

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh řízení recirkulace spalin automatického

100kW kotle na biomasu

Ludvík Bazjuk

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro:

Bc. Ludvíka BAZJUKA

obor: Přístrojová a řídicí technika

Název tématu:

Návrh řízení recirkulace spalin automatického 100kW kotle na biomasu

Název anglicky:

Design of the 100kW automatic biomass-fired boiler flu gas recirculation control

Zásady pro zpracování

1. Popište současný stav využití recirkulace spalin u kotlů na biomasu nižších výkonů.
2. Navrhněte řešení řízení již realizované recirkulační trati s cílem dosáhnout požadované koncentrace spalin na přívodu primárního a sekundárního spalovacího vzduchu 100kW kotle na dřevní biomasu.
3. Navržené řešení realizujte jako matematický model v prostředí Matlab/Simulink.
4. Experimentálně otestujte použitelnost Vámi navrženého řešení.
5. Navrhněte případné vylepšení jak fyzického řešení recirkulační trati, tak Vašeho návrhu řízení, s cílem vylepšit dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP

Rozsah průvodní zprávy: min. 50 stran + přílohy

Seznam odborné literatury:

HRDLIČKA, Jan a kolektiv. Problematika řízení automatických kotlů na biomasu se zaměřením na kotle malého výkonu pro domácnosti. [vid 24.5.2015]. Dostupné z <http://www.iczt.cz/cs/doc/sem34.pdf>

JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. Mechanika tekutin. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 150 s. ISBN 80-01-01615-3.

ADAMEC, Josef, Martin LÍŠAL a Blanka VÁRADIOVÁ. Mechanika tekutin: sbírka příkladů. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1998, 104 s. ISBN 80-01-01811-3.

DRKAL, František a Vladimír ZMRHAL. Větrání. 1. vyd. V Praze: ČVUT, 2013, 157 s. ISBN 978-80-01-05181-8.


Vedoucí diplomové práce: Ing. Cyril Oswald

Datum zadání diplomové práce: 12. 4. 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 15. 6. 2016

K. Z. 
doc. Ing. Jan Chyský, CSc.
vedoucí ústavu




prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne: 5. 4. 2016

Anotační list

Jméno autora:	Ludvík Bazjuk
Název diplomové práce:	Návrh řízení recirkulace spalin automatického 100kW kotle na biomasu
Anglický název:	Design of the 100kW automatic biomass-fired boiler flu gas recirculation control
Akademický rok:	2015/2016
Obor studia:	Přístrojová a řídicí technika
Ústav/odbor:	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Cyril Oswald
Bibliografické údaje:	Počet stran: 72 Počet obrázků: 29 Počet příloh: 1xCD+5xA4
Klíčová slova:	recirkulace spalin, regulace, spalování biomasy, snižování emisí, NO _x , matematické modelování, vedení vzduchu potrubím
Keywords:	flu gas recirculation, control, combustion of biomass, reduction of emissions, NO _x , mathematical modeling, air convection

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem řízení akčních členů již existující recirkulační tratě spalin 100 kW kotle na biomasu. K řízení jsou k dispozici tři akční členy: jeden recirkulační ventilátor a dvě automatické klapky. Pro recirkulační ventilátor je navrženo zpětnovazební řízení. Pro řízení klapek je vytvořen matematicko-fyzikální model, který popisuje část recirkulační tratě a vypočítává hodnoty poměrného otevření klapek v závislosti na požadovaných koncentracích spalin ve spalovacích vzduších pro dopředné řízení. Model je koncipován tak, že je použit v kombinaci se zpětnovazebním řízením, které odstraňuje odchylky koncentrací vzniklé poruchami. V diplomové práci je popsána úprava a kalibrace stávajících senzorů.

Abstract:

This diploma thesis deals with designing of control of action elements of the recirculation conduct mounted on the 100 kW biomass-fired boiler. There are three action elements available: one recirculation blowers and two automatic valves. The feedback control is designed for the recirculation blower. The mathematical model is created for forward control of automatic valves. The model describes a part of recirculation conduct and calculate values of relative open of valves depend on the desired flu gases flows into the combustion airs. The model is meant to be combined with the feedback control, which can eliminate errors occurred due the disturbance. The adjustment and calibration of the installed sensors is described in the diploma thesis.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne.....

Podpis.....

Poděkování

*Děkuji Ing. Cyrilu Oswaldovi za pomoc při vedení mé diplomové práce.
Poděkování patří také Ing. Viktoru Plačkovi, PhD. za spolupráci při získávání
údajů pro výzkumnou část práce.*

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	10
1 Motivace	14
2 Úvod.....	15
3 Význam recirkulace spalin.....	17
3.1 Emise oxidů dusíku	17
3.2 Vznik oxidů dusíku.....	17
4 Kotel s recirkulační tratí.....	20
4.1 Popis kotle s recirkulační tratí	20
4.2 Původní algoritmus řízení od společnosti Fiedler	21
4.3 Popis Funkce WinPACu.....	22
4.4 Komunikace řídicích prvků nainstalovaných na kotli	22
5 Řízení	24
5.1 Kombinace řízení.....	25
5.2 Regulátor typu PI.....	26
6 Matematicko-fyzikální model recirkulační tratě.....	27
6.1 Popis postupu odvození matematicko-fyzikálního modelu.....	27
6.2 Výpočet tlakových ztrát a průtoků vzduchu	32
6.2.1 Výpočet průtoku spalin	32
6.2.2 Řešení průtoku proudu vzduchu klapkou	34
6.2.3 Řešení rozdělení proudu tekutiny na dva proudy	35
6.2.4 Řešení směšování proudů tekutin	37
6.3 Spojení rovnic do modelu.....	39
7 Proměření statických charakteristik klapek	42
7.1 Měření automatických klapek na přívodu spalin z komína.....	42
7.1.1 Primární automatická klapka ve větvi spalin.....	42
7.1.2 Sekundární automatická klapka ve větvi spalin.....	43

7.2	Měření klapek na přívodu čerstvého vzduchu	45
7.2.1	Klapka ve větvi čerstvého primárního vzduchu	45
7.2.2	Klapka ve větvi čerstvého sekundárního vzduchu	46
8	Spojení odvozených rovnic se statickými charakteristikami jednotlivých prvků recirkulační tratě.....	48
9	Nastavení senzorů	50
9.1	Kalibrace průtokoměrů	50
9.2	Lambda sondy.....	52
9.2.1	Kalibrace lambda sond.....	53
10	Řízení recirkulačního ventilátoru	56
10.1	Nastavování PI regulátoru recirkulačního ventilátoru	56
10.1.1	Nastavení parametrů PI pro primární vedení vzduchu	56
10.1.2	Nastavení parametrů PI pro sekundární vedení vzduchu.....	57
10.1.3	Výsledky nastavení	57
11	Ověření modelu	58
11.1	Porovnání výstupu modelu s nastavením recirkulační tratě	58
11.1.1	Měřený experiment při zapáleném kotli	58
11.1.2	Odstranění mrtvé zóny servopohonů	60
11.1.3	Přidání přepočetni přímky pro otevření klapek	61
11.1.4	Úprava parametrů přímky přepočtu otevření klapek pro zlepšení přesnosti modelu	62
12	Návrh úprav recirkulační tratě.....	64
13	Závěr.....	65
	Použitá literatura a zdroje	66
	Přílohy	68

Seznam použitých symbolů

Seznam chemických zkratek	
Značka	Popis
NO	oxid dusnatý
NO₂	oxid dusičitý
NO_x	směs oxidu dusného a dusičitého
CO	oxid uhelnatý
CO₂	oxid uhličitý
HNO₃	kyselina dusičná
HNO₂	kyselina dusitá

Seznam symbolů řízení	
Značka	Popis
w	řídící veličina
y	regulovaná veličina
u	akční veličina
e	regulační odchylka
dv	proměnná dopředné vazby
sp	požadovaná hodnota (setpoint)
pv	řízená veličina
tv	veličina pro vysledování
hv	hodnota výstupu v manuálním režimu
MAN	manuální nebo automatický režim
IH	zastavení integrace
k	zesílení regulátoru K
ti	integrační časová konstanta T_i
td	derivační časová konstanta T_d
nd	parametr N filtru derivační složky
b	váhový faktor pro proporcionální složku
c	váhový faktor pro derivační složku
mv	akční zásah regulátoru (manipulated variable)
dmv	rychlostní výstup regulátoru (diference)
de	regulační odchylka
SAT	saturace

Seznam matematickofyzikálních symbolů		
Značka	Popis	Jednotka
L	poměrné otevření klapky	[%]
L_0	netěsnost klapky při úplném uzavření	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{Pa}^{\frac{1}{2}}\text{s}} \right]$
k	obecný koeficient otevření klapky	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{Pa}^{\frac{1}{2}}\text{s}} \right]$
Δp	tlakový spád na klapce	[Pa]
\dot{V}	obecný objemový průtok skrz klapku	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
$p_{\text{před}}$	tlak před automatickou recirkulační klapkou	[Pa]
p_{za}	tlak za automatickou recirkulační klapkou	[Pa]
x_s	koncentrace kyslíku ve spalinách v komíně	[%]
$x_{\check{c}}, x_{\check{c}1}, x_{\check{c}2}$	koncentrace kyslíku v čerstvém vzduchu	[%]
x_1	koncentrace kyslíku vzduchu v primárním spalovacím vzduchu	[%]
x_2	koncentrace kyslíku vzduchu v sekundárním spalovacím vzduchu	[%]
$\dot{V}_{\check{c}1}$	průtok vzduchu v primární větvi čerstvého vzduchu	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
$\dot{V}_{\check{c}2}$	průtok vzduchu v sekundární větvi čerstvého vzduchu	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
\dot{V}_0	průtok spalin recirkulačním ventilátorem	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
\dot{V}_1	průtok spalovacího vzduchu primární větvi	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
\dot{V}_2	průtok spalovacího vzduchu sekundární větvi	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
\dot{V}_3	průtok spalin větvi čerstvého vzduchu primárního vedení ventilátorem	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
\dot{V}_4	průtok spalin větvi čerstvého vzduchu sekundárního vedení ventilátorem	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
\dot{V}_{s1}	průtok spalin recirkulační klapkou primárního vzduchu	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

\dot{V}_{s2}	průtok spalin recirkulační klapkou sekundárního vzduchu	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
$k_{\zeta 1}$	koeficient klapky v cestě čerstvého vzduchu v primární větvi	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{Pa}^{\frac{1}{2}} \text{s}} \right]$
$k_{\zeta 2}$	koeficient klapky v cestě čerstvého vzduchu v sekundární větvi	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{Pa}^{\frac{1}{2}} \text{s}} \right]$
$(1 + \zeta_1)$	zvětšený součinitel místní ztráty primární automatické klapky	[1]
$(1 + \zeta_2)$	zvětšený součinitel místní ztráty sekundární automatické klapky	[1]
ρ	hustota spalin	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
ρ_0, ρ_1, ρ_2	hustota spalin	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
ρ_3, ρ_4	hustota čerstvého vzduchu	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$
λ	přebytek kyslíku v médiu	[1]
λ_{prim}	upravená koncentrace kyslíku z lambda sondy v primárním spal. vzduchu	[%]
$\tilde{\lambda}_{prim}$	měřená koncentrace kyslíku z lambda sondy v primárním spal. vzduchu	[%]
λ_{sek}	upravená koncentrace kyslíku z lambda sondy v sekundárním spal. vzduchu	[%]
$\tilde{\lambda}_{sek}$	měřená koncentrace kyslíku z lambda sondy v sekundárním spal. vzduchu	[%]
A_0	průřez vedení trati za recirkulačním ventilátorem	$[\text{m}^2]$
A_1	průřez vedení primární větve spalin před a za recirkulační klapkou	$[\text{m}^2]$
A_2	průřez vedení sekundární větve spalin za recirkulační klapkou	$[\text{m}^2]$
A_3	průřez vedení ve větvi primární klapky čerstvého vzduchu	$[\text{m}^2]$
A_4	průřez vedení ve větvi sekundární klapky čerstvého vzduchu	$[\text{m}^2]$
p_b	barometrický tlak vzduchu před nasávacím otvorem	[Pa]
p_0	tlak média za recirkulačním ventilátorem	[Pa]
p_1	tlak média za klapkou primárních spalin	[Pa]
p_2	tlak média za recirkulační klapkou v sekundárním vedení	[Pa]

p_3	tlak média za klapkou čerstvého vzduchu	[Pa]
p_4	tlak média za klapkou čerstvého vzduchu	[Pa]
Δp_m	měřená tlaková diference	[Pa]
L_1	otevření primární automatické klapky vypočtené z modelu	[%]
L_2	otevření primární automatické klapky vypočtené z modelu	[%]
L_n	nové otevření klapky po přepočtu mrtvé zóny	[%]
L_m	otevření klapky vypočtené z modelu	[%]
k_L	obecný koeficient přímky přepočtu otevření klapky	[1]
L_{MZ}	obecné posunutí přímky přepočtu otevření klapky	[%]
L_{n1}	přepočítané otevření primární automatické klapky	[%]
L_{n2}	přepočítané otevření sekundární automatické klapky	[%]
x_{sv}	výpočtová koncentrace kyslíku ve spalínách	[%]
λ_n	nová přepočítaná hodnota koncentrace kyslíku z lambda sondy	[%]
λ_m	koncentrace kyslíku měřená lambda sondou	[%]
k_λ	obecný koeficient přímky přepočtu lambda sond	[1]
λ_{os}	obecné posunutí přepočtení přímky otevření klapky	[%]
r_0	zesílení regulátoru PI	[1]
T_i	časová konstanta integrační složky PI regulátoru	[s]
Δp_{min}	nejnižší možný nastavený přetlak v PI regulátoru	[Pa]

1 Motivace

Recirkulace spalin je jeden ze způsobů snižování emisí oxidů dusíku, obecně značenými NO_x . Jedná se o prostředek prevence tvorby oxidů dusíku, který není tak energeticky a finančně náročný, jako čištění odpadních plynů, protože není nutné obstarat a udržovat zařízení na čištění spalin. Přesto u malých kotlů na biomasu není recirkulace běžně rozšířená. Právě malé kotle na biomasu se hojně vyskytují v domácnostech.

Polovina celkově spotřebované biomasy se spálí v domácnostech. Spalování v domácích kamnech a kotlích neprobíhá za ideálních podmínek a je doprovázeno vznikem značného množství škodlivých plynů. Tím pádem dochází ke znečišťování ovzduší v obydlených zónách. Informace pocházejí z publikace [3].

Nabízí se možnost vyvinout recirkulační systém, který by se dal aplikovat na kotle malé až střední velikosti. Systém, který by příliš finančně nezatížil koncového zákazníka. Recirkulační trať musí fungovat s minimálně nezbytným množstvím senzorů, které mají na pořizovací cenu neblahý vliv.

Výrobci kotlů na biomasu pro domácnosti se příliš nezabývají ani snižováním emisí, ani optimalizací spalovacího procesu. Správně navržená recirkulace přitom výrazně sníží emise kotle a má minimální negativní dopad na účinnost kotle, dokonce je možné ji v některých případech i mírně navýšit.

2 Úvod

Recirkulace spalin je systém uzavřeného zpětného odebírání spalin za topeništěm s úmyslem vrátit část spalin do spalovacího procesu. Recirkulace spalin je účinným nástrojem ke snižování emisí NO_x . Malé kotle na biomasu běžně využívají při spalování paliva dva vzduchy, primární a sekundární spalovací vzduch (dále jen primární a sekundární vzduch). Primární vzduch slouží k rozdmýchávání biomasy a je hnán pod rošt. Sekundární vzduch podporuje dopalování uvolněných prchlavých složek paliva a je hnán nad vrstvu paliva. Spaliny je možné přimíchávat do primárního i sekundárního vzduchu. Recirkulační trať pro recirkulaci do dvou větví musí obsahovat tři akční členy. Nejprve musíme spaliny z komína odebírat, k tomu slouží odtahový ventilátor. Následně je potřeba je rozdělit v požadovaném poměru, k tomu slouží dvě automatické klapky.

V současném stavu ovládá recirkulační ventilátor a klapky operátor kotle. Řízení probíhá tak, že operátor si přednastaví otevření klapek a spustí ventilátor, postupnými úpravami krok za krokem najde hledaný pracovní bod. Jelikož děje uvnitř kotle mají velkou setrvačnost, musí se po zásahu do recirkulační tratě nejméně 5 minut čekat na výsledek zásahu. Řízení recirkulace je nyní velmi zdlouhavý a neohrabaný proces.

Obzvlášť v nutnosti přítomnosti zkušeného operátora k obsluze recirkulace vidím zásadní problém, proč není možné recirkulaci spalin hojně využívat u malých kotlů. Malé kotle na biomasu jsou využívány v běžných domácnostech, kde musí fungovat bez zásahu odborníka.

Cílem diplomové práce je vytvoření systému automatického řízení recirkulace spalin založeného na modelu, který popíše fyzikální podstatu recirkulační tratě v kombinaci se zpětnovazební regulací. Model popisující trať využiji k výpočtům parametrů tratě ještě před samotným zahájením recirkulace spalin

Model bude nastavením otevření automatických klapek a výkonem recirkulačního ventilátoru upravovat parametry tratě tak, aby trať proudilo požadované množství spalin. Funkcí modelu bude předem vytvořit v trati takové podmínky, které rovnou propustí přesné množství spalin do každé větve recirkulační tratě.

Model je určen k dopřednému řízení v kombinaci se zpětnovazební regulací, která zajistí doregulování odchylek od požadované hodnoty. Zpětnovazební regulaci zajistí regulátor typu PID. Ve své práci se zaměřím na recirkulaci do každé větve zvlášť

s větším důrazem na recirkulaci do primárního vzduchu, která je běžnější u výkonnějších kotlů na tuhá paliva.

Model vytvořím v prostředí Simulink, které je již využíváno k řízení kotle. Programování v Simulinku je uživatelsky příjemné a přehledné. V Simulinku se programuje pomocí bloků, výsledný model je podobný nebo shodný s navrženým blokovým schématem.

Model ověřím během společného experimentu s kolegyní z Ústavu energetiky, během experimentu dojde ke skutečnému zapálení kotle a užití recirkulace ke snížení emisí NO_x . Zaměřím se na nedostatky recirkulační tratě, které ztěžují nebo znemožňují použití navrženého řízení a odstráním je, nebo navrhnou jejich úpravu.

Kotel na biomasu, se kterým v rámci diplomové práce experimentuji, je od společnosti Zdeněk Fiedler, s.r.o. Recirkulační trať je dílem Ústavu energetiky a Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

3 Význam recirkulace spalin

3.1 Emise oxidů dusíku

Pojem emise oxidů dusíku je nejčastěji chápán jako součet emisí oxidu dusnatého NO a oxidu dusičitého NO_2 . Směs obou plynů se označuje souhrnným symbolem NO_x . Oxidy dusíku vznikají během spalování paliv, chemických procesů a při výrobě kyseliny dusičné. Nás zajímá především vznik oxidů dusíku při spalování tuhých paliv. Při spalování tuhých paliv je rozložení ve složení oxidů dusíku následující 90 – 99 % z podílu směsi NO_x tvoří oxid dusnatý NO zbytek oxid dusičitý NO_2 . Popsáno podle publikace [1], [2] a [3].

Směs NO_x odchází s dalšími plyny komínem pryč ze spalovacího procesu. Velkou část spalin tvoří vodní pára. V komíně dochází k ochlazení spalin a oxid dusnatý se přetváří v oxid dusičitý dle vztahu (3.1).

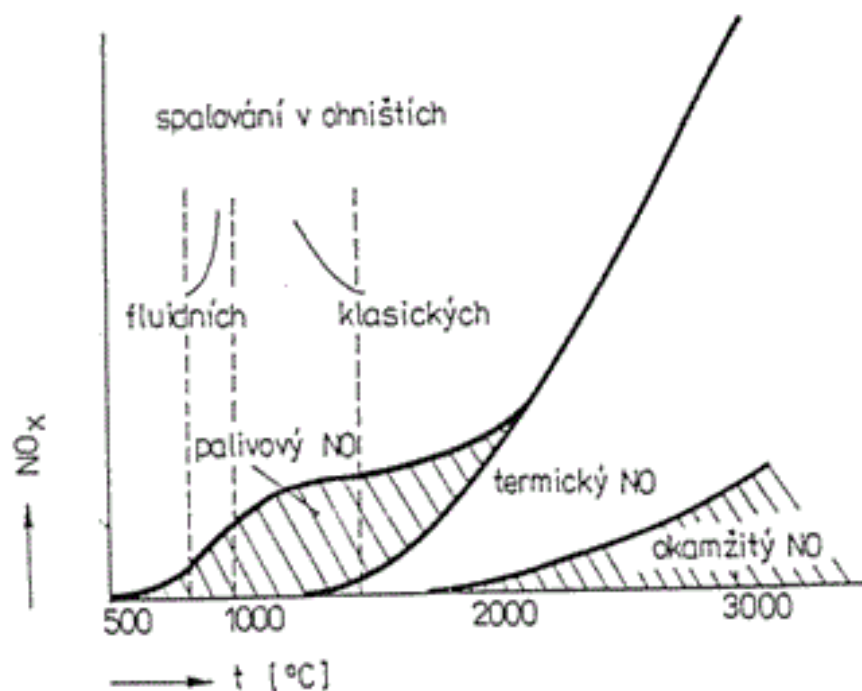


Oxid dusičitý reaguje s vodní párou ve spalinách za vzniku dusíkatých kyselin HNO_3 a HNO_2 , které jsou následovně vypuštěny do ovzduší. Kyseliny dusíku jsou následně spoluúčastníky kyselých dešťů. Napsáno podle zdroje [3] str. 100.

