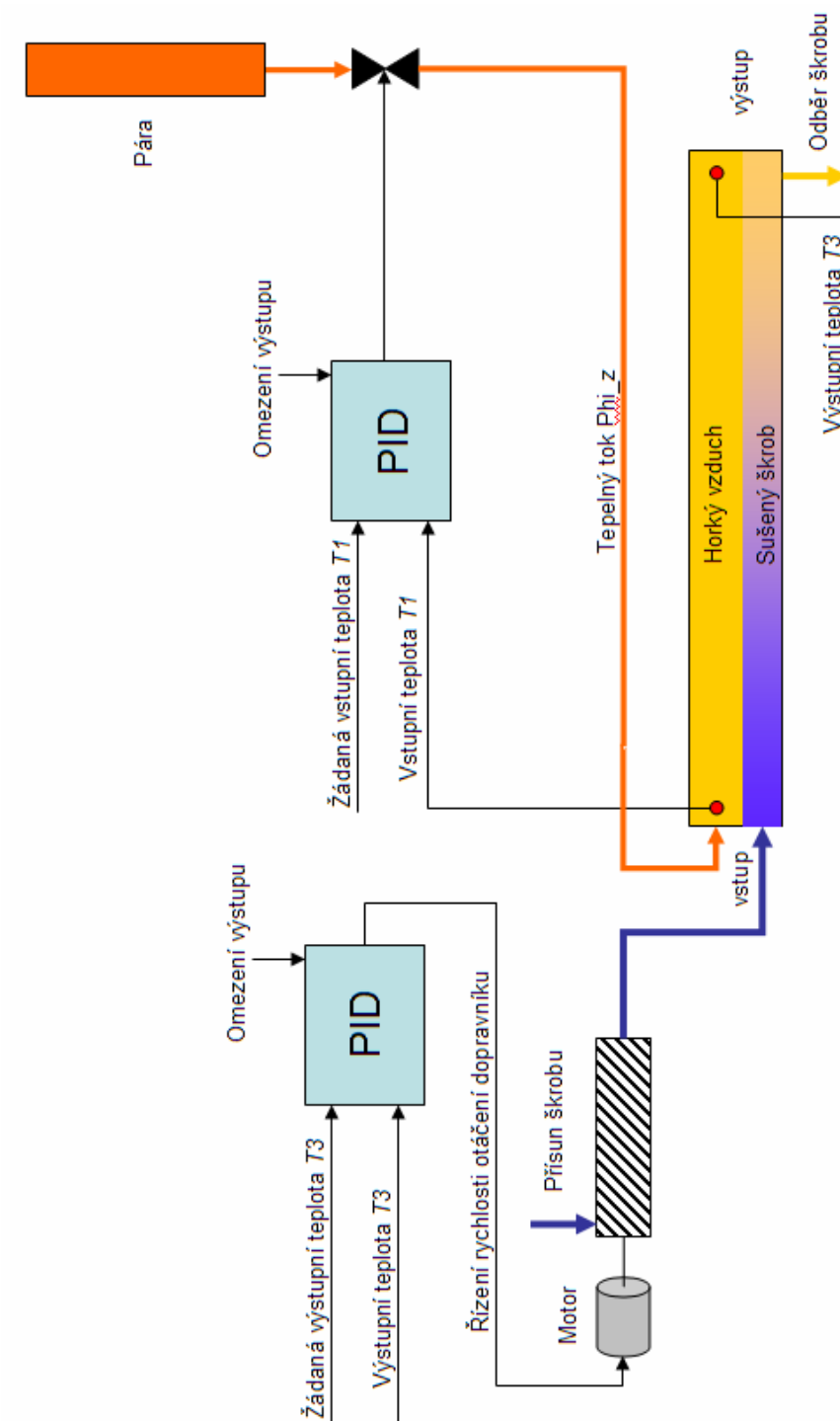
Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka	Procesní omezení		Fyzikální omezení	
				Min	Max	Min	Max
Vstupní manipulovatelné veličiny							
Teplota páry	T_z	350	°C	200	450	100	500
Rychlost otáčení šnek. dopravníku	v_ot	2,5	ot/min	0	5	0	5
Dopravní zpoždění – ventilátor	Fan_TD	3	s	3	10	3	inf
Vstupní nemanipulovatelné veličiny							
Tepelný tok nasávaného vzduchu	Sf_in	300		100	400	0	500
Vstupní poruchové veličiny							
Vlhkost škrobu	Hum_st	30	%	20	50	0	100
Teplota škrobu	T_st	20	°C	10	40	4	90
Teplota prostředí uvnitř továrny	T_o	20	°C	15	25	-25	50
Výstupní měřené veličiny – hodnoty pro pracovní bod							
Teplota v sekci 1	T1	181,0	°C	120	250	To	300
Teplota v sekci 2	T2	140,7	°C	70	200	To	300
Teplota v sekci 3	T3	64,1	°C	30	150	To	300
Stavové měřitelné veličiny (měřené veličiny jsou zvýrazněny, hodnoty platí pro pracovní bod)							
