

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI



MGR INŻ. MAREK NITSCHÉ

**IDENTYFIKACJA KOTŁA MAŁEJ MOCY OPALANEGO
PELETEM DRZEWNYM DLA CELÓW STEROWANIA**

PRACA DOKTORSKA

**PROMOTOR: DR HAB. INŻ. RAFAŁ STANISŁAWSKI
PROF. POLITECHNIKI OPOLSKIEJ**

OPOLE 2016

Prof. Rafałowi Stanisławskiemu pragnę złożyć najserdeczniejsze podziękowania za poświęcony czas, zaangażowanie i ogromny wkład wniesiony w realizację niniejszej pracy.

Składam również wyrazy wielkiej wdzięczności **dr. inż. Robertowi Junga** za cenne uwagi merytoryczne i pomoc w realizacji badań.

OPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING, AUTOMATIC CONTROL AND
COMPUTER ENGINEERING



Ph.D. Thesis

on

“Identification of a small-scale wood pellet boiler for control design”

by

MAREK NITSCHKE M.Sc.

Advisor: RAFAŁ STANISŁAWSKI Ph.D., D.Sc.

OPOLE 2016

Abstract

This Ph.D. dissertation presents new results in parametric identification of a nonlinear dynamic system which is a small-scale boiler fired with wood pellet. In the first part of this thesis, various approaches to modeling and control of biomass-fired domestic boilers are reviewed. Next, forming of harmful substances such carbon oxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x) as well as the combustion process for solid biomass fuels are described. The third part of this thesis contains a detailed description of hardware and software of the measuring system built for the purpose of this work.

The identification process for the wood pellet-fired low power boiler is proceeded in two stages. In the first stage, identification of the boiler as a continuous-time physical model with complex structure is performed. The elements of the model are: fuel feed system, air feed system, combustion chamber and heat exchanger. The model has to describe the relation between the signal inputted to the air supply fan and the residual oxygen content in flue gas at the nominal power load of the boiler. The physical model with estimated parameters was positively verified in a series of experiments. Finally, a nonlinear dynamic discrete-time Hammerstein model is constructed. The nonlinear part of this model is a piecewise linear function and the dynamic part are Laguerre filters. This structure is used for design of Extended Horizon Predictive Control (EHPC) as an example of model-based predictive algorithm in the concept to achieve computational savings. The designed controller was tested in a control loop with the model as well as with the real boiler in a series of experiments. Model-based predictive control of the residual oxygen content leads to lower CO and NO_x emissions as compared to the up-to-date applied, standard controller.

Streszczenie

Niniejsza praca przedstawia rozwiązanie zadania identyfikacji nieliniowego systemu dynamicznego, jakim jest kocioł małej mocy opalany peletem drzewnym. Pierwsza część dysertacji zawiera różne podejścia do problematyki modelowania i sterowania kotłów małej mocy na biomasę opisane w literaturze światowej. Następnie omówiono proces spalania peletu drzewnego oraz mechanizmy powstawania szkodliwych związków, tj. tlenku węgla (CO) i tlenków azotu (NO_x). Rozdział trzeci zawiera szczegółowy opis części sprzętowej i programistycznej stanowiska laboratoryjnego zbudowanego na potrzeby niniejszej pracy.

Proces identyfikacji badanego kotła przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszej kolejności dokonano opisu matematycznego kotła, jako systemu o złożonej strukturze. Częściami składowymi modelu fizycznego są: układ podawania paliwa, układ podawania powietrza, komora spalania i wymiennik ciepła. Model ten określa zależność pomiędzy sygnałem sterującym podawanym na wentylator nadmuchowy układu doprowadzenia powietrza a stężeniem tlenu resztkowego w spalinach podczas pracy kotła z mocą nominalną. Model fizyczny został pozytywnie zweryfikowany w serii eksperymentów. Ostatecznie na jego podstawie wyznaczono dyskretny, nieliniowy model blokowo-zorientowany (model Hammersteina), dedykowany dla celów sterowania. Część nieliniowa modelu zredukowanego została opisana funkcją odcinkowo-liniową, a liniową część dynamiczną zamodelowano z zastosowaniem dyskretnych filtrów Laguerre'a. Strukturę tę wykorzystano do projektowania regulatora z rozszerzonym horyzontem predykcji (EHPC). Wyznaczony regulator został testowany zarówno w pętli sterowania z modelem fizycznym, jak również na obiekcie rzeczywistym. Sterowanie stężeniem tlenu w spalinach z zastosowaniem regulatora predykcyjnego opartego na modelu prowadziło w każdej serii pomiarowej do redukcji emisji CO oraz NO_x w porównaniu do standardowego regulatora zainstalowanego w kotle.