3.2 Vznik oxidů dusíku

Vznik oxidů dusíku popisují podle publikace [3]. Oxidy dusíku vznikají třemi základními způsoby.

- Oxidací chemicky vázaného dusíku obsaženého v palivu - Palivové NO_x
- Z chemicky vázaného dusíku radikálovými reakcemi na rozhraní plamene - Okamžité NO_x
- Oxidací dusíku ze spalovacího vzduchu za vysoké teploty – Termické NO_x



Obrázek 1-Vliv recirkulace na koncentraci NO_x ve spalínách. Převzato z [9]

Pokud palivo obsahuje dusík, není možné se ho zbavit. Během spalování reaguje dusík z paliva přímo se vzduchem a odchází ve spalínách do ovzduší. Koncentraci NO_x z paliva musíme přijmout jako nevyhnutelnou minimální hodnotu koncentrace NO_x .

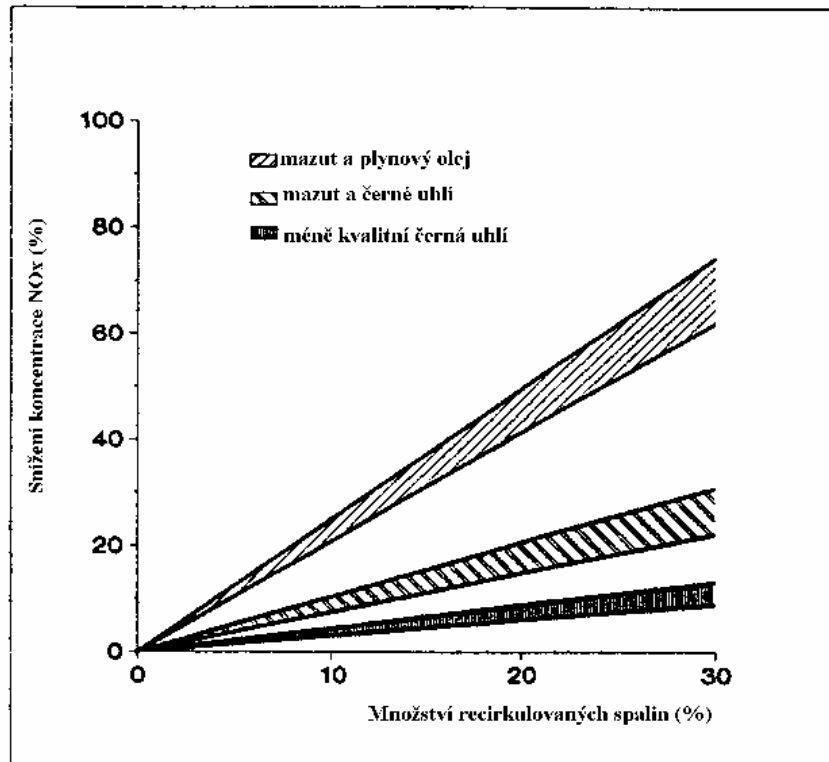
Okamžité (promptní) oxidy dusíku jsou jistou formou palivového dusíku, který se dostává z paliva do spalín až na okraji plamene. Okamžité oxidy dusíku vznikají až za velmi vysokých teplot, kterých během spalování biomasy nedosahujeme. Podíl okamžitých oxidů na celkovém množství NO_x je zanedbatelný.

Zajímavé je podívat se na oxidy dusíku vznikající za vysoké teploty. Termické NO_x vznikají přímou reakcí plynného dusíku s kyslíkem ze vzduchu za vysoké teploty. Množství vzniklých oxidů tímto způsobem je závislé především na třech činitelích: na teplotě uvnitř topeniště, na koncentraci kyslíku ve spalovacím vzduchu a na délce zdržení spalovacího vzduchu v topeništi.

Délka zdržení spalovacího vzduchu v topeništi je dána rychlostí průtoku spalovacího vzduchu. Rychlost není možné příliš razantně měnit, je pevně určena požadavky spalovacího procesu. Ovlivnit můžeme koncentraci kyslíku ve spalovacím vzduchu a teplotu uvnitř topeniště.

Koncentraci kyslíku ve spalovacím vzduchu můžeme ovlivnit tím, že do čerstvého vzduchu zpětně vrátíme část spalín z komína. Spaliny sníží hmotnostní podíl

kyslíku v čerstvém vzduchu. Přimíchání spalin má dokonce dvojitý dopad na stav uvnitř topeniště. Do spalovacího procesu vstupuje směs s nižším obsahem kyslíku. Nedosáhneme tedy tak vysokého potenciálu k reakci dusíku s kyslíkem a zároveň nedochází k tak prudké oxidaci paliva. V důsledku přidušení hoření dojde ke snížení teploty plamene. Jediným zásahem dokážeme upravit v žádoucím smyslu dva ze tří činitelů ovlivňujících vznik oxidů dusíku.



Obrázek 2-Vznik NO_x v závislosti na poměru recirkulace. Převzato z [3] str. 108

Přidáváním vyššího podílu spalin jsme schopni stále účinněji redukovat tvorbu NO_x . Zvyšovat podíl recirkulace není možné v neomezené míře, kyslík ve spalovacím vzduchu je potřebný pro spalovací proces. Nedostatek kyslíku vede k nedokonalému spalování. Dochází k oxidaci uhlíku na oxid uhelnatý místo na oxid uhličitý. Oxid uhelnatý je další plyn, jehož emise se snažíme udržet na minimální možné hodnotě. Při vyšším podílu recirkulace dochází k redukci emisí NO_x na úkor emisí CO .

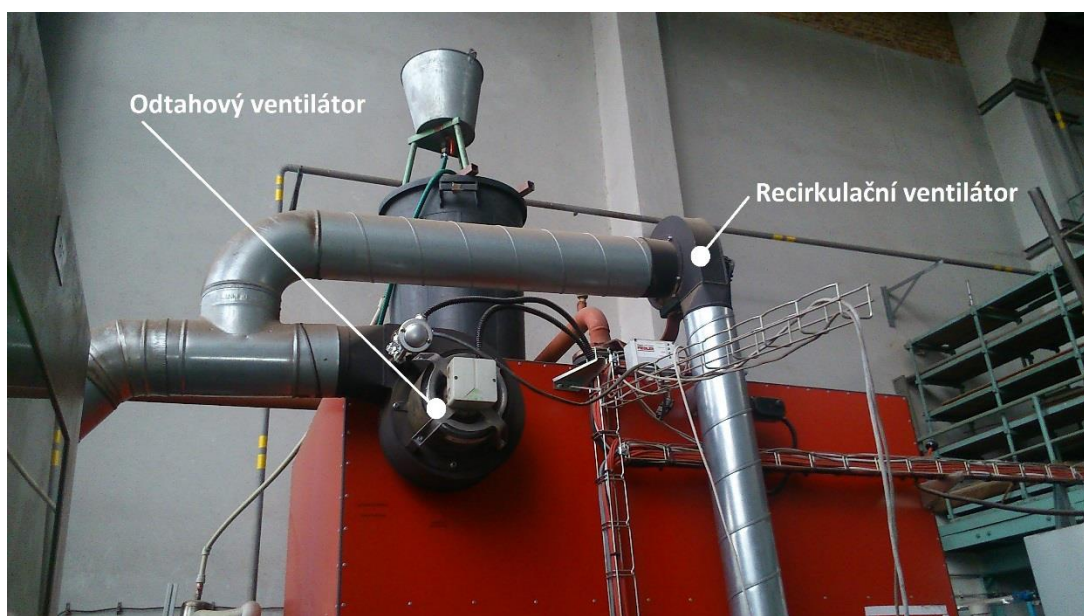
Nejlepším způsobem je míchat spaliny do čerstvého vzduchu ještě ve vedení spalovacího vzduchu, předtím než je vzduch vehnán do topeniště.

4 Kotel s recirkulační tratí

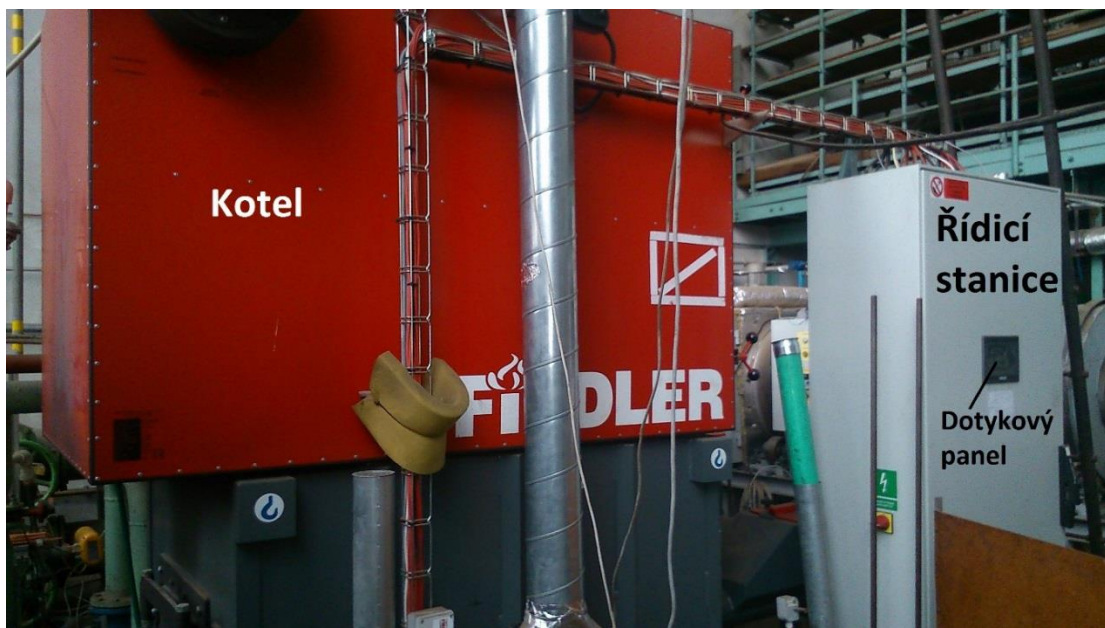
Výrobce kotle společnost Fiedler dodává kotel bez recirkulační tratě. Trať je dílem Ústavu přístrojové a řídicí techniky ve spolupráci s Ústavem energetiky. Recirkulační trať je s ohledem na cenu navržena s malým množstvím instrumentů. Společnost Fiedler dodává kotel s řídicí stanicí. Uvnitř řídicí stanice je hardware potřebný pro běžný provoz kotle bez recirkulační tratě. Řídicí stanice je opatřena dotykovým panelem. Operátor ovládá kotel přes dotykový panel.

4.1 Popis kotle s recirkulační tratí

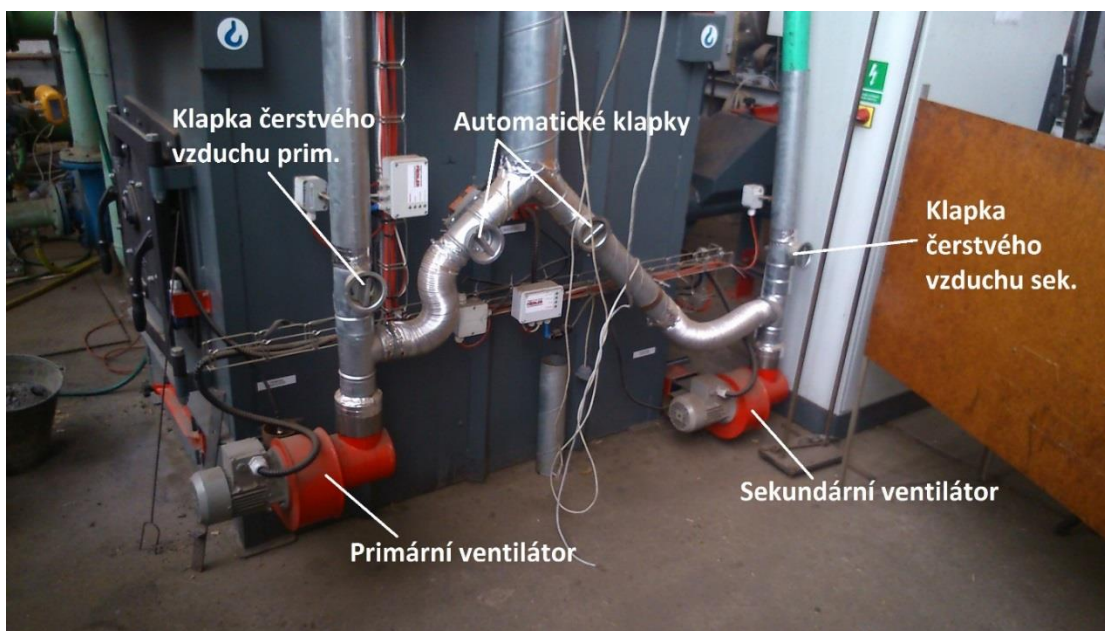
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny základní části kotle a recirkulační tratě s popisem uvnitř obrázků.



Obrázek 3-Odtahový a recirkulační ventilátor



Obrázek 4-Kotel a řídicí stanice



Obrázek 5-Akční členy recirkulační tratě

4.2 Původní algoritmus řízení od společnosti Fiedler

Společnost Fiedler standardně vybavuje kotle řídicí technikou od Siemensu. PLC, které je umístěno uvnitř řídicí stanice ovládá spalování v kotli. Pro zadávání příkazů je součástí řídicí skříně dotykový panel.

Přes dotykový panel se ovládají základní funkce řízení spalování např.: intenzita přikládání paliva, výkon primárního a sekundárního ventilátoru a požadovaný podtlak v topeništi.

PLC vyhodnocuje velké množství stavů, do kterých uživatel zasáhnout nemůže. Podle vstupů rozličných senzorů je vyhodnocováno několik havarijních stavů, které jsou v rámci možností vyřešeny automatickým zásahem.

4.3 Popis funkce WinPACu

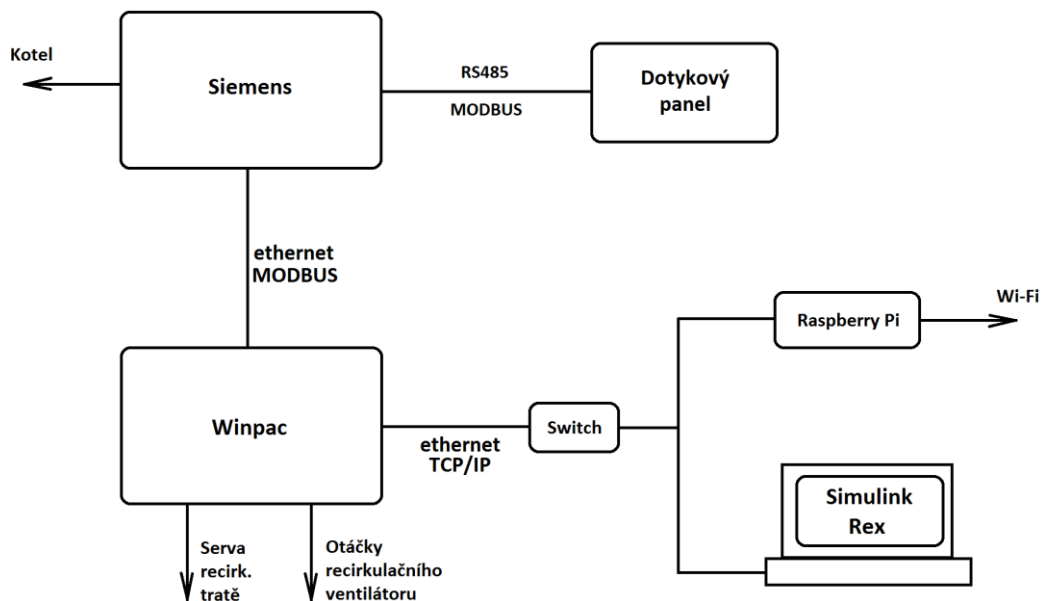
Při instalaci recirkulační tratě přibyla nová soustava, kterou je nutné řídit. Do původního PLC není možné zasahovat bez hardwarového klíče výrobce. Původní PLC proto není vhodné pro vývojářskou činnost a proto byla řídicí stanice osazena novým PLC WinPAC od firmy ICP DAS.

Nové PLC WinPAC je přes protokol MODBUS připojeno k původnímu PLC Siemens, se kterým aktivně komunikuje. Kotel lze ovládat přes jediné PLC WinPAC, nicméně pokud dojde k havarijnímu stavu nebo je PLC WinPAC neaktivní, převezme řízení původní PLC Siemens s nastavením od společnosti Fiedler.

Recirkulační trať je řízena pouze z PLC WinPAC. Výkon recirkulačního ventilátoru a servopohony automatických klapek jsou ovládány přímo z výstupů PLC WinPAC.

4.4 Komunikace řídicích prvků nainstalovaných na kotli

Jednotlivé prvky řídicí stanice jsou mezi sebou propojeny podle následujícího schématu, viz obrázek 6.



Obrázek 6-Schéma zapojení PLC

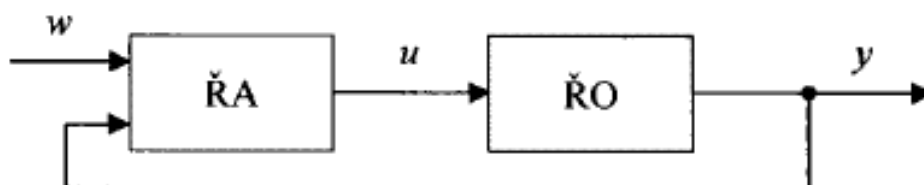
Nově připojené PLC umožnilo širší škálu vnější komunikace. K PLC je připojeno Raspberry PI, které odesílá všechny měřené údaje na server ústavu. Na serveru je vytvořena webová stránka, kde je možné všechny údaje sledovat v reálném čase. Zároveň se ukládají ve formě tabulky, která je předpřipravená pro čtení v prostředí MATLAB.

Největší výhoda nového PLC je v jeho možnosti komunikovat se Simulinkem v reálném čase. Simulink je velmi výkonný výpočetní nástroj s příjemným uživatelským prostředím. Za současných podmínek je možné navrhovat řídicí programy mimo laboratoř. Během spalování je pak možné počítač se Simulinkem připojit přes ethernet k PLC a převzít ovládání celého kotle.

5 Řízení

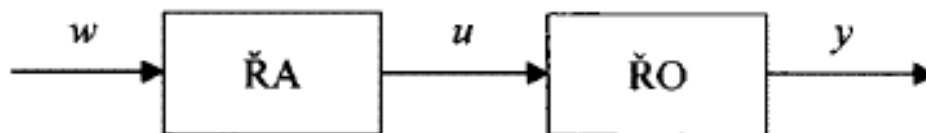
Řízení je cílevědomé působení na objekt tak, aby se přinutil k činnosti od něj požadované. Objekt je abstraktní pojem, jedná se o určitě vyčleněnou část okolního světa určenou člověkem.

Pokud se jedná o řízení se zpětnou vazbou, nazýváme řízení regulací. Zpětnou vazbu poznáme tak, že vyrazíme-li ze zvoleného bodu na spojnici při postupu podle orientace spojnic, tak se dostaneme opět do stejného bodu, ze kterého jsme vyrazili, aniž bychom nějakou spojnici prošli dvakrát. Blokové schéma potom obsahuje uzavřenou smyčku. Často vytváříme umělé zpětné vazby zajišťující řízení daného objektu.



Obrázek 7-Zpětnovazební řízení. Převzato z [10] str. 9

Na obrázku 7 je schematicky znázorněno běžné zapojení zpětnovazebního řízení k řízenému objektu ŘO. ŘA označuje řídicí automat. Řídicí veličinu označujeme w (jedná se o žádanou hodnotu) a y označuje řízenou veličinu. Při regulaci se porovnává řízená veličina y s řídicí veličinou w , rozdílem vznikají regulační odchylky. Podle zjištěných regulačních odchylek řídicí automat působí na řízený objekt prostřednictvím akční veličiny u tak, aby se regulační odchylky odstranily. Řízení bez zpětné vazby se nazývá ovládání a probíhá podle schématu (obrázek 8).

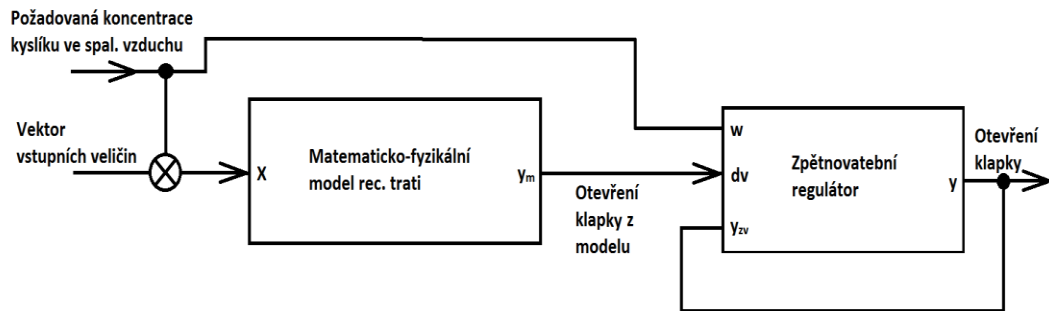


Obrázek 8-Řízení bez zpětné vazby. Převzato z [10] str. 9

Ovládání je způsob řízení, kde nedochází ke zpětné kontrole akčního zásahu. w je řídicí veličina, y je řízená veličina a u je akční zásah. Popis řízení podle publikace [10]

5.1 Kombinace řízení

V recirkulační trati řídím průtok spalin, který se mi projeví změnou koncentrace kyslíku ve spalovacích vzduších. K řízení otevření automatických klapek využívám kombinaci dopředného řízení se zpětnovazebním regulátorem podle schématu na obrázku 9.