Teplota ve výměníku	T_z	---	°C	200	400	100	450
Teplota v sekci 1	T1	181,0	°C	150	220	To	300
Teplota v sekci 2	T2	140,7	°C	100	180	To	200
Teplota v sekci 3	T3	64,1	°C	50	70	To	100
Ostatní parametry systému							
Tepelná kapacita sekce 1	Cp_1	270	Jkg ⁻¹ K ⁻¹	---	---	---	---
Tepelná kapacita sekce 2	Cp_2	135	Jkg ⁻¹ K ⁻¹	---	---	---	---
Tepelná kapacita sekce 3	Cp_3	243	Jkg ⁻¹ K ⁻¹	---	---	---	---
Tepelný odpor stěn sekce 1	R_L1	3	Wm ⁻¹ K ⁻¹	---	---	---	---
Tepelný odpor stěn sekce 2	R_L2	2	Wm ⁻¹ K ⁻¹	---	---	---	---
Tepelný odpor stěn sekce 3	R_L3	3	Wm ⁻¹ K ⁻¹	---	---	---	---
Tepelný odpor stěny výměníku	R_z	15	Wm ⁻¹ K ⁻¹	---	---	---	---
Tepelný tok škrobu	Sf_st	~T2 ⁹		---	---	---	---
Tepelný tok do sekce 2	Sf_2	10		---	---	---	---
Tepelný tok do sekce 3	Sf_3	9		---	---	---	---
Tepelný tok škrobu a výstupu	Sf_so	5		---	---	---	---
Tepelný tok vzduchu na výstupu	Sf_ao	12		---	---	---	---