Spis Treści

Wykaz ważniejszych symboli	7
1 Wstęp	10
1.1 Teza pracy	12
1.2 Cel pracy	12
1.3 Aktualny stan wiedzy	13
1.4 Zawartość pracy	23
2 Spalanie biomasy w kotłach małej mocy	24
2.1 Kotły małej mocy na biomasę, rynek i konstrukcje	24
2.2 Parametry fizykochemiczne paliw stosowanych w kotłach małej mocy	25
2.3 Proces spalania peletu drzewnego.....	27
2.3.1 Stechiometria procesu spalania peletu.....	29
2.4 Główne produkty procesu spalania	32
2.4.1 CO i OGC	32
2.4.2 NO _x	33
2.4.3 Pyły.....	33
2.5 Wpływ współczynnika lambda na emisję zanieczyszczeń	34
2.6 Graniczne stężenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłu w odniesieniu do Norm Europejskich	36
2.7 Podsumowanie	39
3 Stanowisko badawcze	40
3.1 Kocioł wodny małej mocy na pelet drzewny jako obiekt badań.....	41
3.1.1 Palnik.....	42
3.1.2 Układ doprowadzenia paliwa	44
3.1.3 Układ doprowadzenia powietrza – wentylator nadmuchowy	46
3.1.4 Sterownik fabryczny	47
3.2 Stanowisko laboratoryjne.....	47
3.2.1 Obieg wodny.....	48
3.2.2 Przewód kominowy	52
3.2.3 Analizator spalin.....	53
3.2.4 Układ pomiarowy wybranych wielkości fizycznych.....	54
3.3 Układy wykonawcze.....	67
3.3.1 Elektroniczny układ sterowania pracą podajnika paliwa	67
3.3.2 Regulator prędkości obrotowej wentylatora.....	68
3.4 Metodyka badań	70
3.5 Niepewność pomiarów.....	71
3.6 Środowisko programistyczne stanowiska badawczego	75
3.7 Podsumowanie.....	77
4 Modelowanie procesu spalania w kotle peletowym dla celów sterowania ..	78
4.1 Spalanie w kotle peletowym jako proces sterowania.....	78
4.2 Modelowanie kotła jako układu o złożonej strukturze	80
4.2.1 Modelowanie układu podawania powietrza	80

4.2.2	Modelowanie układu podawania paliwa	86
4.2.3	Modelowanie procesu spalania peletu w komorze spalania.....	87
4.2.4	Modelowanie wymiennika ciepła	88
4.2.5	Weryfikacja eksperymentalna modelu	94
4.3	Model kotła jako nieliniowy układ blokowo-zorientowany	96
4.3.1	Modele oparte na funkcjach bazy ortonormalnej	97
4.3.2	System Wienera	100
4.3.3	System Hammersteina	102
4.3.4	Inżynierskie podejście do modelowania układów nieliniowych blokowo-zorientowanych.....	103
4.3.5	Analiza wyników identyfikacji	105
4.4	Szacowanie wartości tlenu nadmiarowego w oparciu o sygnały pośrednie	109
4.4.1	Określanie stężenia tlenu nadmiarowego na podstawie temperatury w różnych punktach kotła.....	110
4.4.2	Analiza wykorzystania pomiarów ciśnienia w różnych punktach kotła	114
4.4.3	Analiza wykorzystania innych sygnałów pomiarowych.....	115
4.5	Podsumowanie.....	116
5	Implementacja układu sterowania kotłem.....	117
5.1	Predyktor.....	117
5.2	Sterowanie EHPC	119
5.3	Obserwator stanu	121
5.3.1	Obserwator Luenbergera.....	121
5.3.2	Filtr Kalmana.....	121
5.4	Implementacja układu sterowania.....	122
5.4.1	Implementacja układu sterowania na modelu obiektu	123
5.4.2	Implementacja układu sterowania na rzeczywistym obiekcie	126
5.5	Podsumowanie.....	137
6	Kierunki dalszych badań	139
7	Podsumowanie	141
	Literatura.....	143