Obrázek 9-Schéma kombinovaného řízení recirkulační trati

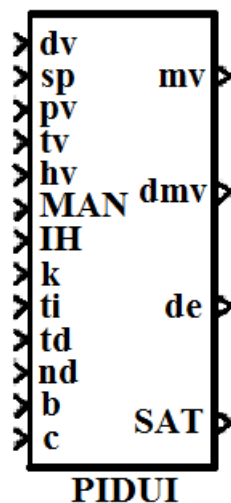
V diplomové práci jsem vytvořil matematicko-fyzikální model, který vypočítává poměrné otevření automatických klapek. Jedná se o dopředné řízení, které není schopné zohlednit poruchové veličiny, které do soustavy vstupují, proto jsem řízení doplnil zpětnovazebním regulátorem, který bude eliminovat odchylky v recirkulační trati. Řídím průtok spalin do jednotlivých větví tratě, který je vhodně reprezentován koncentrací kyslíku ve spalinách. Zpětnovazební řízení zajišťuje regulátor typu PID.

Řízení probíhá podle schématu 9, kdy model vypočítá otevření klapky, předá ho do zpětnovazebního regulátoru jako dopřednou vazbu. Regulátor dorovná nepřesnosti modelu v rozsahu otevření klapky $\pm 10\%$.

Zpětnovazební regulátor je nutno připojit, protože spalování není zcela exaktní proces. Dochází k výkyvům spalovacího procesu během přikládání, vliv má i nehomogenita paliva. Samotný model bez zpětné vazby nedokáže nabídnout potřebnou kvalitu regulace. K realizaci jsem použil regulátor typu PI, protože během recirkulace dochází k častým výkyvům koncentrace kyslíku, které není potřeba regulovat, ale je vhodné počkat, až se ustálí samy.

5.2 Regulátor typu PI

V průmyslu patří mezi nejrozšířenější regulátory regulátor typu PID. Odtahový ventilátor reguluje podtlak v topeništi pomocí PI regulátoru. Rozhodl jsem se pro regulaci tlaku v recirkulační větvi použít také regulátor typu PI. Derivační složka D regulátoru není potřeba, protože kompenzuje rychlé dynamické změny, které se v recirkulační trati nevyskytují. Regulátory typu PID a jejich různé varianty jsou rozšířené natolik, že v programech pro programování PLC jsou bloky s PID již předpřipraveny.



Obrázek 10-Blok PIDUI. Převzato z [11]

Výhodné je použít regulátor PID, který má předpřipravené vstupy pro dopřednou vazbu a beznárazové přepínání automatického a manuálního řízení.

Beznárazové přepínání manuálního řízení je velmi vhodná vlastnost zvláště u recirkulačního ventilátoru, kde dochází k dlouhému roztápění a hodí se, aby byl ventilátor vypnutý, nebo pracoval v režimu mimo regulaci.

Díky dopředné vazbě jsem schopen jednoduše zkombinovat regulátor koncentrace kyslíku ve spalovacích vzduších s hodnotou dopředného řízení vypočítané z matematicko-fyzikálního modelu tratě.

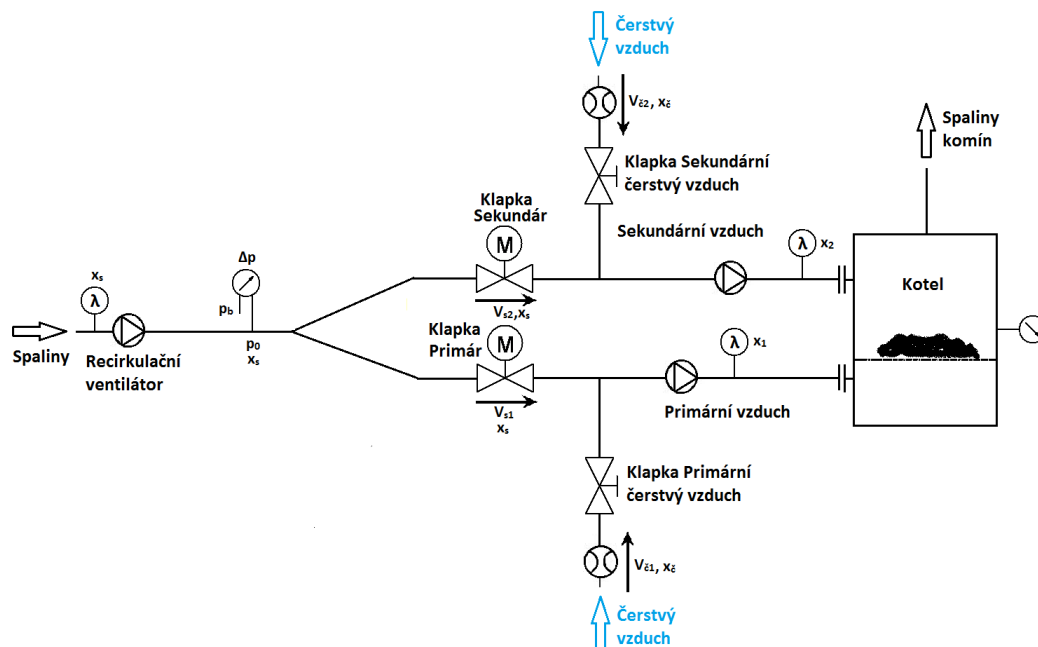
Vazba od dopředné vazby je vhodná i u regulátoru výkonu recirkulačního ventilátoru, protože recirkulační trať bude pracovat ve více režimech a je možné, že během různých režimů bude ventilátor vytížen jiným způsobem. Je vhodné při změně režimu recirkulační tratě změnit pracovní bod regulátoru, to je umožněno změnou hodnoty přiváděné na vstup dopředné vazby regulátoru PID.

6 Matematicko-fyzikální model recirkulační tratě

Pro dopředné řízení recirkulační tratě bylo potřeba sestavit model trati. Použil jsem metodu matematicko-fyzikální analýzy. Odvozením vztahů jsem popsal zákonitosti a vztahy mezi jednotlivými veličinami v trati. Bez kvalitního modelu by nebylo možné recirkulační trať účinně řídit.

6.1 Popis postupu odvození matematicko-fyzikálního modelu

Recirkulační trať je pevně namontovaná na kotli. Matematicko-fyzikální model jsem vytvořil přímo pro zadanou trať. Přidal jsem nebo vyměnil pouze senzorku, ale části, které jsou napevno namontované ke kotli, jsem během řešení diplomové práce neupravoval. Proces by byl finančně a časově náročný.

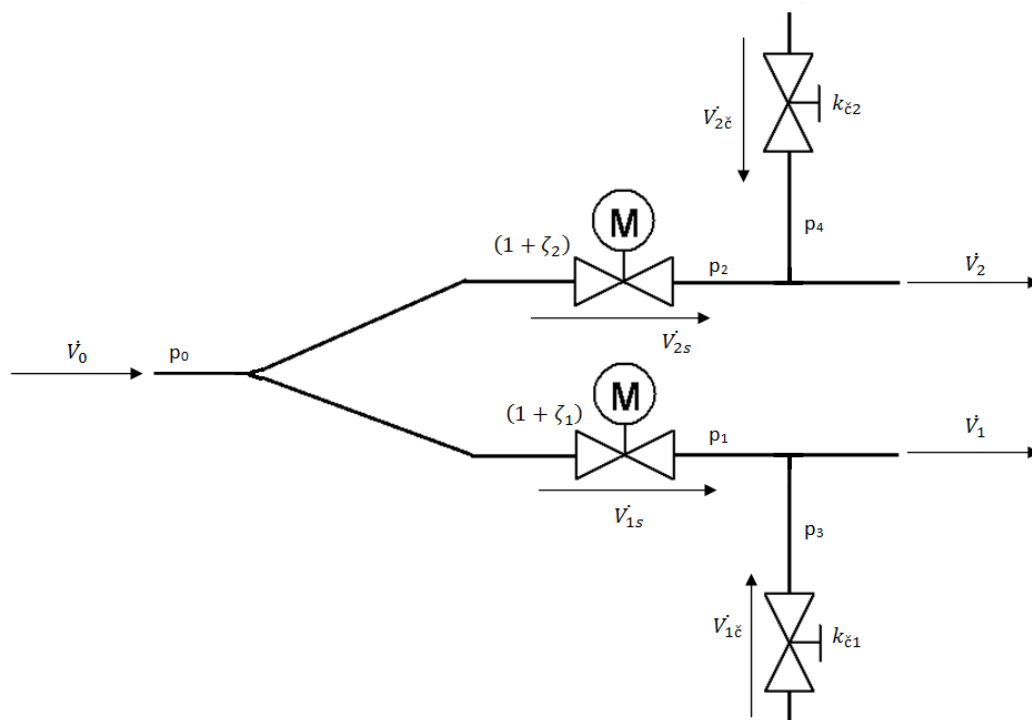


Obrázek 11-Schéma celé recirkulační tratě

Do návrhu modelu jsem zahrnul části tratě, které jsou od sebe odděleny ventilátory. Ve svém modelu se zabývám řízením automatických klapek (v obrázku 11 označeny klapka primár a klapka sekundár), které slouží k rozdělení proudu spalín. Klapky se otevírají v takovém poměru vůči sobě, aby se do každé větve primárního i sekundárního vzduchu dostal zvolený podíl průtoku spalín k průtoku čerstvého vzduchu. Podíl průtoků je reprezentován koncentrací kyslíku ve spalovacím vzduchu a určuje ji ze svých zkušeností operátor kotle.

Recirkulační trať začíná recirkulačním ventilátorem, který nasává spaliny z komína. Po průchodu spalín recirkulačním ventilátorem se spaliny rozdělí do dvou proudů, kde jeden připadá na primární a druhý na sekundární větev vedení vzduchu. Spaliny projdou automatickou klapkou, která upraví jejich tlakový potenciál. Spaliny se smíchají s čerstvým vzduchem a vytvoří směs primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. Směs je dále nasáta primárním a sekundárním ventilátorem a vehnána do topeniště.

Ze schématu na obrázku 11 jsem překreslil část tratě, která obsahuje automatické klapky primárních a sekundárních spalín. Vymezený úsek recirkulační tratě (obrázek 12) začíná za recirkulačním ventilátorem, zahrnuje čtyři klapky a končí za smícháním dvou proudů vzduchu těsně před primárním a sekundárním ventilátorem. Zbytek tratě jsem v modelu neuvažoval. V trati za primárním a sekundárním ventilátorem je umístěno měření koncentrace kyslíku. Informaci o koncentraci kyslíku si převezmu, protože průchod ventilátorem nemůže změnit koncentraci kyslíku ve spalovacím vzduchu.



Obrázek 12-Výsek recirkulační tratě pro odvození modelu

Moje snaha směřovala k vytvoření modelu, který by popsal recirkulační trať tak, abych byl schopen ovlivňovat množství spalín žádoucím způsobem pomocí dvou

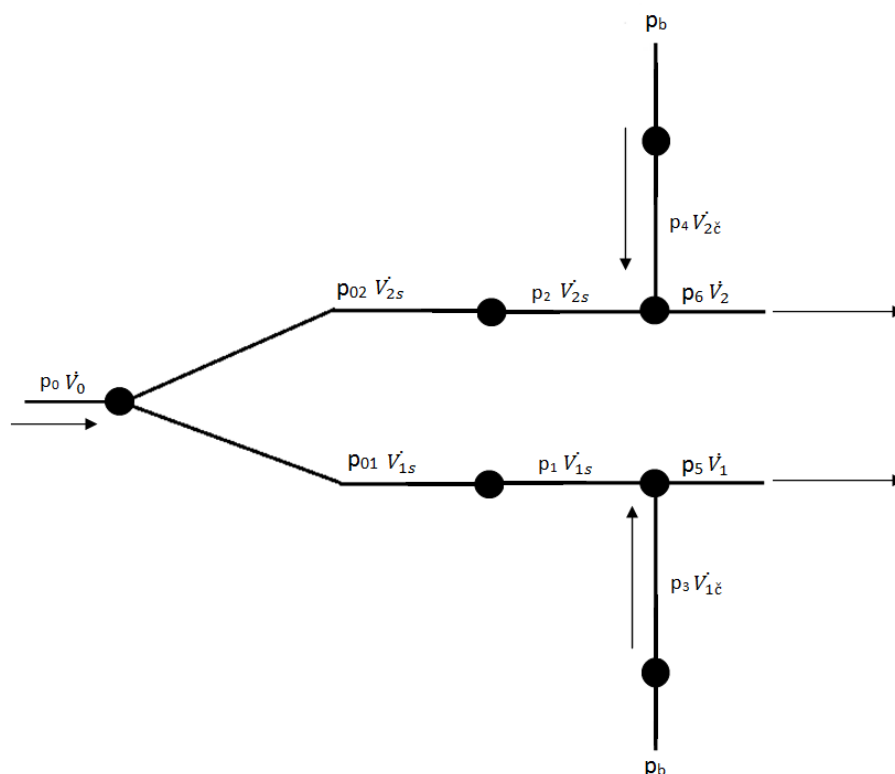
automatických klapek. Tyto klapky jsou ovládány servopohony přes PLC. Charakteristika závislosti průtoku na tlakovém spádu klapek je dána rovnicí (6.1), upravená rovnice z [12] str. 19.

$$\dot{V} = \sqrt{\Delta p}(kL + L_0) \quad (6.1)$$

Z rovnice (6.1) je zřejmé, že obsahuje pět neznámých: šest, pokud rozdělím tlakovou diferencii ve smyslu proudění média na tlak před klapkou a tlak za klapkou. Viz rovnice (6.2).

$$\Delta p = p_{před} - p_{za} \quad (6.2)$$

Poměrné otevření klapky L je moje hledaná neznámá. Průtok média \dot{V} je požadovaná veličina. Musím do rovnice dosadit další čtyři hodnoty, abych dostal výslednou hodnotu otevření klapky. Koeficient k otevření klapky a netěsnost klapky L_0 jsou dány mechanickou konstrukcí klapky a jejich hodnoty jsem zjistil proměřením statické charakteristiky. Vzápětí přišel na řadu popis charakteristiky proudu média. Musel jsem stanovit statický tlak na obou stranách klapky. Jednou z možností bylo všechny potřebné veličiny měřit, nicméně není žádoucí, aby byla trať osazena množstvím drahé sensoriky. Udělal jsem rozbor tratě a zjistil jsem, že většina potřebných hodnot tlaků a průtoků se dá vypočítat na základě analýzy tratě a ze známých tlaků a průtoků ve významných místech.

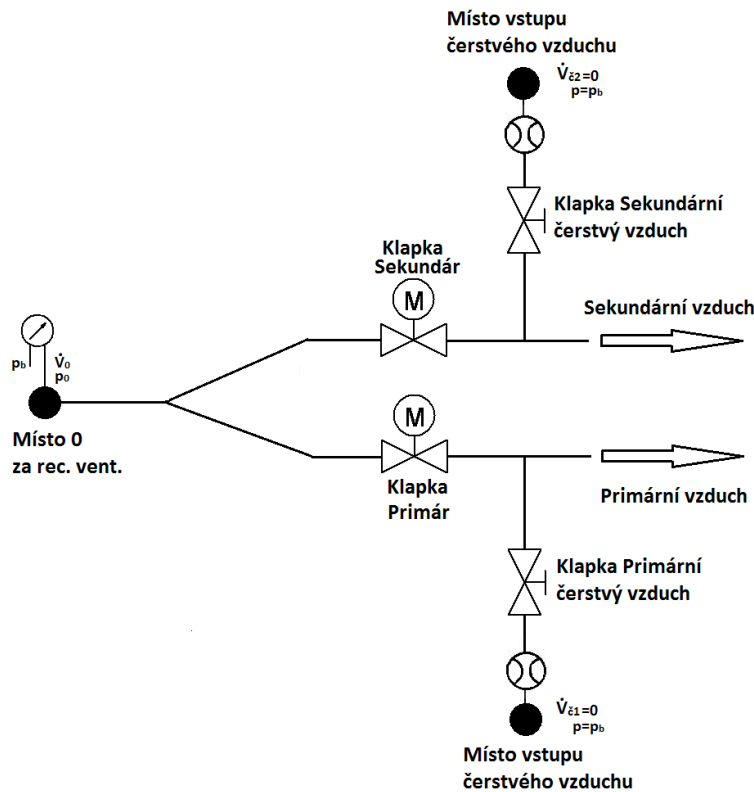


Obrázek 13-Přiřazení proměnných k uzlům a hranám

Pro lepší orientaci jsem si trať nakreslil jako sestavu uzlů a hran. Hrany jsou místa se stejným tlakovým potenciálem a s konstantním objemovým průtokem vzduchu. Uzly jsou místa změny veličin. Místa, kde dochází k tlakové ztrátě, k míchání více proudů vzduchu, nebo ke kombinaci obojího. Popsáním tlaku, průtoku a teploty jsem dostal úplnou informaci o proudícím médiu. Vzhledem k malým výškovým rozdílům tratě a nízké hustotě vzduchu a ještě nižší hustotě spalin, jsem potenciální složku energie zanedbal. Teplota má vliv především na hustotu plynu. Recirkulační trať se bude provozovat za ustálených podmínek spalování uvnitř kotle. Kotel pracuje při podmínkách, kdy je teplota spalin ustálená zhruba na 120 °C a do vstupů čerstvého vzduchu proudí vzduch o teplotě přibližně 20 °C. S těmito teplotami jsem v modelu pracoval a neuvažoval jsem jejich odchýlení od předepsaných hodnot. Vedení recirkulační tratě jsou krátká, proto jsem zanedbal přestup tepla z média do okolí. Protože považuji vzduch i spaliny za ideální nestlačitelnou tekutinu, zanedbal jsem vliv tlaku na hustotu média. Předpokládám nestlačitelnost média ve vedení tratě.

K vytvoření modelu jsem přistoupil systematicky. Vybral jsem si, nebo vytvořil místa, kde znám obě veličiny popisující stav média statický tlak a průtok. První místo, kde znám obě veličiny je vstup čerstvého vzduchu. Jde o místo s atmosférickým tlakem

a rychlostí proudění $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Znamená to, že na dvou vstupech vzduchu do trati znám charakteristiku proudu média. Další místo jsem zvolil za recirkulačním ventilátorem. Místo jsem označil indexem 0. Protože o statickém tlaku, ani rychlosti proudění v trubici za recirkulačním ventilátorem jsem nemohl s jistotou nic přepokládat, osadil jsem recirkulační trať senzoričkou.



Obrázek 14-Označení míst se známými a měřenými parametry

V místě 0 jsem připojil diferenciální tlakoměr, díky tlakoměru znám přesnou hodnotu statického tlaku. Ve výchozím místě 0 potřebuji znát ještě průtok média \dot{V}_0 . Nebylo možné postavit průtokoměr na principu žhaveného drátu přímo do cesty horkých spalin. Spaliny v místě 0 mají teplotu minimálně 120 °C, taková teplota je příliš vysoká. O průtoku v místě 0 vím, že je součtem průtoků spalin primární a sekundární automatickou klapkou.

Z míst recirkulační tratě se známými stavy jsem postupoval po jednotlivých hranách sítě přes uzly. Pro každý uzel jsem sestavil rovnice, které popisují změnu v uzlu pro popis charakteru průtoku média pro další hranu. Hrany jsem postupně popisoval jednu za druhou, až jsem popsal hranu před a za uzlem, který reprezentuje automatickou

klapku. Jednotlivé změny v uzlech jsou určeny tlakovými ztrátami klapek, smícháním a rozdělením proudů vzduchu.