Tabulka C.1: Parametry systému

⁹ Tepelný tok škrobu závisí i na dalších parametrech, jako je rychlost posuvu, teplota a vlhkost škrobu.

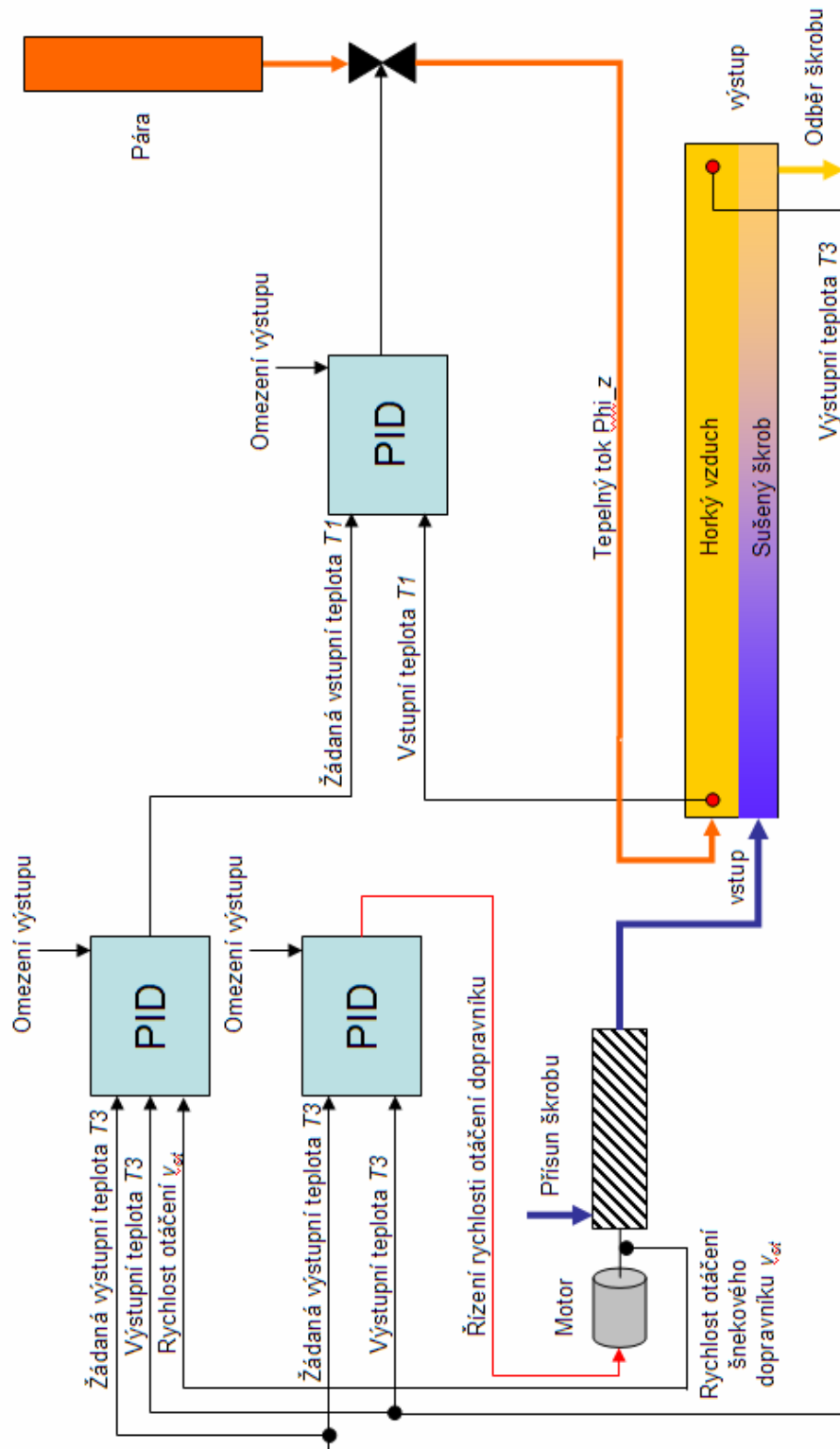
Příloha D – Schémata řídicích systémů

1 Existující koncepce řízení



Obrázek D.1: Schéma klasické koncepce řízení průmyslové sušičky škrobu

2 Navrhovaná koncepce řízení



Obrázek D.2: Schéma navrhované koncepce řízení průmyslové sušičky škrubu

Příloha E – Obsah přiloženého CD

1 Seznam adresářů

- `\bakalářská_práce`
- `\simulační_schéma_model`
- `\simulační_schéma_řízení_klasické`
- `\simulační_schéma_řízení_kaskádní`

2 Obsah adresářů

- `\bakalářská_práce`
 - bakalářská práce, formát PDF (program Adobe Acrobat)
- `\simulační_schéma_model`
 - simulační schéma soustavy, formát MDL (program Simulink)
 - soubory M-file s nastaveními, formát M (program MATLAB)
- `\simulační_schéma_řízení_klasické`
 - simulační schéma s implementovaným klasickým řízením sušičky škrobu, formát MDL (program Simulink)
 - soubory M-file s nastaveními, formát M (program MATLAB)
- `\simulační_schéma_řízení_kaskádní`
 - simulační schéma s implementovaným kaskádním řízením sušičky škrobu, formát MDL (program Simulink)
 - soubory M-file s nastaveními, formát M (program MATLAB)