Wykaz ważniejszych symboli i skrótów

A	zawartość popiołu, w %
α	dokładność przyrządu pomiarowego
a	dominujący biegun ciągłego filtru Laguerre'a
B	strumień masowy paliwa, w kg/h
B_{max}	maksymalny strumień paliwa, w kg/h
B_n	strumień paliwa dla mocy nominalnej kotła, w kg/h
\tilde{B}	sygnał względny sterujący pracą podajnika
β	udział CO w produktach spalania węgla
C	węgiel
c_i	i -ty parametr modelu Laguerre'a
c_r	udział masowy węgla w jednostce paliwa w stanie roboczym, w %
CO_2	koncentracja dwutlenku węgla w spalinach, w %
CO	zawartość tlenku węgla w spalinach, w mg/m ³
$\underline{CO_2}$	teoretyczna koncentracja dwutlenku węgla w spalinach komorze spal., w %
\underline{CO}	teoretyczna zawartość tlenku węgla w komorze spalania, w mg/m ³
d	opóźnienie układu
δ	błąd pomiarowy przyrządu elektronicznego
e_w	zakłócenie modelu Wienera
e_H	zakłócenie modelu Hammersteina
ε	uchyb regulacji
\hat{f}	estymator funkcji $f(\cdot)$
f_p	częstotliwość sygnału sterującego podajnikiem, w Hz
$\varphi(t)$	wektor sygnałów
Φ	wektor sygnałów w serii pomiarowej
$G(s)$	transmitancja operatorowa
γ	stosunek azotu do tlenu w powietrzu
H	wodór
h_r	udział masowy wodoru w jednostce paliwa w stanie roboczym, w %
h	czas próbkowania
J	moment bezwładności wału, w Nm
k_m	parametr silnika
k_w	stała łopat wentylatora
k_l	współczynnik oporu łożysk tocznych
k_{sh}	parametr modelu silnika
$L_i(s)$	i -te rozwinięcie ciągłego filtru Laguerre'a
$L_i(z)$	i -te rozwinięcie dyskretnego filtru Laguerre'a
λ	współczynnik nadmiaru powietrza
$\underline{\lambda}$	teoretyczny współczynnik nadmiaru powietrza w komorze spal.
$\lambda_1(t), \lambda_2(t)$	współczynniki zapominania wykładniczego

M_n	moment znamionowy silnika, w Nm
M	rząd modelu
M_p	masa molowa drewna, w kg/kmol
M_{H_2O}	masa molowa wody, w kg/kmol
$(M_v)_u$	molowa objętość właściwa powietrza, $um^3/kmol$,
m	współczynnik licznosci tlenu w reakcji utlenienia paliwa
N	azot
n_r	udział masowy azotu w jednostce paliwa w stanie roboczym
NO_x	koncentracja tlenków azotu w spalinach, w mg/m^3
$\underline{NO_x}$	teoretyczna zawartość tlenków azotu w spalinach w komorze spal., w mg/m^3
O	tlen
o_r	udział masowy tlenu w jednostce paliwa w stanie roboczym, w %
O_2	koncentracja tlenu w spalinach, w %
$\underline{O_2}$	teoretyczna koncentracja tlenu w spalinach w komorze spal., w %
ω	prędkość obrotowa silnika, w obr/s
$\hat{\omega}$	estymowana prędkość obrotowa silnika, w obr/s
P	moc kotła, w kW
P_n	moc znamionowa kotła, w kW
$P(t)$	macierz kowariancji
p	dominujący biegun dyskretnego filtra Laguerre'a
q_A	strata kominowa, w %
$q_{v\ net}$	wartość opałowa, w kJ/kg
S	siarka
σ	gęstość powietrza, w kg/m^3
T	temperatura, w $^{\circ}C$
T_V	temperatura wody wylotowej z kotła, w $^{\circ}C$
T_R	temperatura wody powrotnej do kotła, w $^{\circ}C$
T_L	temperatura otoczenia, w $^{\circ}C$
t	czas ciągły/czas dyskretny
τ_1	czas załączenia (pracy) podajnika, w s
τ_0	czas wyłączenia (przerwy) podajnika, w s
Θ	wektor nieznanych parametrów modelu
U_{sh}	napięcie zasilania silnika, w V
V	strumień masowy powietrza, w kg/h
\tilde{V}	sygnał względny strumienia masowego powietrza,
\hat{V}	modelowana prędkość powietrza, w m/s
\underline{V}	rzeczywista prędkość powietrza, w m/s
$V_{O_2}^{min}$	stechiometryczna objętość tlenu wymagana do spalania, w m^3
V_{pow}^{min}	stechiometryczna objętość powietrza wymagana do spalania, w m^3
V_{sp}^{min}	minimalna objętość spalin, w m^3
V_{sp}	rzeczywista objętość spalin, w m^3
w	niepewność toru układu pomiarowego