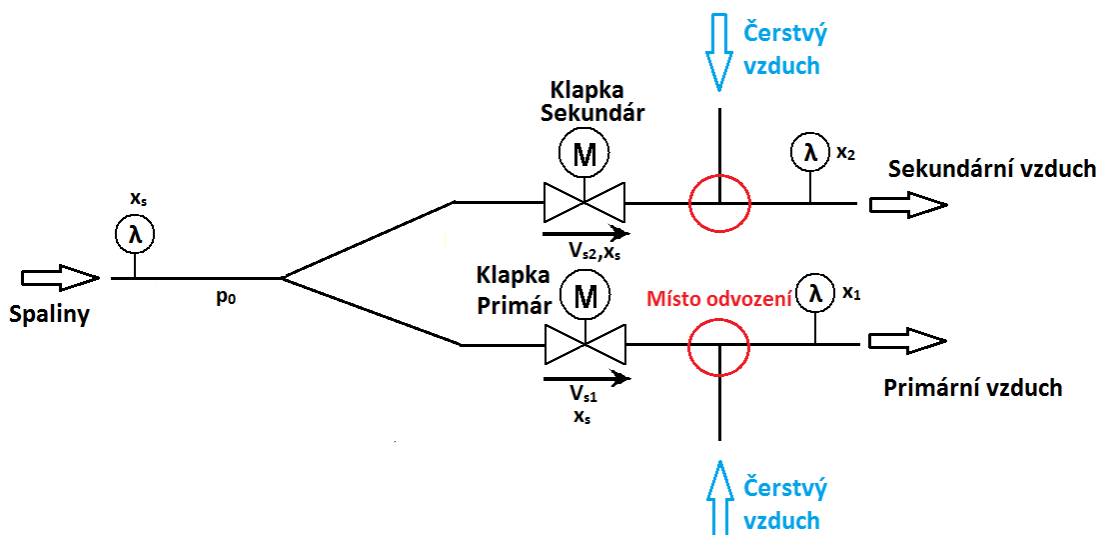
Změřil jsem jednotlivé prvky tratě v ustáleném stavu. Výsledky měření jsou statické charakteristiky pro jednotlivé členy tratě. Ztráty vedením jsem zanedbal, ztráty rozdělením a smícháním jsem zahrnul do místní ztráty nejbližší klapky. Výsledkem je úplný popis sítě, který mi umožní dopočítat poměrné otevření obou automatických klapek.

6.2 Výpočet tlakových ztrát a průtoků vzduchu

V následující kapitole jsem odvodil vzorce pro výpočet všech neměřených veličin vstupujících do modelu.

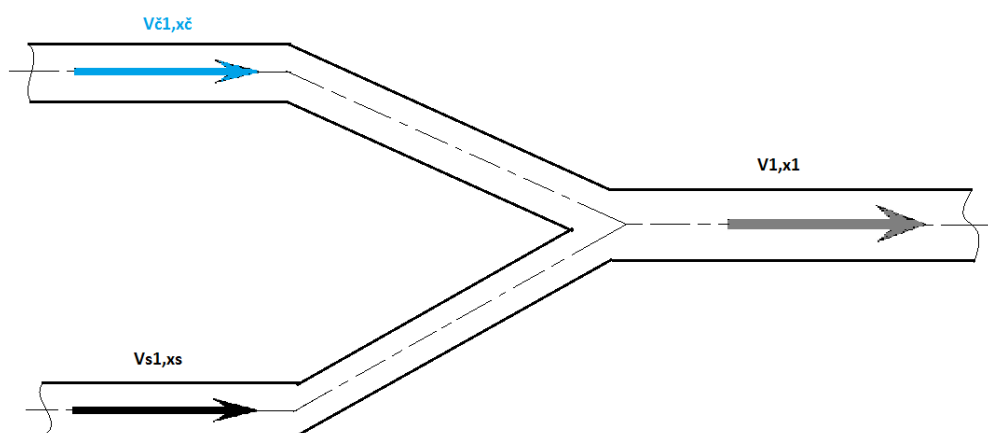
6.2.1 Výpočet průtoku spalin

Průtokoměry, které jsou k dispozici, nejsou stavěné, aby pracovaly v horkém vzduchu, kdy kromě rizika poškození dochází k nepřesnostem měření. Průtokoměry jsou umístěny za nasávacími otvory čerstvého vzduchu. Průtoky čerstvého vzduchu jsou měřeny přímo. Průtoky ve zbylých úsecích tratě dopočítávám z poměrů koncentrací kyslíku. Pro rozbor průtoků média je vhodné místo smíchání vzduchu, kde znám koncentrace kyslíku všech tří proudů, které se účastní smíšení. Místa smíchání pro primární a sekundární větev jsou označena červeně na obrázku 15.



Obrázek 15-Místa odvození bilance proudů médií

V následujících odstavcích jsem popsal princip výpočtu průtoků vzduchu z koncentrací.



Obrázek 16-Výpočet průtoku spalin z koncentrací

Pro obrázek 16 jsem si sestavil bilanční rovnice. Pro smíchání dvou proudů vzduchu o různé koncentraci sledované látky jsem vyjádřil dvě rovnice rovnici bilance průtoků (6.3) a rovnici bilance koncentrací (6.4). Spaliny a čerstvý vzduch mají odlišnou hustotu, rozdíl hustot je malý do 10 %. Pro zjednodušení výpočtu jsem rozdíl hustot zanedbal.

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_{\check{c}1} + \dot{V}_{s1} \quad (6.3)$$

$$\dot{V}_1 x_1 = \dot{V}_{\check{c}1} x_{\check{c}1} + \dot{V}_{s1} x_s \quad (6.4)$$

Jsem schopen vypočítat dvě neznámé. V mém případě byl neznámou průtok spalin primární automatickou klapkou \dot{V}_{s1} . Dosazením rovnice (6.3) do rovnice (6.4), dostanu vztah (6.5).

$$\dot{V}_{s1} = \dot{V}_{\check{c}1} \frac{x_{\check{c}} - x_1}{x_1 - x_s} \quad (6.5)$$

Pro průtok \dot{V}_{s2} platí podobná rovnice jako rovnice (6.5) s posunutými indexy (6.6).

$$\dot{V}_{s2} = \dot{V}_{\check{c}2} \frac{x_{\check{c}} - x_2}{x_2 - x_s} \quad (6.6)$$

Vypočítávat poměry proudění vzduchu z koncentrace kyslíku je nejjistější způsob. Problém tkví v tom, že údaje z lambda sond nejsou spolehlivé. Při nekvalitním měření koncentrace kyslíku se nabízí další způsob a to měřit teploty před a po smíchání proudů vzduchu. Vzorce by byly stejné s teplotou místo koncentrací. Nevýhoda určování směšovací poměrů z teploty je, že teplota funguje jako charakteristický ukazatel množství tepla. Teplo se vedením trati z média ztrácí do okolí, a také se jako forma energie zpracovává při stlačení nebo expanzi plynů. Na rozdíl od teploty se koncentrace v uzavřené soustavě neztrácí a nezávisí na délce vedení. Je možné zanedbat vliv místa odběru vzorku plynu k měření a považovat koncentraci za stálou.

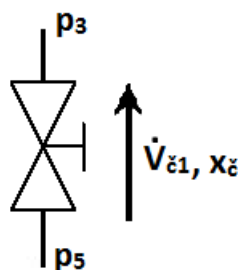
Proud vzduchu se ve vedení nikam neztrácí, proto vím, že průtok vzduchu ve výchozím bodu vedení je součtem vypočítaných průtoků spalin, které se přimíchávají v primární a sekundární větvi. Součet popisuje vztah (6.7).

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_{s1} + \dot{V}_{s2} \quad (6.7)$$

Teplotní ztrátu ve vedení jsem měřením stanovil přibližně na 10 °C na 1 m. Spaliny urazí mezi uvažovanými místy vzdálenost 1 až 1,5 m, proto jsem změnu objemu v rovnici neuvažoval.

6.2.2 Řešení průtoku proudu vzduchu klapkou

V cestě nasávání čerstvého vzduchu je umístěna klapka, která vyvolává tlakový spád. Klapka se před zahájením spalování nastavuje do pevně dané polohy.



Obrázek 17-Průtok pevně nastavenou klapkou

Pro ventil nebo klapku platí obecně vzorec (6.8) ze [12] str. 19.

$$\Delta p = k\dot{V}^2 \quad (6.8)$$

Tlaková ztráta armatury je závislá na koeficientu k příslušného regulačního prvku a druhé mocnině průtoku vzduchu \dot{V} . V koeficientu k je zahrnut průřez potrubí a místní ztráta klapky. Koeficient k je závislý na pevném otevření klapky.

Tlak označený na obrázku 17 jako tlak p_5 je v mém případě tlak barometrický. Po rozepsání vzorce (6.8) a dosazení konstanty pro danou klapku jsem dostal vztah (6.9).

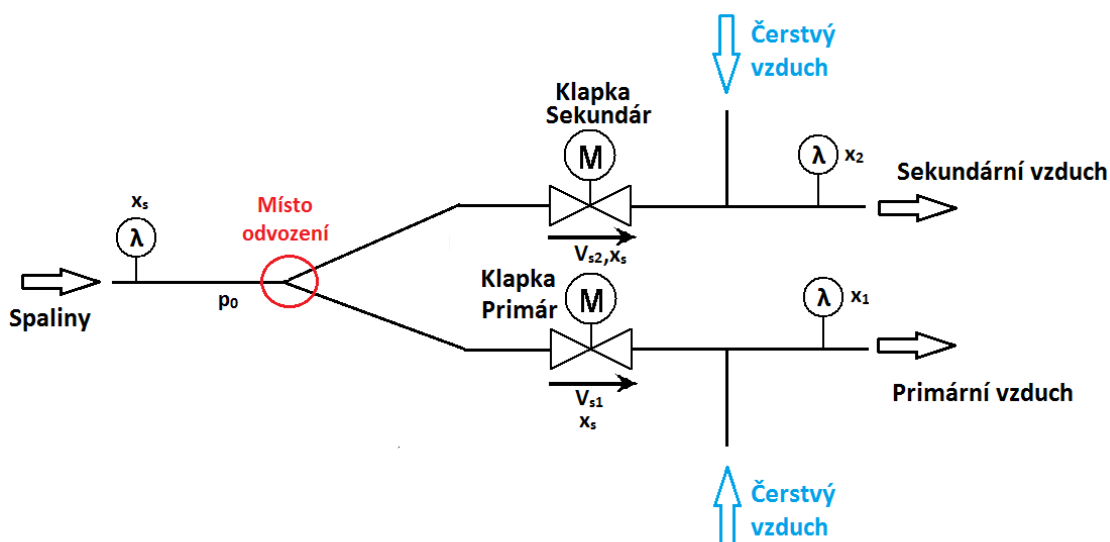
$$p_b - p_3 = k_{\zeta 1} \dot{V}_{\zeta 1}^2 \quad (6.9)$$

Ze vztahu (6.9) jsem vyjádřil neznámou p_3 . Vztah popisuje rovnice (6.10).

$$p_3 = p_b - k_{\zeta 1} \dot{V}_{\zeta 1}^2 \quad (6.10)$$

6.2.3 Řešení rozdělení proudu tekutiny na dva proudy

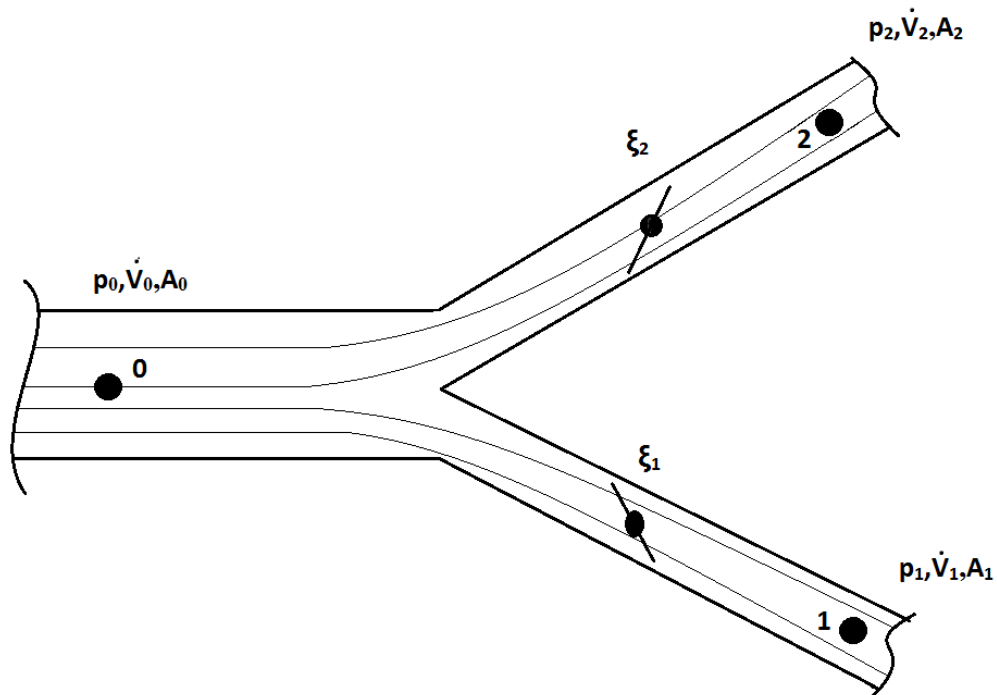
V recirkulační trati v místě za recirkulačním ventilátorem se rozděluje proud spalin do primárního a sekundárního vedení. Sekundární vedení je ve schématu namalováno nad primárním, protože i ve fyzickém provedení tratě je sekundární vzduch přiváděn do vyššího místa v topeništi, než primární vzduchu. Místo odvození rozdělení proudu spalin je zobrazeno na obrázku 18.



Obrázek 18-Schéma umístění rozdělení proudu spalin

Pro odvození jsem si vytyčil kontrolní objem tekutiny, který začíná před rozdělením a končí za automatickými klapkami. Vytyčený objem je zobrazen na

obrázku 19. Podle definice [5] Bernoulliho rovnice popisuje chování tekutiny podél proudnice. Nezáleží na hmotnostním průtoku tekutiny do jednotlivých větví po rozdělení. Záleží pouze na tom, jestli je rozdělení proudů tekutiny vyřešeno konstrukčně tak dobře, aby mezi místy před a po rozdělení procházela nepřetržená proudnice. Rozdělení proudu spalin je vyřešeno rozumným přechodem ve tvaru Y. Předpokládám, že proudnice mezi místy 0-2 a 0-1 prochází bez přetržení



Obrázek 19 Rozdělení proudu spalin

Médium proudící vedením považuji za ideální nestlačitelnou tekutinu, nehledě jedná-li se o vzduch, spaliny nebo jejich směs. U plynného média předpokládám turbulentní proudění i při nízkých rychlostech. Součinitel energie rychlosti $\kappa = 1$ a ve vztazích jsem ho neuváděl. Podle rozšířené formule Bernoulliho rovnice, ve které se vyskytují místní ztráty, jsem sestavil rovnici (6.11) mezi místem 0 a 1 v tlakové formě.

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho_0 v_0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 (1 + \zeta_1) \quad (6.11)$$

Hustota média se nezmění. Turbulentní proudění má téměř dokonale obdélníkový rychlostní profil a proto rychlosti nahradím jednoduše podílem objemového průtoku a průřezu.

$$v_0 = \frac{\dot{V}_0}{A_0}, v_1 = \frac{\dot{V}_1}{A_1}, \rho = \rho_0 = \rho_1 \quad (6.12), (6.13), (6.14)$$

Vztahy (6.12), (6.13), (6.14) jsem dosadil do Bernoulliho rovnice (6.11).

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho_0 \left(\frac{\dot{V}_0}{A_0}\right)^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho_1 \left(\frac{\dot{V}_1}{A_1}\right)^2 (1 + \zeta_1) \quad (6.15)$$

Úpravou vztahu (6.15) jsem vyjádřil člen součinitele místní ztráty primární automatické klapky zvětšeného o jedna $(1 + \zeta_1)$.

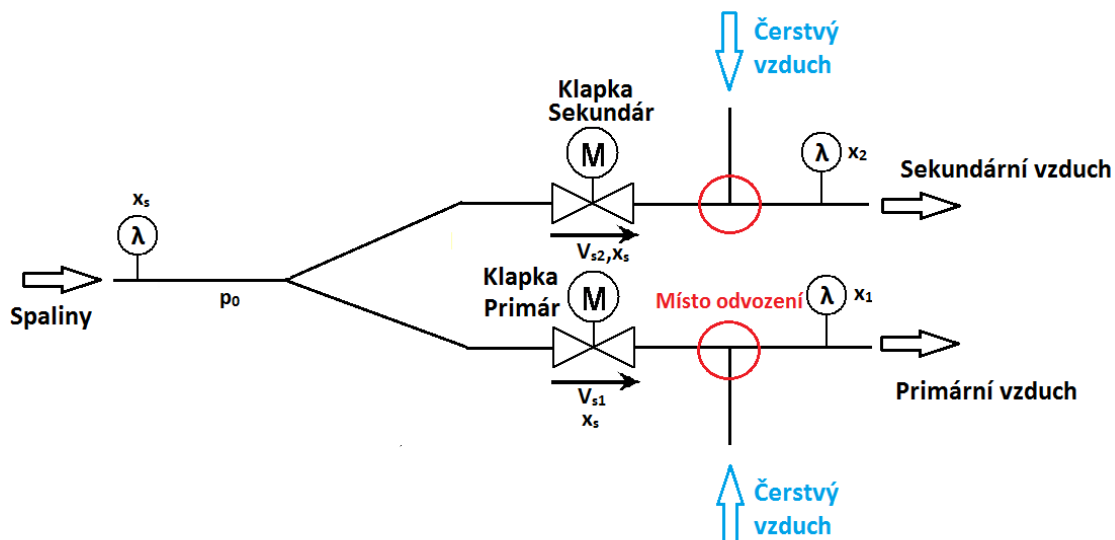
$$(1 + \zeta_1) = \left[\frac{2(p_0 - p_1)}{\rho} + \frac{\dot{V}_0^2}{A_0^2} \right] \frac{A_1^2}{\dot{V}_1^2} \quad (6.16)$$

Záměnou indexů ve vztahu (6.16) jsem dostal obdobný vztah pro zvětšený součinitel místní ztráty sekundární automatické klapky $(1 + \zeta_2)$.

$$(1 + \zeta_2) = \left[\frac{2(p_0 - p_2)}{\rho} + \frac{\dot{V}_0^2}{A_0^2} \right] \frac{A_2^2}{\dot{V}_2^2} \quad (6.17)$$

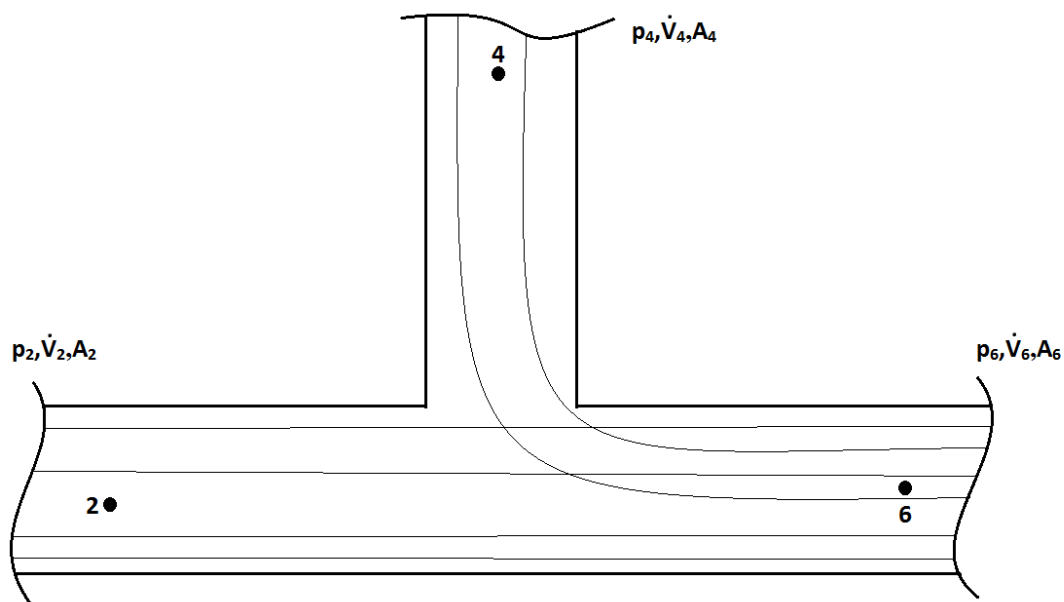
6.2.4 Řešení směšování proudů tekutin

Odvození smíšení dvou proudů odlišných tekutin provedu v místě označeném červeně na obrázku 20.



Obrázek 20-Schéma tratě pro odvození smíchání dvou proudů tekutin

Smíchání dvou proudů vzduchu má podobné vlastnosti jako rozdělení proudů tekutin. Pro splnění platnosti Bernoulliho rovnice je důležité udržet souvislou proudnici mezi místy popisu tekutiny.



Obrázek 21 Směšování dvou proudů tekutiny

Sestavil jsem Bernoulliho rovnice mezi místy 2-6 a 4-6 zobrazenými na obrázku 21. Místní ztráty a ztráty třením jsem zanedbal.