w^t	wilgoć całkowita, w %
x	sygnał wewnętrzny nieliniowego modelu blokowo-zorientowanego
$\hat{y}(t)$	wyjście modelu
\hat{Y}	wektor wyjść modelu
Y	wektor wyjść systemu
<i>AI</i>	wejście analogowe (ang. <i>Analog Input</i>)
<i>AO</i>	wyjście analogowe (ang. <i>Analog Output</i>)
<i>ALS</i>	adaptacyjna metoda najmniejszych kwadratów (ang. <i>Adaptive Least Squares</i>)
<i>DI</i>	wejście cyfrowe (ang. <i>Digital Input</i>)
<i>DO</i>	wyjście cyfrowe (ang. <i>Digital Output</i>)
<i>FC</i>	węgiel w części koksowej, inaczej karbonizat (ang. <i>Fixed Carbon</i>)
<i>MSE</i>	błąd średniokwadratowy (ang. <i>Mean Squared Error</i>)
<i>OBF</i>	funkcje bazy ortonormalnej (ang. <i>Orthonormal Basis Functions</i>)
<i>OGC</i>	organiczne związki węgla (ang. <i>Organic Gaseous Carbon</i>)
<i>TC</i>	czujnik termoelektryczny, inaczej termopara (ang. <i>Termocouple</i>)
<i>TGA</i>	analiza termogravimetryczna
<i>RLS</i>	rekursywna metoda najmniejszych kwadratów (ang. <i>Recursive Least Squares</i>)
<i>VOC</i>	lotne związki organiczne (ang. <i>Volatile Organic Compounds</i>)