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 v_2^2 = p_6 + \frac{1}{2}\rho_6 v_6^2 \quad (6.18)$$

$$p_4 + \frac{1}{2}\rho_4 v_4^2 = p_6 + \frac{1}{2}\rho_6 v_6^2 \quad (6.19)$$

Rovnice (6.18) a (6.19) jsem spojil přes rovnosti pravých stran a rychlosti jsem nahradil podílem objemového průtoku a průřezu z rovnic (6.20), (6.21).

$$v_2 = \frac{\dot{V}_2}{A_2}, v_4 = \frac{\dot{V}_4}{A_4} \quad (6.20), (6.21)$$

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho_2 \left(\frac{\dot{V}_2}{A_2}\right)^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho_4 \left(\frac{\dot{V}_4}{A_4}\right)^2 \quad (6.22)$$

Z rovnice (6.22) jsem vyjádřil vztah pro p_2 , který je zapsán v rovnici (6.23).

$$p_2 = p_4 + \frac{1}{2} \left[\rho_4 \left(\frac{\dot{V}_4}{A_4}\right)^2 - \rho_2 \left(\frac{\dot{V}_2}{A_2}\right)^2 \right] \quad (6.23)$$

Vztah (6.23) s posunutými indexy platí stejně ve směšovacím uzlu primárního vedení vzduchu. Vztah popisuje rovnice (6.24).

$$p_1 = p_3 + \frac{1}{2} \left[\rho_3 \left(\frac{\dot{V}_3}{A_3}\right)^2 - \rho_1 \left(\frac{\dot{V}_1}{A_1}\right)^2 \right] \quad (6.24)$$

6.3 Spojení rovnic do matematicko-fyzikálního modelu

Ukázalo se být neuskutečnitelné měřit tlaky v absolutních hodnotách v takové přesnosti, ve které se pohybují změny tlaku v trati. Řešením bylo použít diferenciální tlakoměr, který dosahuje vysoké přesnosti při měření malých tlakových rozdílů. K dispozici jsem měl diferenciální tlakoměr s rozsahem 0 až 250 Pa. Tlakoměr bylo možné nainstalovat do tratě na takové místo, že vznikl měřený údaj Δp_m , který popisuje

tlakový rozdíl mezi místem za recirkulačním ventilátorem a atmosférickým tlakem, viz rovnice (6.25).

$$\Delta p_m = (p_0 - p_b) \quad (6.25)$$

Bylo třeba ověřit, jestli mi tento údaj o tlaku stačí, abych byl schopen dopočítat potřebné otevření klapky. Postupně jsem do sebe dosazoval odvozené rovnice tak, abych odstranil všechny proměnné tlaku. Moji snahou bylo, aby mi zbyl jediný tlakový člen obsahující tlak ve tvaru $(p_0 - p_b)$.

Odvodil jsem všechny potřebné rovnice tlakových uzlů. Rovnice systematicky dosadil do sebe postupně tak, jak na sebe navazují v recirkulační trati.

Následují rovnice, které jsem odvodil sepsané pod sebou.

$$p_3 = p_b - k_{\zeta 1} \dot{V}_{\zeta 1}^2 \quad (6.26)$$

$$p_1 = p_b - k_{\zeta 1} \dot{V}_{\zeta 1}^2 + \frac{1}{2} \left[\rho_3 \left(\frac{\dot{V}_3}{A_3} \right)^2 - \rho_1 \left(\frac{\dot{V}_1}{A_1} \right)^2 \right] \quad (6.27)$$

$$(1 + \zeta_1) = \left[\frac{2(p_0 - p_1)}{\rho_0} + \frac{\dot{V}_0^2}{A_0^2} \right] \frac{A_1^2}{\dot{V}_1^2} \quad (6.28)$$

$$(1 + \zeta_1) = \left[\frac{2\Delta p_m + 2k_{\zeta 1} \dot{V}_{\zeta 1}^2 - \rho_3 \left(\frac{\dot{V}_3}{A_3} \right)^2 + \rho_1 \left(\frac{\dot{V}_1}{A_1} \right)^2}{\rho_0} + \frac{\dot{V}_0^2}{A_0^2} \right] \frac{A_1^2}{\dot{V}_1^2} \quad (6.29)$$

Rovnici (6.28) se mi dosazením rovnic (6.27) a (6.26) podařilo upravit přímo tak, aby obsahovala člen $(p_0 - p_b)$, který jsem nahradil symbolem Δp_m . Z rovnice (6.29) je zřejmé, že k určení místní ztráty klapky mi stačí jediný měřený údaj tlaku.

V rovnici (6.29) se objevují čtyři průtoky vzduchu. Průtok \dot{V}_3 z rovnic jsem odstranil dosazením vztahu (6.30). Průtok \dot{V}_0 je výstupem bloku v Simulinku.

Průtok čerstvého vzduchu odpovídá průtoku $\dot{V}_{\zeta 1}$ v uzlu 3 ze schématu odvození (Obrázek 12).

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_{\zeta_1} \quad (6.30)$$

Po dosazení rovnice (6.30) do rovnice (6.29) a zjednodušení jsem dostal výsledný vztah (6.31) pro výpočet zvětšené místní ztráty primární automatické klapky.

$$(1 + \zeta_1) = \left[\frac{2\Delta p_m + \dot{V}_{\zeta_1}^2 \left(2k_{\zeta_1} - \frac{\rho_3}{A_3} \right)^2}{\rho_0} + \frac{\dot{V}_0^2}{A_0^2} \right] \frac{A_1^2}{\dot{V}_1^2} + \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (6.31)$$

7 Proměření statických charakteristik klapek

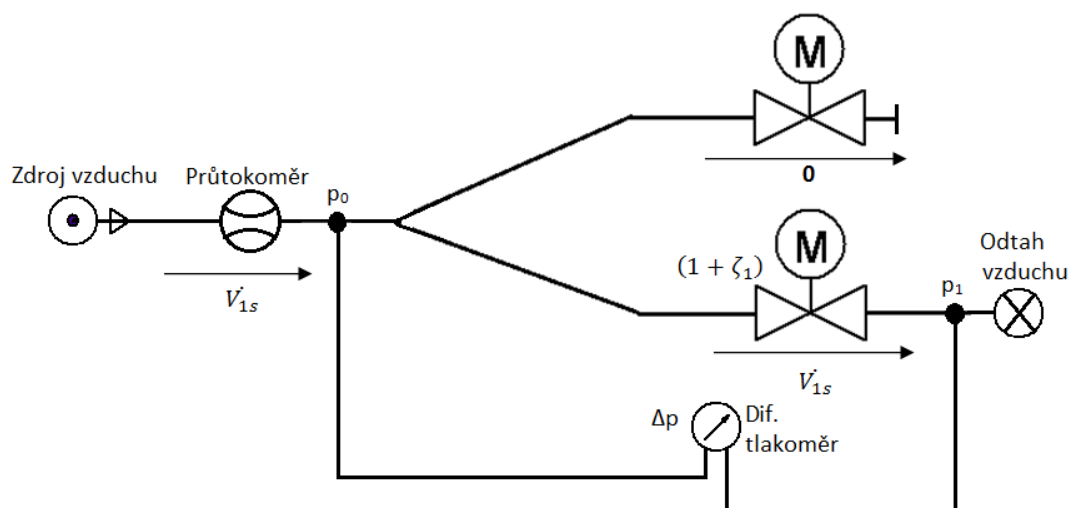
7.1 Měření automatických klapek na přívodu spalin z komína

Při měření automatických klapek nešlo použít vztah (6.8). Vedení spalin před klapkou není rovné dostatečnou délkou, aby bylo možné měřit statický tlak. Vhodné místo pro odběr statického tlaku je takové, kde se proudění ustálí po celé ploše průřezu vedení. Místo s rovnou částí vedení je v recirkulační trati za recirkulačním ventilátorem. Kvůli lokaci místa odběru statického tlaku jsem musel vliv klapky na proud spalin vyjádřit jako místní ztrátu, kde je zahrnuto i rozdělení proudu spalin.

Provedl jsem měření statických charakteristik všech čtyř klapek, dvou automatických a dvou ručních. Jak bylo zmíněno výše, do charakteristik automatických klapek zahrnuji ztrátu z prvního rozdělení spalin do primární a sekundární větve. Měření jsem provedl s nezapáleným kotlem. Protékajícím médiem byl vzduch o teplotě 20 °C. Měření jsem provedl pro primární a sekundární klapku zvlášť. Do měřené větve jsem vložil průtokoměr. Do míst, mezi kterými mě zajímá úbytek tlaku, jsem zapojil diferenciální tlakoměr.

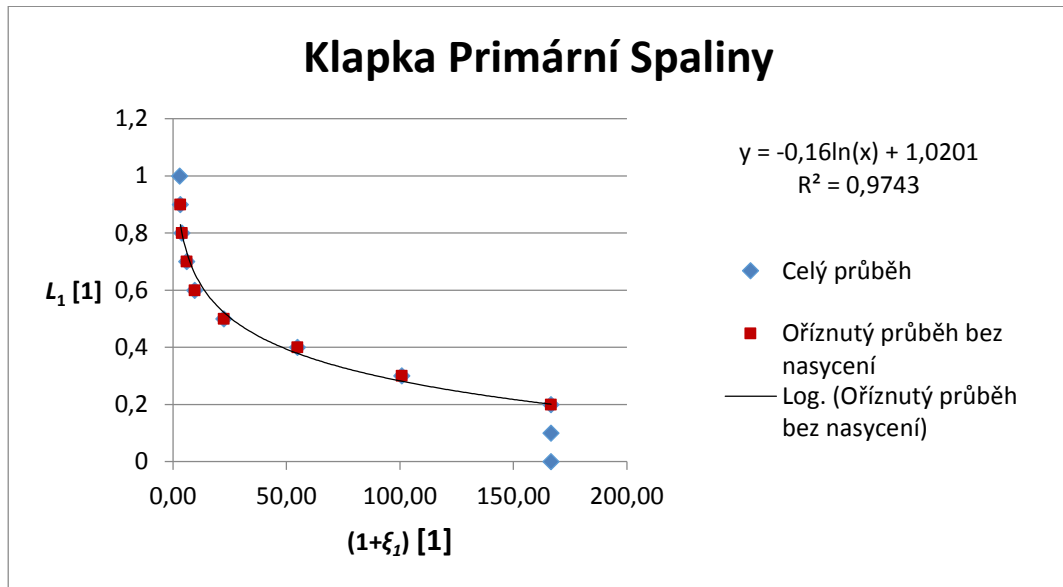
7.1.1 Primární automatická klapka ve větvi spalin

Schéma měření závislosti místní ztráty primární automatické klapky na otevření je znázorněno na obrázku 22.



Obrázek 22-Schéma měření stat. charakteristik primární spalinové větve

Naměřené hodnoty jsem zanesl do grafu 1 a proložil je křivkou, která nejlépe představuje průběh naměřených hodnot.



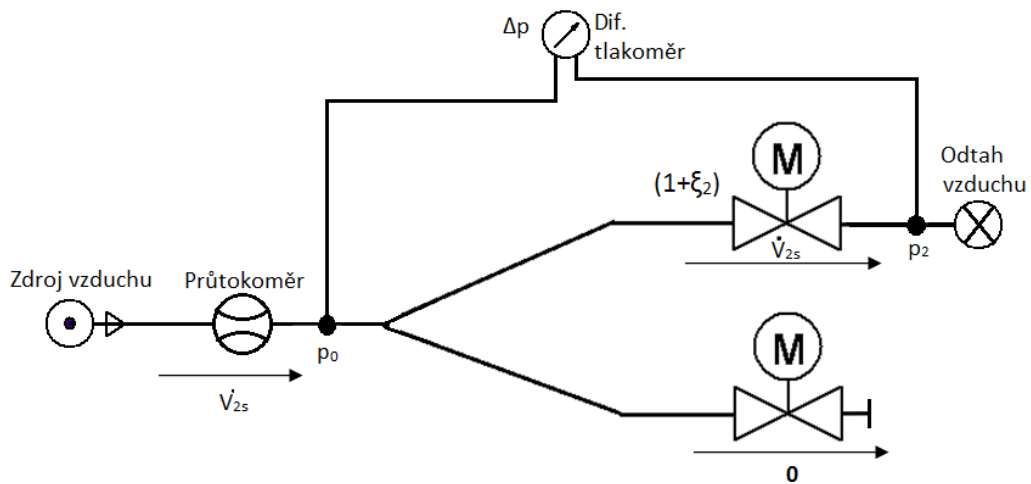
Graf 1-Statická charakteristika primární automatické klapky

Průběhu hodnot závislosti místní ztráty na otevření klapky nejlépe odpovídal přirozený logaritmus s rovnicí (7.1).

$$L_1 = -0,16\ln(1 + \zeta_1) + 1,0201 \quad (7.1)$$

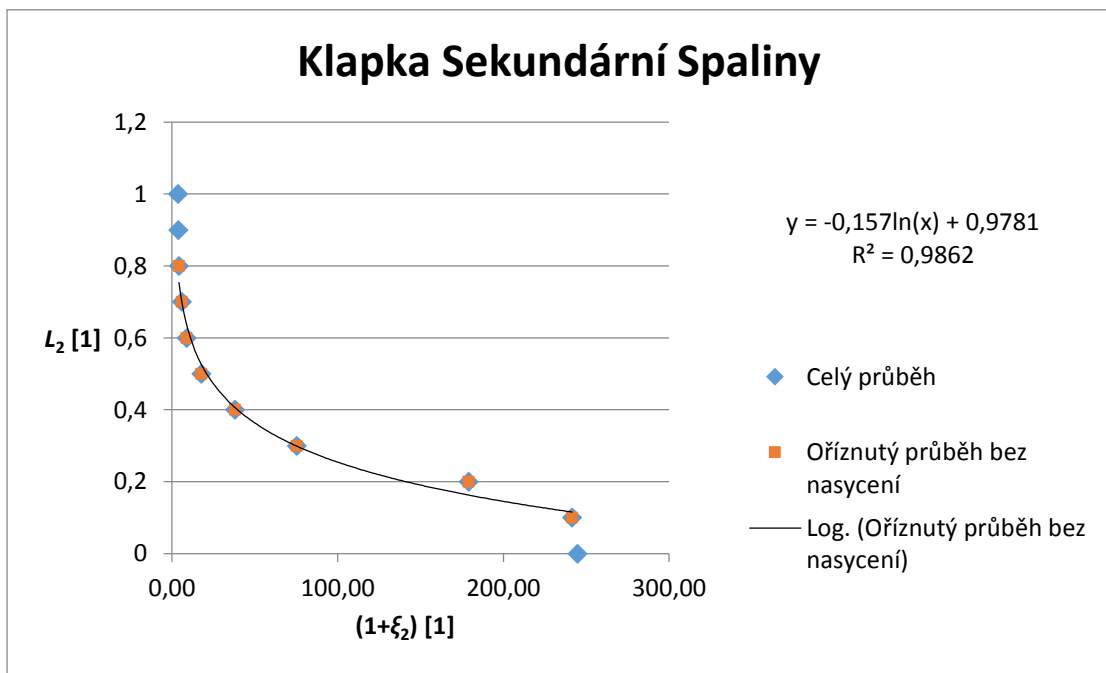
7.1.2 Sekundární automatická klapka ve větvi spalin

Schéma měření závislosti místní ztráty sekundární automatické klapky na otevření je znázorněno na obrázku 23.



Obrázek 23-Schéma měření stat. charakteristik sekundární spalínové větve

Výsledky měření jsem zanesl do grafu 2. Závislostí jsem proložil funkci, která nejlépe odpovídala naměřenému průběhu.



Graf 2-Statická charakteristika sekundární automatické klapky

Výsledný vztah závislosti místní ztráty sekundární klapky na otevření popisuje rovnice (7.2). Výsledný vztah je podobný, jako u klapky v primárním vedení. Tato skutečnost poukazuje na správný výsledek měření, protože by se mělo jednat o identické klapky.

$$L_2 = -0,157\ln(1 + \zeta_1) + 0,9781 \quad (7.2)$$

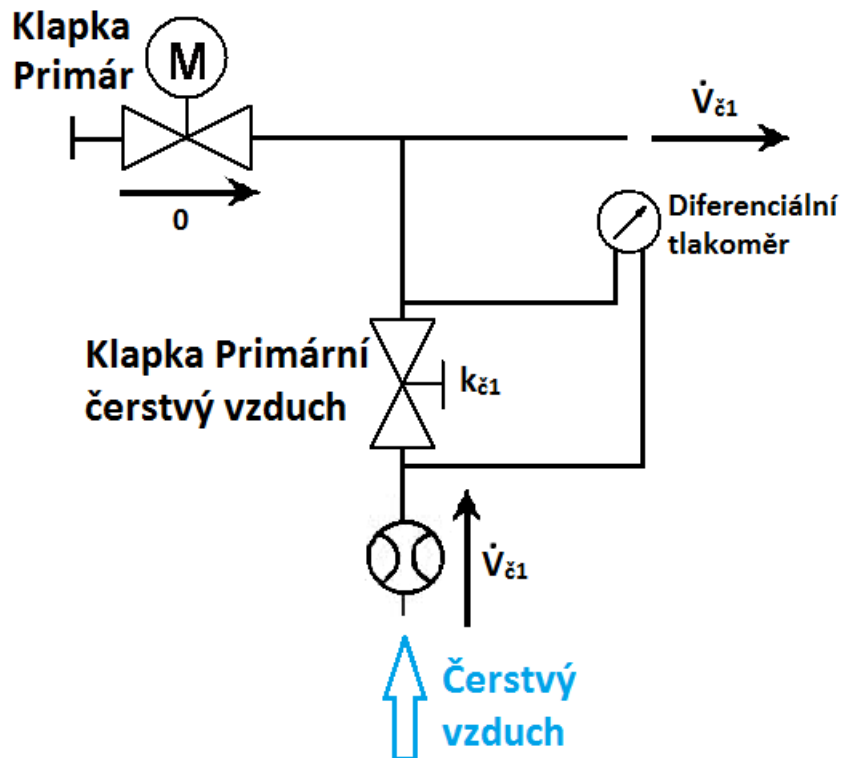
7.2 Měření klapky na přívodu čerstvého vzduchu

U klapky na vstupech čerstvého vzduchu není potřeba počítat s místní ztrátou, protože nedochází k rozdělení proudů média. Stačí stanovit koeficient k klapky dle již výše zmíněné rovnice (6.8). Koeficient klapky je závislý na relativním otevření klapky $L_{\check{c}1}$ a $L_{\check{c}2}$.

$$\Delta p = k\dot{V}^2 \quad (6.8)$$

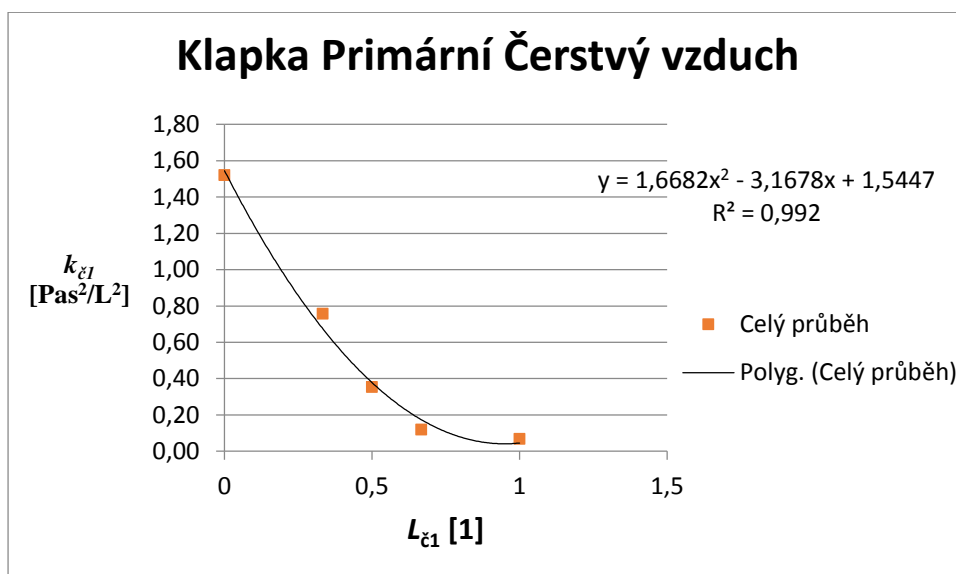
7.2.1 Klapka ve větvi čerstvého primárního vzduchu

Nejprve provedu měření klapky čerstvého vzduchu v primární větvi. Měření jsem navrhl a provedl dle schématu na obrázku 24.



Obrázek 24- Schéma měření stat. charakteristiky klapky čerstvého primárního vzduchu

U klapky na přívodu čerstvého vzduchu překonává proud vzduch při vstupu do tratě tlakovou ztrátu klapky. Na rozdíl od automatických klapky nevyočítávám jejich otevření, ale koeficient k v závislosti na otevření klapky. Otevření klapky se nastavuje ručně a nemění se po celou dobu pokusu.