1. Wstęp

Energia cieplna wykorzystywana do ogrzewania pomieszczeń i wody użytkowej powstaje w wyniku spalania paliw kopalnych lub odnawialnych w kotłach do tego przeznaczonych, których moc zawiera się w przedziale od kilku kilowatów to setek megawatów. Ciepło wytwarzane jest zasadniczo w dwóch typach obiektów, biorąc za kryterium moc i odległość od odbiorców. Pierwszym z nich są zakłady energetyki zawodowej, takie jak elektrociepłownie i ciepłownie, skąd poprzez sieci i węzły ciepłownicze trafia do odbiorców końcowych. Drugi rodzaj stanowią układy rozproszone, czyli kotłownie w pojedynczych gospodarstwach domowych, budynkach wielorodzinnych, obiektach użyteczności publicznej, a nawet małych osiedlach mieszkaniowych, gdzie energia cieplna wytwarzana jest bezpośrednio przy miejscu odbioru. Duże jednostki energetyki zawodowej są zobligowane do spełniania rygorystycznych przepisów w zakresie emisji zanieczyszczeń do atmosfery oraz efektywności procesu spalania. Kotły dużych mocy są wyposażone w odpylacze, filtry oraz przede wszystkim w rozbudowaną aparaturę kontrolno-pomiarową, która czuwa nad procesem spalania aby zapewnić jego możliwie wysoką sprawność i niską emisję szkodliwych dla środowiska związków. Urządzenia eksploatowane w rozproszonych systemach grzewczych, nie zawsze pracują w sposób zapewniający prawidłowy przebieg procesu spalania. Nawet jeśli kocioł posiada świadectwo spełniania normy PN-EN 303-5:2012, certyfikat lub etykietę ekologiczną uzyskaną w wyniku badań w niezależnych, akredytowanych ośrodkach badawczych, to niewłaściwy sposób eksploatacji może sprawić, że deklaracje producenta dotyczące sprawności i emisji nie będą spełnione. Dzieje się tak dlatego, że użytkownik może nie mieć wiedzy o procesie, oraz zazwyczaj nie dysponuje aparaturą kontrolno-pomiarową, aby właściwie dobrać warunki pracy kotła poprzez ustawienie parametrów sterownika. Problem nie jest marginalny, gdyż w roku 2011 kotły małej mocy pracujące w indywidualnych instalacjach stanowiły w Polsce 38 % wszystkich źródeł ciepła stosowanych w ogrzewnictwie mieszkaniowym [NSP13]. Ponadto istotny udział, bo aż 17 % [NSP13] wśród wszystkich form zaopatrzenia gospodarstw domowych w ciepło, przypadają piecom (kaflowym lub przenośnym) zainstalowanym w poszczególnych pomieszczeniach i opalanym głównie paliwami stałymi. Oczywiście rodzaj spalanego paliwa ma decydujący wpływ na wielkość emisji, niezależnie od mocy kotła. W kraju przeważają kotły opalane węglem kamiennym, jednakże tego rodzaju opał, ze względu na uciążliwość dla atmosfery i komfortu życia, nie może być stosowany w energetyce rozproszonej na Zachodzie. Tak więc dbałość o ograniczenia emisji zanieczyszczeń do atmosfery a także dążenie do osiągnięcia tzw. bezpieczeństwa energetycznego, przekładają się na coraz większy udział odnawialnych źródeł energii w globalnej gospodarce. Ponieważ jednak biomasa jest paliwem o stosunkowo małej gęstości energii, wzrost zastosowania urządzeń do jej spalania przewiduje się głównie w rozproszonych systemach grzewczych małej mocy, takich jak domki jedno- lub wielorodzinne [VBD09, HSV10]. Wzrastająca w ostatnich latach liczba zainstalowanych kotłów małej mocy opalanych biomasą każe postawić pytanie o wpływ na środowisko

tych układów spalania. Spalanie paliw stałych jest procesem złożonym i powinno być dobrze sterowane aby osiągnąć maksymalną sprawność i możliwie niskie zawartości substancji szkodliwych w spalinach. Duże znaczenie ma przy tym również konstrukcja kotła, a ściślej rzecz biorąc typ złoża, układ dystrybucji powietrza, przepływ strumienia spalin w komorze i wymienniku ciepła. Jeżeli proces spalania biomasy zachodzi w niewłaściwych warunkach, może mieć równie negatywny wpływ na środowisko jak spalanie węgla czy oleju opałowego [HSV10]. Należy przy tym zwrócić uwagę, że sprawność procesu spalania oraz koncentracja szkodliwych związków w spalinach jest funkcją jakości paliwa, techniki spalania oraz warunków pracy kotła. Dlatego też parametry fizykochemiczne i pochodzenie biomasy są bardzo istotne, wyliczając chociażby zawartość wilgoci, popiołu, siarki czy azotu [SHT07, SAD11, CWP13, FPM15, VBD12]. Wysokie wartości emisji tlenu węgla powstałego w wyniku niepełnego spalania są następstwem wielu czynników, a raczej ich kombinacji, rozpoczynając od złej jakości paliwa, nieodpowiedniego współczynnika nadmiaru powietrza λ , nierównomiernego wymieszania tlenu z cząsteczkami palnymi, po niską temperaturę spalania [VBV11, VBD12, Jus11, LHD04]. Generowanie tlenków azotu w niskotemperaturowych kotłach peletowych jest wynikiem utleniania azotu zawartego w masie drzewnej, tzw. azotu paliwowego. Termiczny mechanizm powstawania związków azotu w tym przypadku praktycznie nie ma miejsca, ze względu na zbyt niską temperaturę w strefie spalania. Obecnie w Polsce nie obowiązują regulacje prawne dotyczące emisji NO_x dla kotłów o mocy do 1 MW, lecz w takich krajach jak Niemcy, Austria czy Dania takie obostrzenia są wprowadzone.