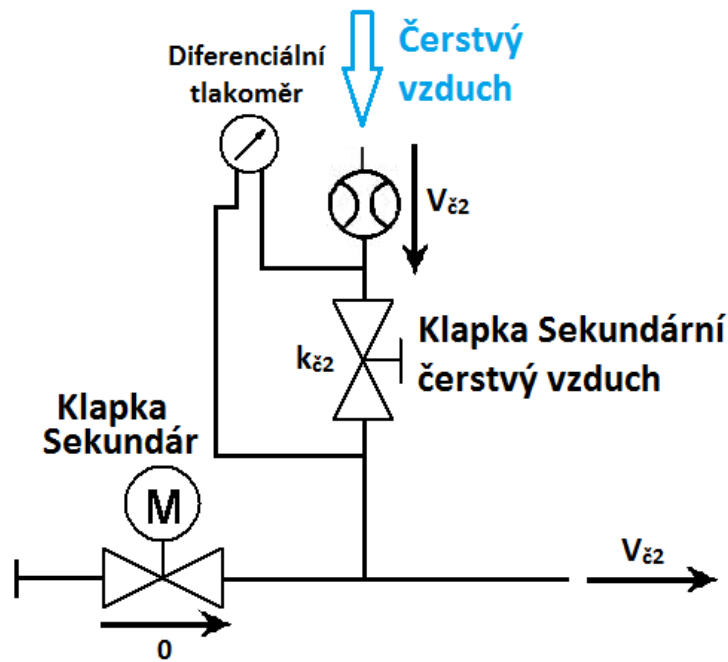
Graf 3- Statická charakteristika klapky čerstvého primárního vzduchu

Výsledkem je rovnice (7.3) vyjadřující závislost koeficientu klapky $k_{\check{c}1}$ na otevření. Koeficient je konstanta určující přepočítání mezi tlakovou ztrátou a průtokem klapkou.

$$k_{\check{c}1} = 1,668L_{\check{c}1}^2 - 3,168L_{\check{c}1} + 1,545 \quad (7.3)$$

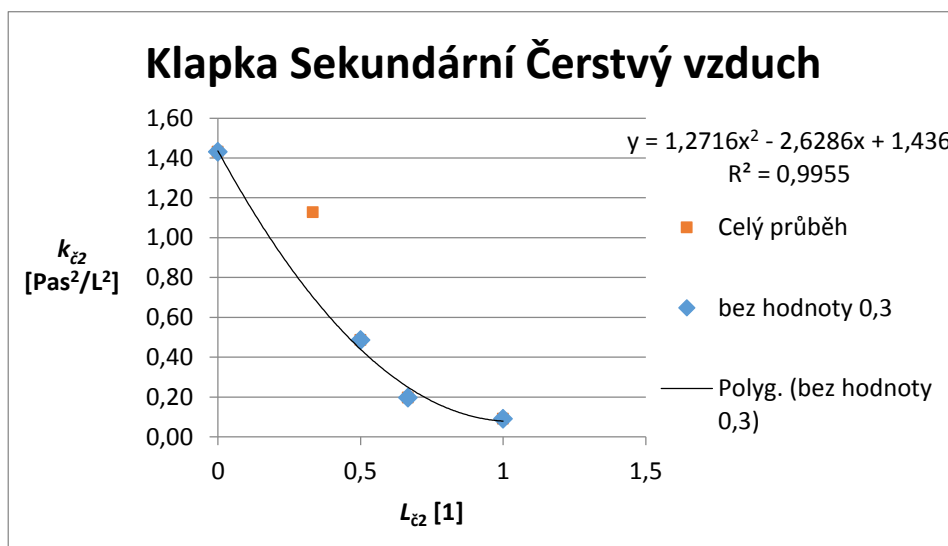
7.2.2 Klapka ve větvi čerstvého sekundárního vzduchu

Obdobné měření jako v případě klapky ve větvi primárního čerstvého vzduchu jsem provedl pro klapku sekundárního čerstvého vzduchu. Hledám koeficient $k_{\check{c}2}$. Schéma měření je zobrazeno na obrázku 25.



Obrázek 25- Schéma měření stat. charakteristiky klapky čerstvého sekundárního vzduchu

Výsledky měření jsem zanesl do grafu 4. Vytvořil jsem spojnicí trendu a zjistil jsem, že jeden bod měření z ní vyčnívá. Tuto poruchu přisuzuji chybě měření. Při výpočtu spojnicí trendu jsem tento bod z výpočtu vyškrtнул.



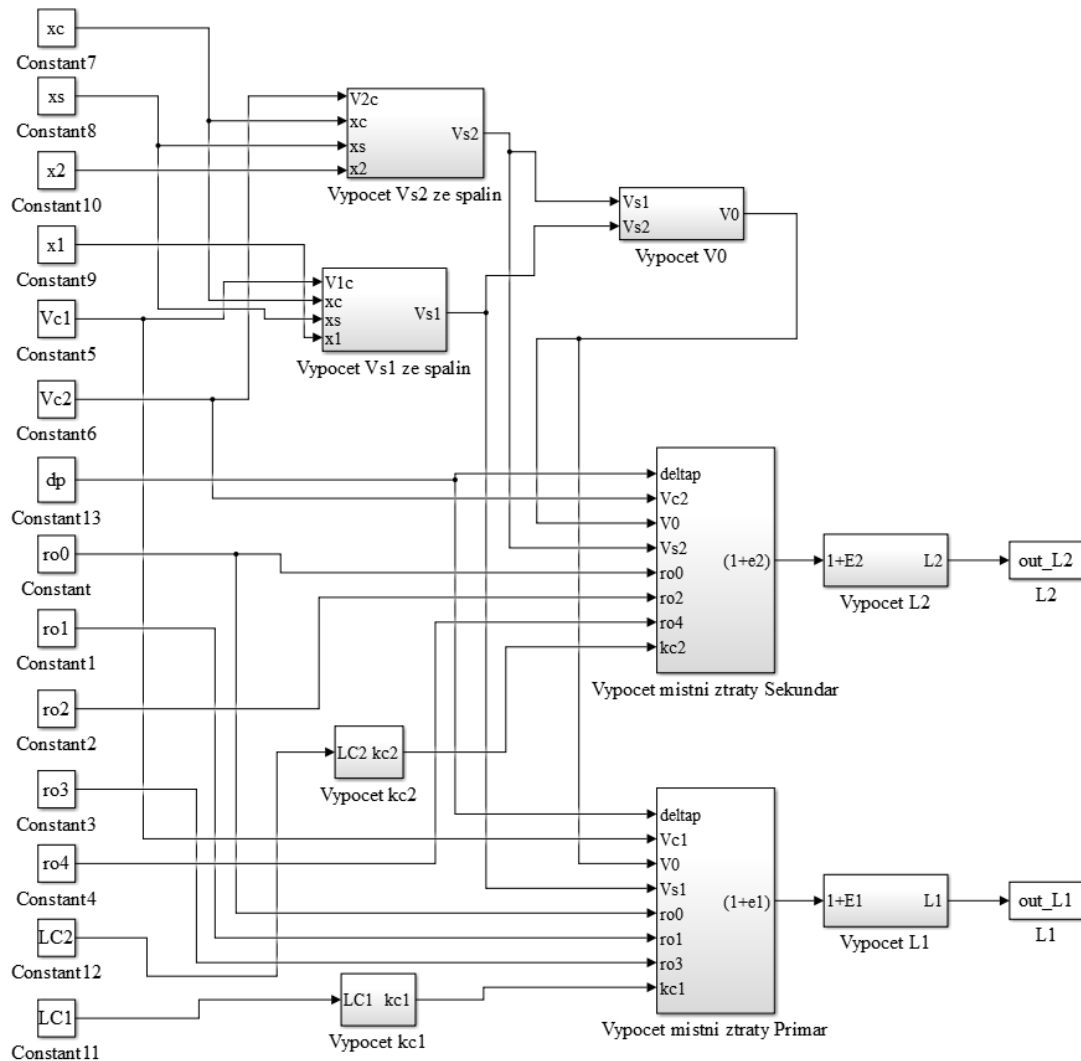
Graf 4-Statická charakteristika klapky čerstvého sekundárního vzduchu

Výsledná rovnice (7.4) pro výpočet koeficientu $k_{\check{c}2}$.

$$k_{\check{c}2} = 1,272L_{\check{c}2}^2 - 2,629L_{\check{c}2} + 1,346 \quad (7.4)$$

8 Spojení odvozených rovnic se statickými charakteristikami jednotlivých prvků recirkulační tratě

Matematický model je zobrazen na obrázku 26 jako blokové schéma. Každý blok reprezentuje rovnici. Každý blok má jeden či více vstupů a jeden výstup. Model je statický, neobsahuje derivace proměnných. Dynamická data vytváří změny vstupních veličin v čase.



Obrázek 26-Blokové schéma modelu v Simulinku

Níže uvádím soupis rovnic, které jsem odvodil. Jedná se o soupis rovnic, kde každá představuje jeden blok ve schématu na obrázku 26.

Výpočet \dot{V}_{s1} ve spalínách.

$$\dot{V}_{s1} = \dot{V}_{\check{c}1} \frac{x_{\check{c}} - x_2}{x_1 - x_s} \quad (6.5)$$

Výpočet \dot{V}_{s2} ve spalínách.

$$\dot{V}_{s2} = \dot{V}_{\check{c}2} \frac{x_{\check{c}} - x_2}{x_2 - x_s} \quad (6.6)$$

Výpočet \dot{V}_0 .

$$\dot{V}_0 = \dot{V}_{s1} + \dot{V}_{s2} \quad (6.7)$$

Výpočet $k_{\check{c}1}$.

$$k_{\check{c}1} = 1,668L_{\check{c}1}^2 - 3,168L_{\check{c}1} + 1,545 \quad (7.3)$$

Výpočet $k_{\check{c}2}$.

$$k_{\check{c}2} = 1,272L_{\check{c}2}^2 - 2,629L_{\check{c}2} + 1,346 \quad (7.4)$$

Výpočet místní ztráty primární automatické klapky.

$$(1 + \zeta_1) = \left[\frac{2\Delta p_m + \dot{V}_{\check{c}1} \left(2k_{\check{c}1} - \frac{\rho_3}{A_3^2} \right)}{\rho_0} + \frac{\dot{V}_0^2}{A_0^2} \right] \frac{A_1^2}{\dot{V}_{s1}^2} + \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (6.31)$$

Výpočet místní ztráty sekundární automatické klapky je vztah (6.31)

s posunutými indexy.

$$(1 + \zeta_2) = \left[\frac{2\Delta p_m + \dot{V}_{\check{c}2} \left(2k_{\check{c}1} - \frac{\rho_4}{A_4^2} \right)}{\rho_0} + \frac{\dot{V}_0^2}{A_0^2} \right] \frac{A_2^2}{\dot{V}_{s2}^2} + \frac{\rho_2}{\rho_0} \quad (8.1)$$

Výpočet L_1 .

$$L_1 = -0,16 \ln(1 + \zeta_1) + 1,0201 \quad (7.1)$$

Výpočet L_2 .

$$L_2 = -0,157 \ln(1 + \zeta_1) + 0,9781 \quad (7.2)$$

9 Nastavení senzorů

9.1 Kalibrace průtokoměrů

Do recirkulační tratě byly zapojeny snímače rychlosti proudění SNP od firmy Sensit s.r.o. (obrázek 27). Jedná se o rychloměry se žhaveným drátkem. Senzor je v přímém styku s médiem. Proto je kladen důraz na rozsah pracovní teploty senzoru, které se pohybuje od -30 do 70 °C. Rychloměry nemůžou měřit proudění spalin, ale musí být zařazeny do části vedení, kde se nasává vzduch o teplotě okolí.

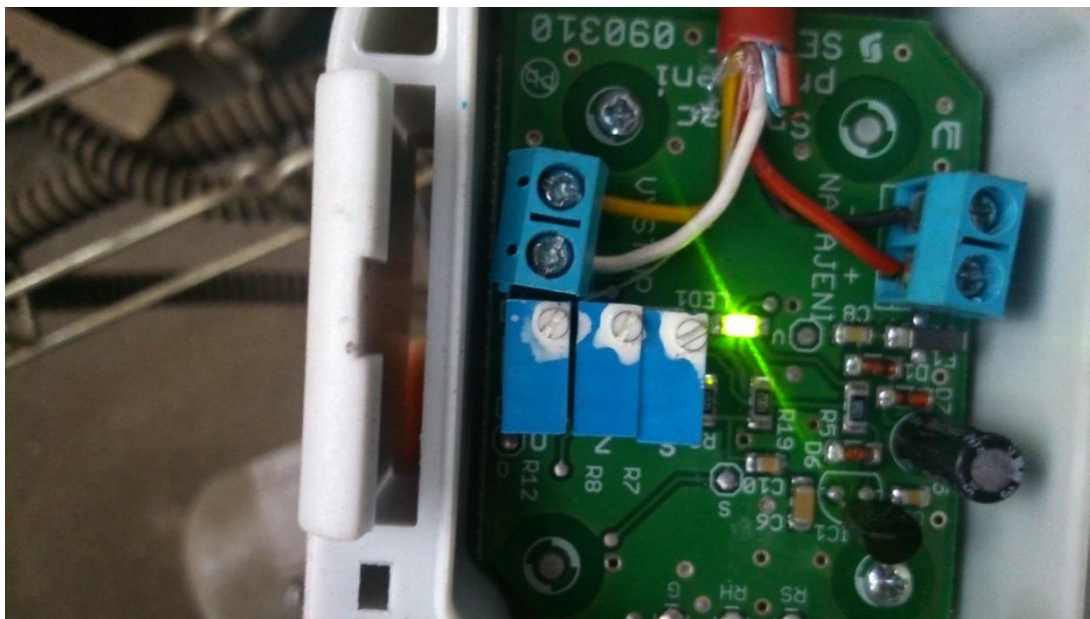
Rychloměry jsou od výrobce nastaveny na rozsah rychlostí 0 až 40 $\frac{m}{s}$. Údaj o rychlostech je zpracován do analogového napěťového výstupu v intervalu 0 až 10 V. Závislost napěťového výstupu na rychlosti proudění je nelineární a její lineárnější část byla továrně nastavena pro vyšší citlivost v horní polovině rozsahu senzoru. Za uspokojivě přesné můžeme tedy považovat hodnoty, které spadnou do rozmezí rychlosti proudění 20 až 40 $\frac{m}{s}$.

Rychlosti proudění v recirkulační trati se za běžných provozních podmínek pohybují v rozsahu 0 až 15 $\frac{m}{s}$. Rozsah rychlostí je tudíž pro mou aplikaci příliš veliký.



Obrázek 27-Snímač rychlosti

Rychloměry uvnitř obsahují tři otočné trimry, dva pro vyvážení můstků a jeden pro nastavení zesílení výstupního operačního zesilovače, viz obrázek 28.



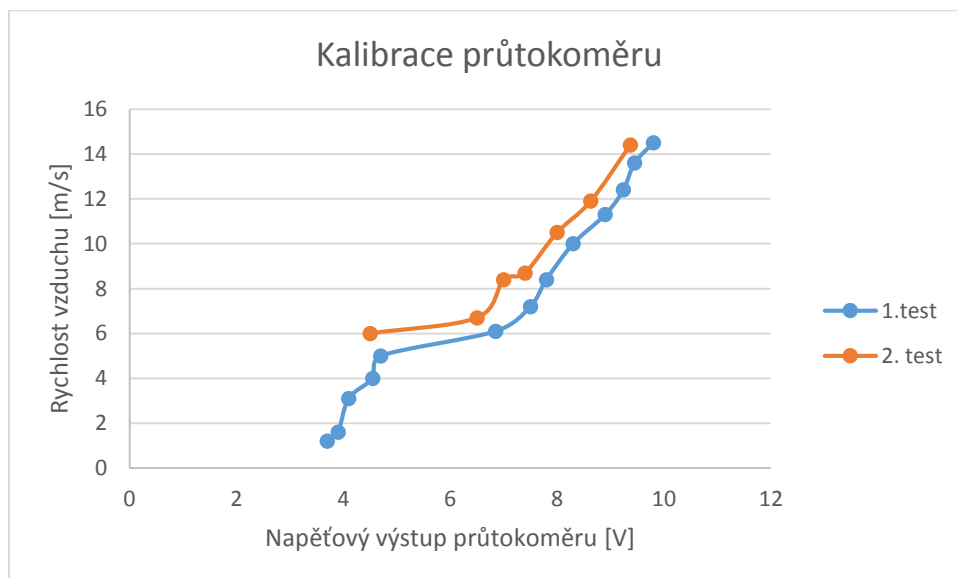
Obrázek 28-Trimry průtokoměru

Senzory jsem nastavoval na testovací trati proudění vzduchu. Referenční rychlost jsem měřil přenosným ručním anemometrem. Nastavil jsem v měřicí trati rychlost proudění přibližně $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Otáčel jsem prostředním trimrem Z pro úpravu rozsahu, dokud jsem na multimetru nezměřil hodnotu pod 10 V. Nechal jsem trimr na nastavené hodnotě rozsahu a postupně jsem provedl měření pro různé rychlosti proudění v rozsahu 0 až $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Tabulka 1-Kalibrace rychloměru

Kalibrace rychloměrů			
1. měření		2. měření	
Anemometr [m/s]	Rychloměr [V]	Anemometr [m/s]	Rychloměr [V]
14,5	9,8	14,4	9,37
13,6	9,45	11,9	8,63
12,4	9,24	10,5	8
11,3	8,9	8,7	7,4
10	8,3	8,4	7
8,4	7,8	6,7	6,5
7,2	7,5	6	4,5
6,1	6,85		
5	4,7		
4	4,55		
3,1	4,1		
1,6	3,9		
1,2	3,7		

Měření odhalilo nepříjemnou vlastnost rychloměrů a to je, kdy přibližně v polovině rozsahu dojde k napět'ovému skoku o 2 V a zploštění výstupní charakteristiky. Graf 5 zobrazuje body měření proložené křivkou. Mezi rychlostí proudění 6 a 8 $\frac{m}{s}$ je viditelný pokles a následná nízká citlivost senzoru v oblasti rychlosti proudění 4 až 6 $\frac{m}{s}$.



Graf 5-Průběh měření při kalibraci rychloměru

Při opakovaném měření se stejným nastavením senzoru se objevil další nepříznivý jev a to ten, že se výstupní charakteristiky nepřekrývají, tedy že je výstup senzoru časově nestálý i ve velmi krátkém časovém rozestupu. Měření jsem prováděl v rozsahu dvou hodin. Senzory jsou pro měření rychlosti proudění v kotli nepoužitelné. Rychlost proudění ve vedení se pohybuje v celém rozsahu 0 až 15 $\frac{m}{s}$. Recirkulační trať se běžně provozuje s rychlostmi proudění 2 až 8 $\frac{m}{s}$. Tedy v oblasti, kde se nalézá napět'ový skok a charakteristika vykazuje téměř nulovou citlivost senzoru.

9.2 Lambda sondy

Úzkopásmové lambda sondy pracují tak, že při dosažení definovaného přebytku kyslíku v plynu obvykle $\lambda = 1$, změní hodnotu logického signálu.

Na kotli jsou namontovány širokopásmové lambda sondy. Širokopásmové lambda sondy obsahují dva oddělené články, jeden měřicí a jeden pumpovací. Uvnitř lambda sondy je detekční komora. Do detekční komory se odebere vzorek plynu a

pumpovací článek přečerpává kyslík do detekční komory, dokud se nedosáhne přebytku kyslíku $\lambda = 1$. Měřicí obvod se sepne a odečte se hodnota proudu potřebná ke kompenzaci přebytku kyslíku. Širokopásmová lambda sonda je schopna měřit i nedostatek kyslíku. Napsáno podle zdroje [13].

Vyhodnocovací jednotky od společnosti Fiedler jsou navrženy tak, že je omezená spodní hodnota rozsahu lambda sondy, kterou je zařízení schopno měřit. U vyhodnocovacích jednotek lambda sond namontovaných na kotli je tato spodní hranice kolem 7 až 8 % kyslíku ve směsi.

9.2.1 Kalibrace lambda sond

Kotel obsahuje tři lambda sondy, kalibroval jsem dvě z nich, ty které jsou určeny k měření koncentrace kyslíku primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. Spolu s lambda sondami je společností Fiedler dodávaná vyhodnocovací jednotka. Při spuštění senzorky, když není kotel zapálen, by se měla zobrazovat hodnota 21,1 % kyslíku. Koncentrace kyslíku, která odpovídá poměrům v běžném atmosférickém vzduchu.

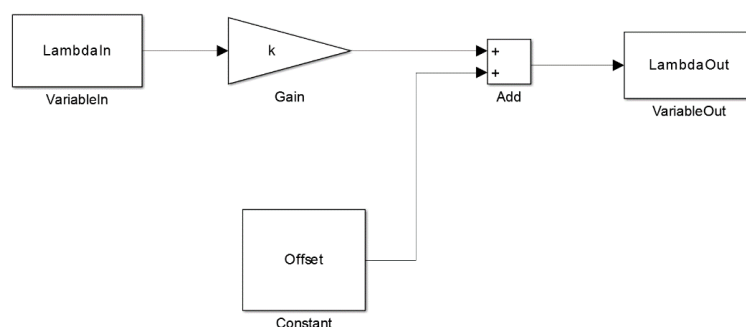
Je očividné, že lambda sondy mají posunuté stupnice. Při zapnutí senzorů a vystavení sondy čerstvému vzduchu ukazují hodnoty koncentrace 18,6 a 20 % kyslíku.

Vyhodnocovací jednotky lambda sond zpracovávají signál a posílají do PLC hodnotu koncentrace kyslíku v procentech ve formě napětového signálu. Vyhodnocovací jednotky jsou přímo propojeny s původním PLC od Siemensu. Do vyhodnocovací jednotky a komunikace lambda sond s PLC není možné zasáhnout.

Zvolil jsem řešení, kdy programově uvnitř Simulinku upravuji hodnotu výstupů na správné hodnoty. Předem jsem předpokládal přímkový průběh hodnot a připravil jsem si kompenzaci v podobě rovnice (9.1).

$$\lambda_n = k_\lambda \tilde{\lambda}_m + \lambda_{os} \quad (9.1)$$

Blokové schéma zpracování signálu v Simulinku je znázorněno na obrázku 29.



Obrázek 29-Nastavení přepočtu lambda sond

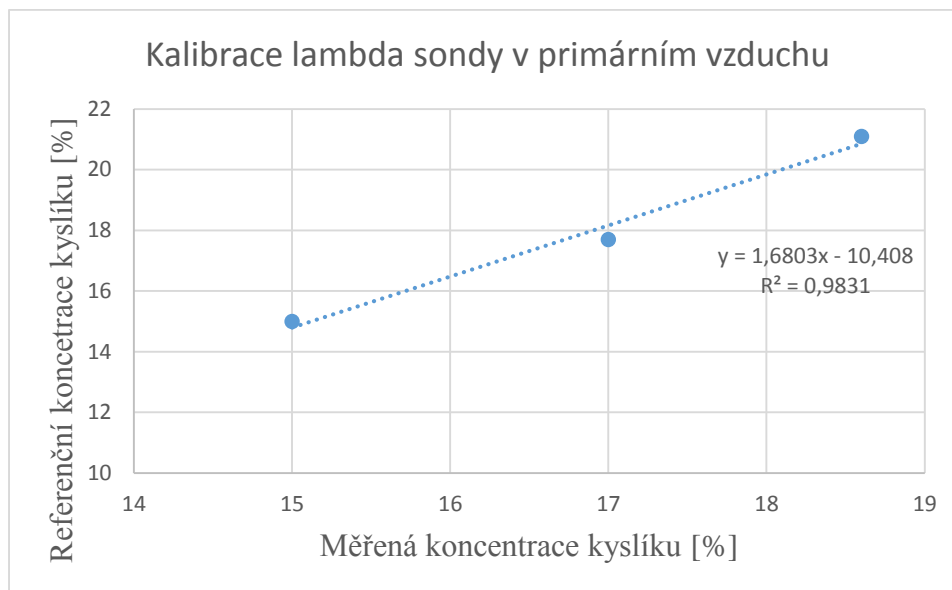
Provedl jsem měření přenosným analyzátozem spalin během experimentu, při kterém se měnily koncentrace kyslíku v proudícím plynu. Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 2.

Tabulka 2-Kalibrace lambda sond

Kalibrace lambda sond			
Koncentrace kyslíku primárního vzduch		Koncentrace kyslíku sekundárního vzduch	
referenční	měřená	referenční	měřená
[%]	[%]	[%]	[%]
21,1	18,6	21,1	20
17,7	17	17,7	17,7
15	15	14,9	14,4

Naměřené hodnoty jsem vynesl do grafu, ve kterém jsem vygeneroval přímku lineární regrese (graf 6 a graf 7). Výsledné hodnoty sklonu přímky k_λ a offsetu λ_{os} přidám do zpracování signálu lambda sond do modelu.

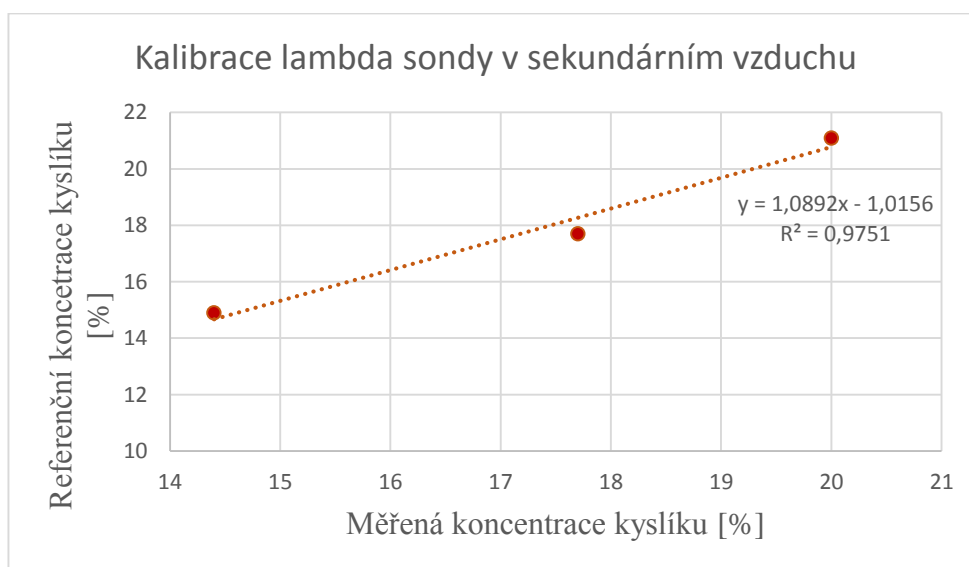
Měření nižších koncentrací kyslíku nebylo možné provést, protože spalovací proces je při nízkých hodnotách koncentrace kyslíku ve spalovacích vzduších velmi nestabilní. Měření s koncentrací kyslíku pod 14 % v jednom ze spalovacích vzduchů vedlo k absenci ustáleného stavu. Ke kalibraci se dal použít kalibrační plyn, který nebyl během měření k dispozici, proto bylo možné použít pouze stavy, ve kterých se může pohybovat koncentrace kyslíku během spalování.



Graf 6-Lineární přepočítání údajů z lambda sondy v primárním vzduchu

Výsledný převodní vztah mezi naměřenou a skutečnou hodnotou pro lambda sondu v primárním vzduchu je uveden v rovnici (9.2).

$$\lambda_{prim} = 1,68\tilde{\lambda}_{prim} - 10,4 \quad (9.2)$$



Graf 7-Lineární přepočítání údajů z lambda sondy v sekundárním vzduchu

Výsledný převodní vztah mezi naměřenou a skutečnou hodnotou pro lambda sondu v sekundárním vzduchu je uveden v rovnici (9.3).

$$\lambda_{sek} = 1,09\tilde{\lambda}_{sek} - 1 \quad (9.3)$$

10 Řízení recirkulačního ventilátoru

Tlak v počátečním uzlu udržuje recirkulační ventilátor. Ventilátor slouží jako stálý zdroj tlaku. Vzhledem k běžným řešením ve ventilačních sítích jsem začal s regulátorem typu PI.

Výkon odtahového ventilátoru je řízen, aby udržoval konstantní podtlak ve spalovací komoře. Podtlak je důležitý pro odvod spalin a plynulý průchod média topeništěm. Protože je hlavním požadavkem správná funkce spalování, nebere se při regulaci podtlaku v topeništi zřetel na tlak v komíně. Změny tlaku v komíně vytvářejí poruchu tlaku v recirkulační trati. Proto je důležitá regulace recirkulačním ventilátorem, aby stabilizovala tlak na počátku recirkulační tratě.

10.1 Nastavování PI regulátoru recirkulačního ventilátoru

Recirkulační ventilátor řídím zpětnovazebním PI regulátorem. Regulátoru PI se nastavují dva parametry, zesílení proporcionální složky a časová konstanta integrační složky. Regulátor je vhodné nastavit tak, aby se nacházel na mezi kmitavosti, případně v její blízkosti.

Pomocí regulátoru řídím tlak na začátku recirkulační tratě. Regulátor experimentálně metodou pokus-omyl ladím, aby udržel během celého provozu kotle tlak na stálé požadované hodnotě.

Za ventilátorem dochází k rozdělení proudu vzduchu do dvou větví tratě, do primární a do sekundární větve. Soustava každého vedení se chová odlišně, proto není možné použít stejné nastavení parametrů PI regulátoru recirkulačního ventilátoru pro obě vedení tratě. Primární větev žene vzduch pod rošt s palivem. Zaplněný rošt funguje jako tlumení a je třeba menšího úsilí ke stabilizaci systému.

Sekundární spalovací vzduch je hnán nad rošt, kde podporuje spalování, nicméně není tlumen tak výrazným odporem jako primární vzduch.

10.1.1 Nastavení parametrů PI pro primární vedení vzduchu

Nejprve jsem uzavřel sekundární klapku a nastavoval jsem regulátor PI pro samostatnou primární větev. Během nastavování parametrů PI regulátoru jsem odhalil zajímavou vlastnost soustavy a to přesněji takovou, že kromě zesílení r_0 a časové konstanty T_i , hraje důležitou roli požadovaný přetlak v trati Δp_{min} . Při nastavení vyššího požadovaného přetlaku vykazovala soustava vyšší stabilitu. Při pokusech jsem

nastavil vysokou hodnotu požadovaného přetlaku a tu jsem snižoval, dokud jsem neobjevil nejnižší možnou nastavitelnou hodnotu požadovaného přetlaku.

Pro větev primárního vzduchu jsem si mohl dovolit nejnižší provozní přetlak 20 Pa. Parametry PI regulátoru, při kterých byl dostatečně rychlý náběh tlaku bez kmitání, mi vyšly $r_0 = 0,3$ a $T_i = 60$ s.

10.1.2 Nastavení parametrů PI pro sekundární vedení vzduchu

Pro řízení průtoku sekundární větví s uzavřenou primární větví nepracovaly parametry zjištěné pro primární vedení vzduchu správně. Přechodové děje jsou rychlejší, proto bylo třeba nastavit rychlejší časovou konstantu integrační složky regulátoru. Pro sekundární trat' vyšly jako funkční hodnoty $r_0 = 0,2$ a $T_i = 30$ s. Znovu se objevil problém s kmity při nízkých tlacích. Pro sekundární vedení byl nutný minimální přetlak $\Delta p_{min} = 35$ Pa.

10.1.3 Výsledky nastavení

Výsledná nastavení PI regulátoru jsou pro příslušný režim recirkulace vypsána v tabulce 3.

Tabulka 3-Parametry nastavení PI regulátoru recirkulačního ventilátoru

Výsledky určování koeficientů PI regulátoru		
parametr	Primární vedení	Sekundární vedení
r_0 [1]	0,3	0,2
T_i [s]	60	30
Δp_{min} [Pa]	20	35

Vyozorovaný jev kmitání při nízké hodnotě tlaku si vysvětlují tak, že existuje minimální nutný tlak pro překonání poruchy od odtahového ventilátoru. Při nízkém požadovaném tlaku není ventilátor roztočen na dostatečně vysoké otáčky a není tedy v oblasti se strmým průběhem výkonu. Nemůže reagovat s postačující pružností na změny tlaku.

U malých kotlů není běžné společná recirkulace do primárního a sekundárního vzduchu. Zaměřil jsem se proto na nastavení regulátoru vždy při zapojení jedné větve vedení. U malých kotlů se nejčastěji užívá recirkulace do primárního spalovacího vzduchu. K nalezení parametrů regulátoru jsem použil metodu pokus-omyl, kdy jsem vycházel z hodnot nastavení odtahového ventilátoru.

11 Ověření modelu

Pro ověření modelu jsem provedl řadu pokusů se zapáleným kotlem. Cílem bylo ověřit stabilitu regulace přetlaku v recirkulační trati a správnost výpočtu otevření automatických klapek. Ke komínu byl připojený analyzátor spalin, který nám ukazoval přesnou hodnotu koncentrace kyslíku ve spalinách v komíně.

Měření správnosti modelu jsem provedl tak, že jsem používal výstupní hodnoty modelu k určení přibližné hodnoty otevření klapek. Nechal jsem chvíli na ustálení hodnot. Následovně jsem ručně doladil otevření klapek tak, aby nastavení recirkulační tratě odpovídalo hodnotám spalování pro daný režim kotle. Po ustálení koncentrací kyslíku na požadovaných hodnotách jsem si odměřil ručně všechny potřebné vstupní hodnoty do modelu. Nechal jsem model vypočítat otevření klapek a porovnal ho se skutečnou hodnotou.

11.1 Porovnání výstupu modelu s nastavením recirkulační tratě

Prvním nedostatkem modelu se ukázal jev počáteční necitlivosti automatických klapek. Během ověřování ovládání přes Simulink ještě před samotným zapálením kotle při nastavování poměrného otevření automatických klapek vůbec nedošlo k otevření klapky. Ukázalo se, že kombinace servopohonu a klapek má mrtvou zónu 20 až 30 % rozsahu. Navržený model takovou odchylku nezohledňoval. Ověření modelu jsem provedl bez korekce, řešením jsem se zabýval až po měření při zpracování výsledků v následujících kapitolách.

11.1.1 Měřený experiment při zapáleném kotli

K ověření výsledků identifikace a řízení recirkulační tratě jsme provedli experiment. Zapálili jsme spolu s kolegyní z Ústavu energetiky kotel. Ručně jsme nastavili režim spalování. Režimy se liší poměrným podílem spalin přimíchávaných do spalovacích vzduchů. Po ustálení kotle v provozním režimu jsem si odměřil všechny veličiny, které jsou vstupními veličinami modelu. Údaje jsem zaznamenal do tabulky a zadal do modelu, který vypočetl otevření klapek. Porovnal jsem skutečné hodnoty otevření klapek s hodnotami vypočítanými z modelu.

Tabulka 4 je zápis měřených veličin a vypočítaných veličin modelu při recirkulaci do primárního vzduchu.

Tabulka 4-Výsledky měření při recirkulaci do primárního spal. vzduchu

Měření při recirkulaci do primárního spalovacího vzduchu							
Popis veličiny	Jednotky	Režim 1		Režim 2		Režim 3	
Čerstvý primární vzduch - klapky	%	100	100	100	100	100	100
Čerstvý sekundární vzduch - klapky	%	100	100	100	100	100	100
Recirkulační primární vzduch - klapka	%	42	41	55	55	65	65
Recirkulační sekundární vzduch - klapka	%	0	0	0	0	0	0
Recirkulační ventilátor Δp	Pa	20	20	20	20	22	22
sonda č. 1, spaliny	%	5	6	6	6	6	5
sonda č. 2, primární spal. vzduch	%	17,9	18	14,8	14,7	8	6,5
sonda č. 3, sekundární spal. vzduch	%	21	21	21	21	21	21
Anemometr na prim. čerstvého vzduchu	m/s	2,7	2,7	1,6	1,9	0,25	0,15
Anemometr na sek. čerstvého vzduchu	m/s	6,7	7	9,2	9	8,5	9
L_1 -vypočtené otevření prim. klapky	%	16,6	16,6	33	33	45	45
L_2 -vypočtené otevření sek. klapky	%	0	0	0	0	0	0
x_1 -výpočtová koncentrace kyslíku v prim. spal. vzduchu	%	18	18	15	15	8	8
x_2 -výpočtová koncentrace kyslíku v sek. spal. vzduchu	%	21	21,1	21,1	21,1	21,1	21,1
x_{sv} -výpočtová koncentrace kyslíku ve spalinách	%	6	6	6	6	6	6

Tabulka 5 je zápis měřených veličin a vypočítaných veličin modelu při recirkulaci do sekundárního vzduchu.

Tabulka 5-Výsledky měření při recirkulaci do sekundárního spal. vzduchu

Měření při recirkulaci do sekundárního spalovacího vzduchu				
Popis veličiny	Jednotky	Režim 1	Režim 2	Režim 3
Čerstvý primární vzduch - klapky	%	100	100	100
Čerstvý sekundární vzduch - klapky	%	100	100	100
Recirkulační primární vzduch - klapka	%	0	0	0
Recirkulační sekundární vzduch - klapka	%	39	43	58
Recirkulační ventilátor Δp	Pa	20	30	30
sonda č. 1, spaliny	%	6	6	6
sonda č. 2, primární spal. vzduch	%	21	21	21
sonda č. 3, sekundární spal. vzduch	%	18	18	15
Anemometr na prim. čerstvého vzduchu	m/s	4	3,6	3
Anemometr na sek. čerstvého vzduchu	m/s	4	10	9,2
L_1 -vypočtené otevření prim. klapky	%	0	0	0
L_2 -vypočtené otevření sek. klapky	%	16	24,7	46,8
x_1 -výpočtová koncentrace kyslíku v prim. spal. vzduchu	%	21,1	21,1	21,1
x_2 -výpočtová koncentrace kyslíku v sek. spal. vzduchu	%	18	18	15
x_{sv} -výpočtová koncentrace kyslíku ve spalinách	%	6	6	6

Z tabulky 4 a 5 je vidět, že hodnoty skutečného otevření klapky a hodnot vypočtených z modelu L_1 a L_2 se neshodují ani v rámci hrubé nepřesnosti. Během měření jsem zjistil, že servopohony v kombinaci s klapkami mají široké pásmo mrtvé zóny, které je potřeba ve výpočtovém modelu zohlednit. Mrtvá zóna se ukázala být přibližně 25 % rozsahu otevření sekundární automatické klapky a 30 % rozsahu otevření primární automatické klapky.

11.1.2 Odstranění mrtvé zóny automatických klapky

Odstranění mrtvé zóny automatických klapky jsem se rozhodl udělat úpravou v Simulinku. Přidal jsem k výpočtu modelu ještě rovnici přímky, která vypočtenou hodnotu vynásobí rozsahem servopohonu bez mrtvé zóny a odchylku hodnoty mrtvé zóny k výpočtu přičte. Parametry přímky jsem sestavil podle rovnice (11.1).

$$L_n = k_L L + L_{MZ} \quad (11.1)$$

Pozorováním klapky jsem určil procentuální otevření klapky v Simulinku, při kterém došlo k prvnímu viditelnému pohybu klapky. Hodnotu jsem dosadil jako posunutí přímky L_{MZ} .

Podle rovnice (11.2) jsem procentuální otevření vypočítané modelem v Simulinku rozdělil do zbývajících rozsahu pohonu klapky.

$$k_L = 1 - L_{MZ} \quad (11.2)$$

Pozorování jsem provedl nezávisle pro obě klapky a sestavil jsem dvě rovnice (11.3) a (11.4).

$$L_{n1} = 0,70L_1 + 30 \quad (11.3)$$

$$L_{n2} = 0,75L_2 + 25 \quad (11.4)$$

kde L_{m1}, L_{m2} jsou hodnoty vypočítané z původního modelu a L_{n1}, L_{n2} jsou nové hodnoty otevření klapky.

11.1.3 Přidání přepočtení přímky pro otevření klapky

Přepočítám hodnoty otevření klapky z modelu přes přepočtení přímky podle rovnic (11.3) a (11.4).

Přepočítané hodnoty včetně vypočítané chyby jsou zapsány v tabulce 6 pro primární automatickou klapku a v tabulce 7 pro sekundární automatickou klapku.

Tabulka 6-Porovnání modelu se skutečným nastavením při recirkulaci do primárního vzduchu

Ověření modelu při recirkulaci do primárního spalovacího vzduchu			
L_1	Recirkulační primární vzduch - klapka	L_{n1} po přepočtu	Relativní chyba
%	%	%	%
16,6	42	41,6	0,6
33,0	55	53,1	3,5
45	65	61,5	5,4

Tabulka 7-Porovnání modelu se skutečným nastavením při recirkulaci do sekundárního vzduchu

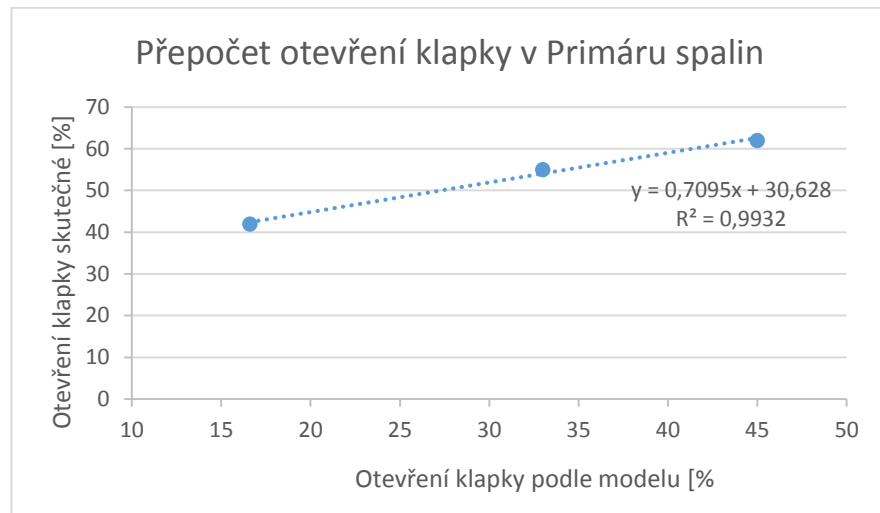
Ověření modelu při recirkulaci do sekundárního spalovacího vzduchu			
L ₂	Recirkulační primární vzduch - klapka	L _{n2} po přepočtu	Relativní chyba
%	%	%	%
16	39	37	5,1
24,7	43	43,5	1,2
46,8	58	60,1	3,6

Po přepočtu otevření klapek podle rovnic (11.3) a (11.4) dostanu hodnoty otevření klapek, které se shodují se skutečným otevřením klapek za stejných podmínek v rozsahu relativní chyby $\pm 5,5\%$.

11.1.4 Úprava parametrů přímky přepočtu otevření klapek pro zlepšení přesnosti modelu

V následující kapitole se zabývám vylepšením části modelu, která přepočítává otevření automatických klapek. V této kapitole jsem vypočítal nové koeficienty přepočtení přímky. Původní přímka upravuje hodnoty vypočtené z modelu, aby eliminovala mrtvou zónu klapek. Novými koeficienty jsem snížil relativní chybu, která byla u původní přímky $\pm 5,5\%$.