Obiektem badań na potrzeby niniejszej pracy jest niskotemperaturowy kocioł wodny *Orligno* 400 o mocy znamionowej 16 kW, wyposażony w zrzutkowy palnik peletowy, zainstalowany w Laboratorium Techniki Spalania w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej na Politechnice Opolskiej. Kocioł pozyskano w ramach współpracy z lokalnym producentem – firmą Eko-Vimar Orłański z Otmuchowa. Standardowo kocioł posiada sterownik, pracujący w oparciu o pomiar temperatury cieczy na wyjściu oraz temperaturę spalin w czopuchu kominowym. Funkcje obsługi urządzeń peryferyjnych, takich jak pompy obiegowe, zawory, zbiornik buforowy, nie będą rozpatrywane w niniejszej pracy.

Głównym zadaniem sterownika w kotłach małych mocy jest utrzymywanie temperatury cieczy (przeważnie wody) dostarczanej do systemu grzewczego poprzez regulację mocy. Zakładając, że układ regulacji spełnia wymagania dotyczące kontroli temperatury wody, to jednak proces spalania może nie być prowadzony w sposób ekologiczny i ekonomiczny z powodu niewłaściwie dobranego współczynnika spalania. Znalezienie optymalnego stosunku powietrza do paliwa wg kryterium wysokiej sprawności spalania i redukcji emisji CO oraz NO_x okazuje się zadaniem trudnym, gdyż żądana wartość λ zmienia się w zależności od jakości peletu, warunków pracy kotła (temperatura, ciąg kominowy) i jego aktualnego obciążenia [HrS11, HKB11]. Należy zauważyć, że kocioł opalany peletem jest urządzeniem stosunkowo drożym (w odniesieniu do kotła węglowego), dlatego podrażanie go o koszt zaawansowanych czujników i elementów wykonawczych nie jest wskazane. Stąd też próba wyznaczenia

modelu matematycznego stężenia tlenu w spalinach w oparciu o sygnały rejestrowane przez czujniki wybranych wielkości fizycznych, dla celów sterowania procesem spalania. Układ regulacji powinien reagować na spodziewane zakłócenie z wyprzedzeniem, nie dopuszczając do powstania fluktuacji procesu w komorze spalania, a co za tym idzie do wzrostu emisji szkodliwych związków w spalinach. Również elementy wykonawcze układu sterowania procesem powinny być standardowym wyposażeniem kotła, dlatego w niniejszej pracy rozpatrywany jest jedynie sposób regulacji stosunku powietrza do paliwa w komorze za pośrednictwem zmian strumienia powietrza włączanego przez fabrycznie zainstalowany wentylator nadmuchowy.

Opierając się na powyższym, sformułowano tezę pracy.

1.1. Teza pracy

Modelowanie i identyfikacja własności dynamicznych kotłów grzewczych małej mocy może prowadzić do efektywnego sterowania procesem spalania w oparciu o model, a przez to do redukcji emisji powstających przy spalaniu szkodliwych związków chemicznych, tj. tlenku węgla (CO) i tlenków azotu (NO_x).

1.2. Cel pracy

Podstawowym celem niniejszej pracy jest wyznaczenie dla celów sterowania modelu dynamicznego kotła grzewczego małej mocy opalanego peletem drzewnym oraz zaprojektowanie układu regulacji strumieniem powietrza w celu optymalizacji parametrów ekologiczno-ekonomicznych kotła.

Aby osiągnąć cel podstawowego wyszczególniono szereg celów szczegółowych pracy:

- zbudowanie układu badawczego implementującego zarówno środowisko pracy kotła, jak również układy kontrolno-pomiarowe pozwalające na sterowanie wielkościami wejściowymi oraz archiwizację danych pomiarowych,
- opracowanie efektywnego modelu fizykalnego procesów zachodzących w kotle, określającego ilościową zawartość powietrza nadmiarowego na wyjściu z kotła,
- opracowanie modelu dynamicznego efektywnego dla celów sterowania,
- opracowanie przykładowego układu regulacji predykcyjnej oraz jego implementacja na obiekcie rzeczywistym,
- przeprowadzenie analizy efektywności opracowanego układu regulacji w kontekście emisji szkodliwych związków.

1.3. Aktualny stan wiedzy

Problematyka modelowania i sterowania obiektami cieplnymi opalanymi biomasa, ich konstrukcje, aspekty ekologiczne i ekonomiczne są w ostatnich latach tematami podejmowanymi na światowych konferencjach i publikowanymi w uznanych czasopismach. Taki stan rzeczy jest wynikiem poszukiwania coraz czystszych i bardziej efektywnych technik spalania paliw odnawialnych, których stosowanie wymuszają krajowe i międzynarodowe uregulowania prawne. Ponieważ spalanie biomasy w kotłach energetycznych można traktować jako dziedzinę interdyscyplinarną, to obszar analizowanej literatury jest również bardzo szeroki. Autor dokonał przeglądu publikacji z zakresu jakości paliw w postaci peletu, konstrukcji kotłów, norm i certyfikatów emisji, modelowania oraz sterowania.

Ponieważ duży wpływ na zawartość szkodliwych związków w spalinach powstałych w wyniku spalania peletu ma jakość stosowanego paliwa, dokonano analizy i porównania peletu używanego w wiodących ośrodkach badawczych z paliwem spalany w obiekcie będącym przedmiotem pracy. Oprócz parametrów fizykochemicznych peletu zarówno pochodzenia drzewnego, jak i wytworzonego z innych surowców organicznych, publikowane są również charakterystyki przemian termicznych, mechanizmy powstawania produktów spalania, wyznaczenie sprawności procesu [JBM98, FGP15, VBD12, SPM13]. W kotłach dużej mocy, mowa tu również o urządzeniach pracujących w obiektach energetyki zawodowej, może być spalana biomasa o gorszej jakości biorąc za kryterium skład chemiczny i właściwości fizyczne. W kotłach tych spalane lub współspalane są zrębki drewna i roślin energetycznych [DFG15, SCS14, SRS14], biomasa agro (np. słoma), odpady poprodukcyjne przetwórstwa owoców i warzyw, ziarna i łuski ziaren, jak również osady ściekowe i inne. Paliwa te mogą być dozowane w postaci zrębków (ang. *chips*) oraz peletu w stanie roboczym (ang. *as received*) lub toryfikowanym, czyli poddanym działaniu wysokiej temperatury, zwykle przez omywane strumieniem gorących spalin. Głównymi parametrami biopaliwa, decydującymi o możliwości racjonalnego wykorzystania ich do spalania w małych instalacjach, jest wartość opałowa, zawartość wilgoci w stanie roboczym i udział masowy popiołu. Pierwszy z nich decyduje o gęstości energetycznej, a co za tym idzie masie paliwa, które trzeba zmagazynować i spalić w małym kotle zainstalowanym w budynkach jedno- i wielorodzinnych dla zapewnienia żądanej ilości energii cieplnej. Wilgoć zawarta w paliwie w znaczący sposób wpływa na jakość spalania w małych kotłach, gdzie temperatury w komorze spalania nie przekraczają 900 °C, a energia zmagazynowana w złożu jest niewielka. Stąd woda, która musi być odparowana z paliwa wprowadza zakłócenia w proces spalania. Zawartość popiołu jest również ważnym kryterium mającym wpływ na stosowanie biomasy w domowych kotłach, gdyż usuwanie niepalnej części paliwa z komory spalania i tzw. popielnika jest problematyczne. Poza tym, popiół w niekorzystnych warunkach może ulec zużłowaniu, zaburzyć przepływ powietrza przez złożę i pogorszyć warunki spalania. Mając na uwadze powyższe, do zasilania kotłów wodnych małej mocy, instalowanych głównie w domkach jednorodzinnych, należy stosować pelet pochodzenia drzewnego (świerk,

sosna). Dokładną analizę peletu spalane go podczas prowadzenia badań na potrzeby niniejszej pracy przedstawiono w Rozdziale 2.