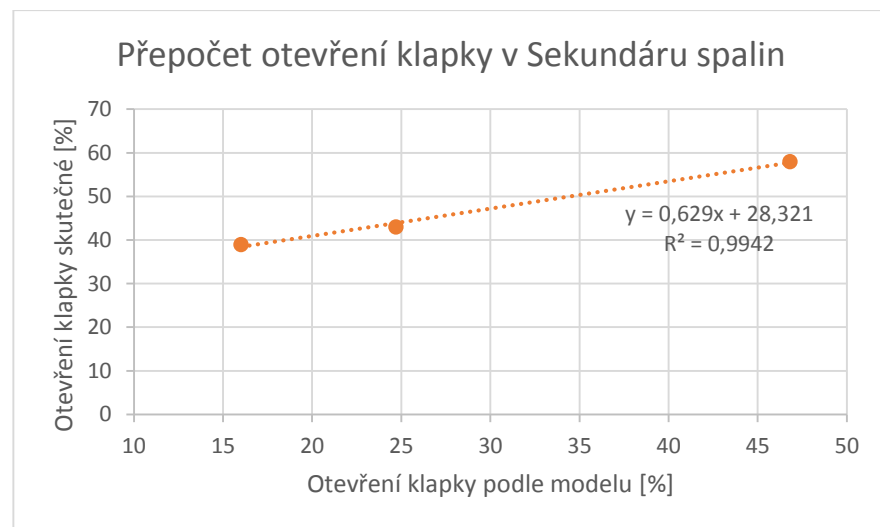
Z nasbíraných dat během experimentů jsem vynesl graf závislosti vypočítaných poměrných otevření automatických klapek vypočítaných modelem na skutečných hodnotách otevření automatických klapek. Lineární regresí jsem získal přímku, která bodům nejvíce odpovídá



Graf 8-Lineární přepočítání otevření automatické klapky v primárním vzduchu

Přímka pro přepočítání otevření primární automatické klapky je zapsána v rovnici (11.5).

$$L_{n1} = 0,71L_1 + 30,6 \quad (11.5)$$



Graf 9-Lineární přepočítání otevření automatické klapky v sekundárním vzduchu

Přímka pro přepočítání otevření sekundární automatické klapky je zapsána v rovnici (11.6).

$$L_{n2} = 0,63L_2 + 28,3 \quad (11.6)$$

Po odmocnění R^2 jsem získal hodnotu relativní chyby, která je v případě obou nových koeficientů menší než jedno procento

12 Návrh úprav recirkulační tratě

Konstrukce tratě z pohledu vedení média je navržena dobře. Flexi potrubí jsou na několika místech děravá. Navrhuji jejich výměnu za nové.

Rychloměry proudění, které jsou na kotli namontované, svými měřicími rozsahy naprosto neodpovídají běžným rychlostem proudění, kterého médium v trati dosahuje. Rychloměry se mi podařilo trimrem nastavit na požadovaný rozsah, bohužel za cenu ztráty přesnosti. Navrhuji koupit nové průtokoměry s rozsahem 0 až $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Měření koncentrace kyslíku zajišťují tři lambda sondy. Dvě z nich se podařilo upravit tak, aby podávaly hodnověrné údaje. Třetí lambda sonda svým rozsahem neodpovídá. Měřená koncentrace kyslíku ve spalinách je za běžného režimu spalování 4 až 7 %. Lambda sonda má spodní hranici rozsahu kolem 8 %. Vyhodnocovací jednotku lambda sondy je potřeba vyměnit za jinou.

Dále průřez škrtdla klapky je mnohem menší než průměr potrubí, které má těsnit. Dochází tím k velkému úniku skrz zavřenou klapku. Navrhuji klapky dotěsnit použitím přesnějšího škrtdla, nebo dotěsnit vyplnit mezeru mezi škrtdlem a potrubím.

Model v současném stavu není navržen k výpočtu otevření klapek během současné recirkulace do primárního a sekundárního spalovacího vzduchu. Je vhodné model o tento režim spalování rozšířit, i když není běžně provozován. Pro režim současné recirkulace je potřeba najít vhodné nastavení PID regulátoru recirkulačního ventilátoru.

13 Závěr

U kotlů na biomasu nižších výkonů není použití zpětné recirkulace spalin příliš běžné. V laboratoři energetiky na Julisce je umístěn kotel od společnosti Fiedler s výkonem 100 kW, který má na sobě namontovanou experimentální recirkulační trať spalin.

Podářilo se mi navrhnout matematicko-fyzikální model pro dopředné řízení recirkulace spalin, který odpovídá skutečné recirkulační trati. Ověřením modelu jsem zjistil, že model dosahuje vysoké přesnosti. Model vypočítal nastavení otevření automatických klapek s relativní chybou 5,5 %. Vyhodnocení výsledků vychází z měření ustálených stavů. Během experimentů nebyly na kotli napevno namontovány průtokoměry, kterými bych mohl zjišťovat okamžitou hodnotu průtoků v jednotlivých větvích recirkulační tratě. Proto jsem čekal na ustálení hodnot a trať odměřil ručně.

Cílem práce bylo navrhnout systém řízení recirkulace spalin pro biomasový kotel. Vytvořil jsem model trati v Simulinku, který použitý pro dopředné řízení v kombinaci s dalšími regulačními obvody zjednodušuje obsluhu recirkulační tratě. Matematicko-fyzikálním rozborem jsem identifikoval recirkulační trať, naprogramoval řízení v Simulinku. Obsluha kotle nyní zadává do programu požadovanou koncentraci kyslíku, kterou má obsahovat primární a sekundární spalovací vzduch. Model sám ovládá automatické klapky a recirkulační ventilátor.

Podobným způsobem jako k měření průtoků bylo nutné přistoupit k měření koncentrace kyslíku ve spalinách. Koncentraci kyslíku ve spalinách měří lambda sonda, která byla dodána s kotlem. Bohužel během spalování za běžných provozních podmínek klesá koncentrace kyslíku ve spalinách pod nejnižší hodnotu rozsahu použité vyhodnocovací jednotky lambda sondy. Koncentraci kyslíku ve spalinách jsem měřil analyzátozem spalin a do modelu jsem ji zadával ručně.

Navržené řízení založené na kombinaci dopředného řízení na principu modelu se zpětnovazebním řízením funguje dobře, vše je připraveno na jeho nasazení jako plně autonomní regulace recirkulace spalin po dovybavení kotle potřebnou a v práci popsanou instrumentací.

Případná vylepšení tratě jsem sepsal v kapitole 12.

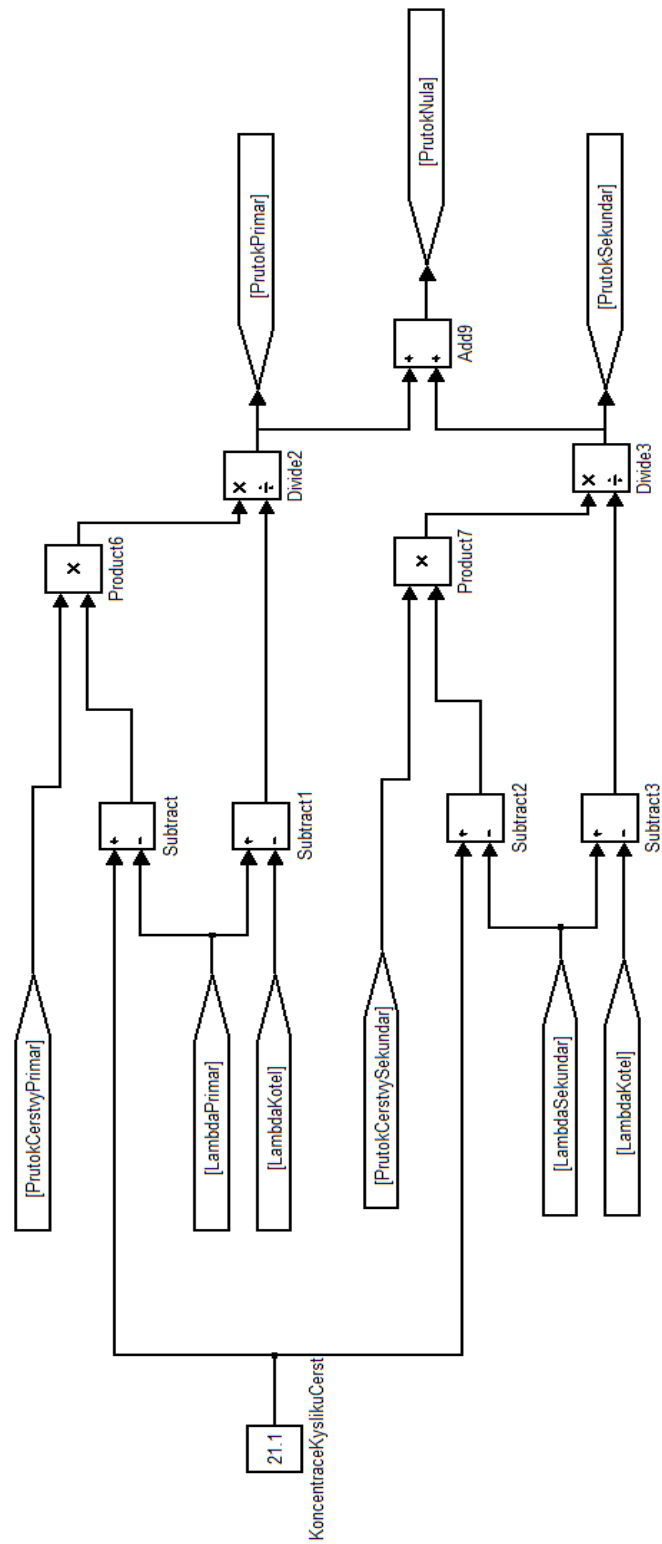
Použitá literatura a zdroje

- [1] PICK, P.: *Technologie Ochrany ovzduší*. Praha: CA „PUBLISHING“, 1991
- [2] PALATÝ, J, P. PICK a M. KURAŠ.: *Základy ochrany prostředí*. Praha: Ediční středisko VŠCHT, 1993. ISBN 80-7080-173-5
- [3] VEJVODA, J., P. MACHAČ a P. BURYAN.: *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů (skripta)*. Praha: VŠCHT v Praze, 2003. ISBN 80-7080-517-X
- [4] HRDLIČKA, Jan a kolektiv. *Problematika řízení automatických kotlů na biomasu se zaměřením na kotle malého výkonu pro domácnosti*. Dostupné z <http://www.iczt.cz/cs/doc/sem34.pdf> vid. 24.5.2015[online]
- [5] JEŽEK, Jan, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. *Mechanika tekutin*. 3. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 150 s. ISBN 80-01-01615-3.
- [6] ADAMEC, Josef, Martin LÍŠAL a Blanka VÁRADIOVÁ. *Mechanika tekutin: sbírka příkladů*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1998, 104 s. ISBN 80-01-01811-3.
- [7] DRKAL, František a Vladimír ZMRHAL. *Větrání*. 1. vyd. V Praze: ČVUT, 2013, 157 s. ISBN 978-80-01-05181-8.
- [8] BOŠKA, Michal. *Vznik a snižování emisí NOx*. V Brně: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Dostupné z https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5097 vid. 2.6.2016 [online]
- [9] HEMERKA, Jiří a František HRDLIČKA. *Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I)*. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Publikováno dne 20.12.2004. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i> vid. 2.6.2016 [online]
- [10] HOFREITER, Milan. *Základy automatického řízení*. 1. vyd. V Praze: ČVUT, 2012. 165 s. ISBN 978-80-01-05007-1.
- [11] REX Controls s.r.o. Funkční bloky systému REX verze 2.10.8, publikováno dne 25.2.2016. Dostupné z <https://www.rexcontrols.com/media/HTML/DOC/CZECH/PIDUI.html#x117-1160007> vid. 3.6.2016 [online]

- [12] DOUBRAVA, Jiří, Vlastimil DYTRT, Michal KLIMEŠ, Vladimír MAREK, Oldřich NOVOTNÝ, Tomáš SUCHÁNEK A Milan ŠALDA. *Regulační armatury*. 4. upravené vydání. Česká Třebová, 2006
- [13] firma NGK. *Širokopásmová lambda sonda*. Dostupné z <https://www.ngk.de/cz/produkty-a-technologie/lambda-sondy/technologie-lambda-sond/sirokopasmovalambda-sonda/> vid. 10.6.2016 [online]

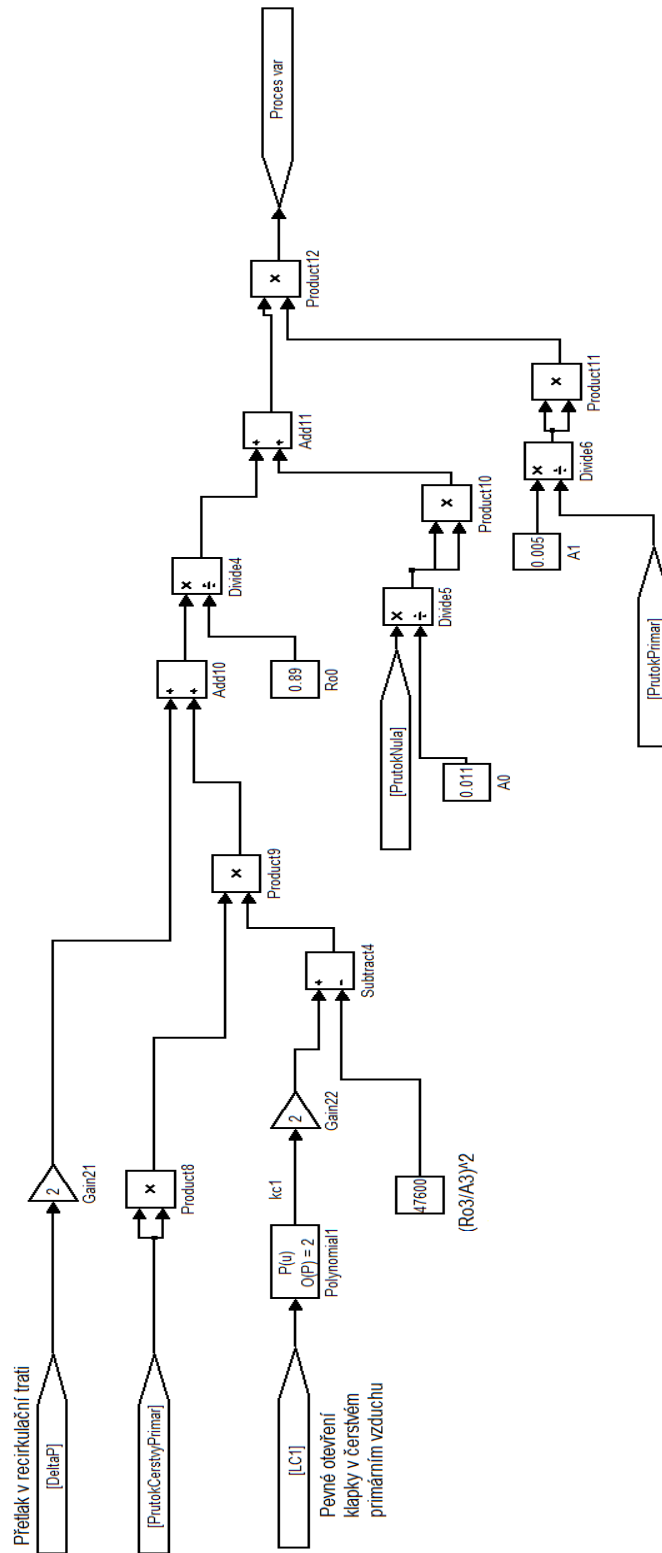
Příloha A

Blokové schéma ze Simulinku, které vypočítává průtok spalin v místě 0.



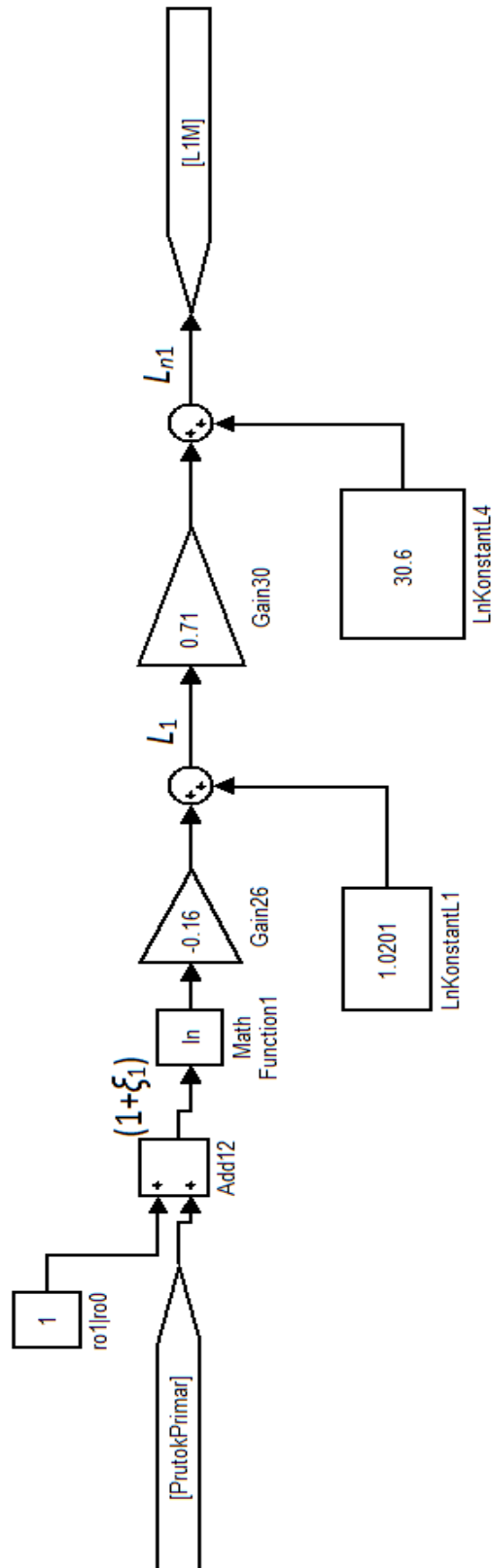
Příloha B1

Schéma ze Simulinku popisující výpočet otevření primární automatické klapky.



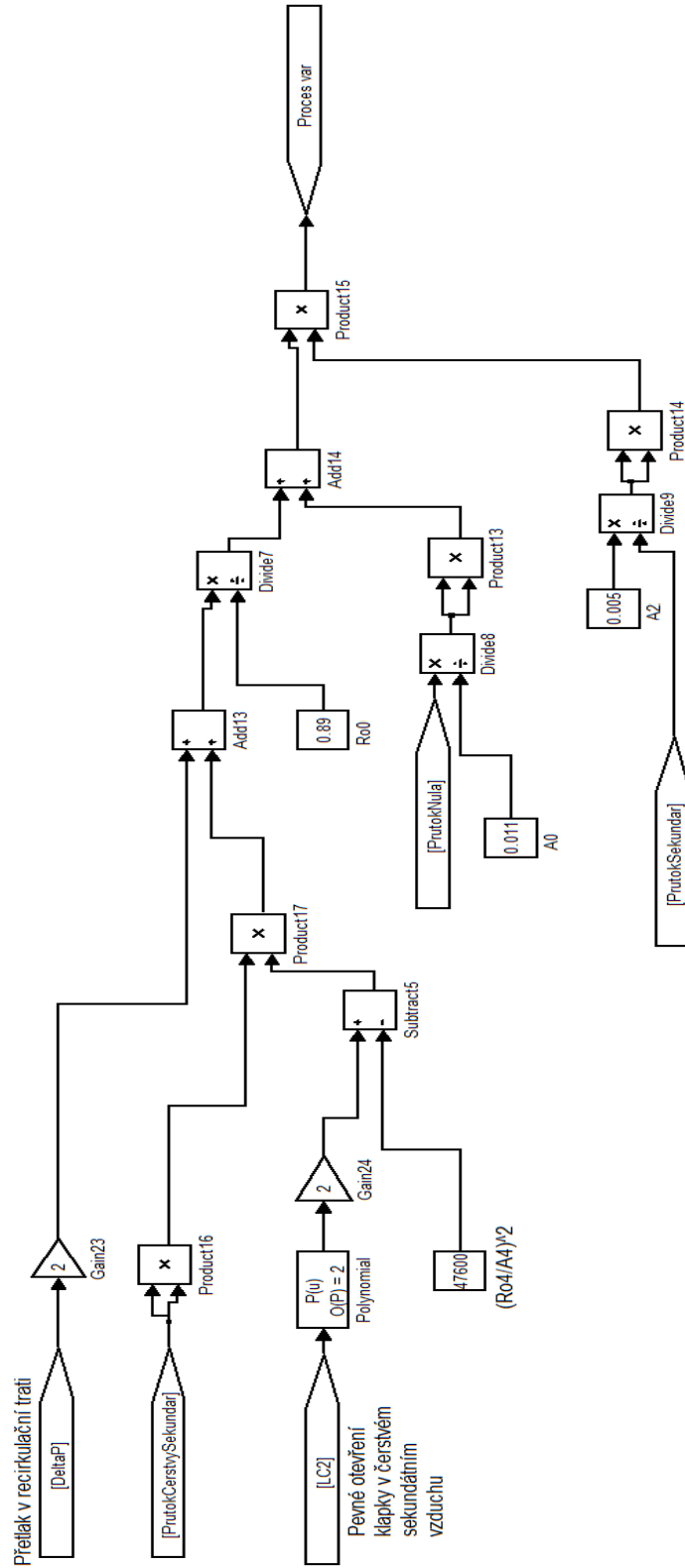
Příloha B2

Pokračování výpočtu otevření primární automatické klapky.



Příloha C1

Schéma ze Simulinku popisující výpočet otevření sekundární automatické klapky.



Příloha C2

Pokračování výpočtu otevření sekundární automatické klapky.