Ogromne ilości biopaliw stałych spala się w dużych kotłach energetycznych o mocach do kilkuset MW, gdyż uregulowania prawne nakładają na ten sektor obowiązek współspalania biomasy z węglem [SCS14]. Tematyka dotycząca podawania biomasy do komory spalania, sterowania procesem i emisją zanieczyszczeń dla obiektów dużej mocy jest opisywana szeroko w literaturze światowej.

O ile urządzenia dużej mocy opalane biomasą, stosowane w energetyce zawodowej, są często podejmowanym tematem [DFG15, SCS14, SRS14], o tyle kotły wodne małej mocy, których identyfikacja i sterowanie są przedmiotem niniejszej pracy, omawiane są na łamach zaledwie kilkudziesięciu periodyków i materiałów konferencyjnych. Należy zaznaczyć, że uwaga autora skupiała się w obrębie kotłów wodnych opalanych peletem drzewnym, których moc znamionowa nie przekracza 500 kW, gdyż takie urządzenia zalicza się do obiektów tzw. małej mocy (wg PN-EN 303-5:2012). Mimo wyżej opisanych stwierdzeń, pokrewna tematyka dotycząca np. peletu wyprodukowanego z innych niż drewno surowców, lub kotłów o mocy przekraczającej umowną wartość [GoN98, KBL09, Ruu06], pozwoliła autorowi na umiejscowienie badanego obiektu w szerokim i cieszącym się dużym zainteresowaniem obszarze spalania biopaliw stałych.

Do identyfikacji obiektu rzeczywistego, jakim jest przedmiotowy kocioł grzewczy, konieczne jest zastosowanie sprzętu pomiarowo-rejestrującego, mierzącego wybrane wielkości fizyczne niosące informacje o procesach zachodzących w kotle. W skład systemu kontrolno-pomiarowego wchodzi czujniki i urządzenia nie będące standardowym wyposażeniem kotła z uwagi na konieczność obniżania kosztów. W wiodących ośrodkach badawczych, takich jak Uniwersytet Techniczny w Pradze, zajmujących się tematyką kotłów peletowych małych mocy, używana jest wyspecjalizowana, dedykowana aparatura, opisywana w publikacjach [HSP11, CCS06, PiM12, Ruu06]. Również stosowane czujniki wielkości fizycznych, mierzące zwłaszcza stężenia wybranych składników spalin oraz temperatury, są przedstawiane w artykułach związanych z tematyką spalania biomasy [BoM06, DoC02, BHK09, Pad02, PMH13, LCS11].

Idea stosowania zaawansowanych algorytmów do sterowania procesem spalania w kotłach opalanych biomasą wymaga wyznaczenia modelu matematycznego obiektu. Sterowanie w oparciu o model pozwala osiągnąć lepsze wyniki jakościowe w porównaniu do zastosowanych klasycznych regulatorów. Jednocześnie należy mieć na uwadze, że system sterowania kotłem małej mocy powinien być możliwie tani, przyjazny dla użytkownika i nie wymagający wysokich nakładów sprzętowych. Stąd też starania, aby również model tego bardzo złożonego obiektu jakim jest kocioł, był możliwie prosty, wystarczający dla celów sterowania. Procesy fizykochemiczne zachodzące w obiekcie są niewątpliwie trudne do opisanie matematycznego, jeżeli brać pod uwagę reakcję spalania, przepływy powietrza i spalin, promieniowanie, konwekcję itp., jednakże dla celów sterowania dopuszcza się stosowanie uproszczonych modeli fizykalnych, opisujących podstawowe przemiany energetyczne. Procesy chemiczne,

stechiometrię spalania, oraz mechanizmy powstawania produktów spalania biomasy w postaci peletu przedstawiono w Rozdziale 2. Modelowanie badanego kotła oraz podstawowych procesów w nim zachodzących opisano w Rozdziale 4 niniejszej pracy.

W literaturze przedstawione są różne podejścia do modelowania procesów zachodzących w kotle małej mocy, które jednak zasadniczo mają prowadzić do zwiększenia efektywności spalania i zmniejszenia ilości szkodliwych związków emitowanych do atmosfery. Zagadnienia spalania biomasy drzewnej opisywane matematycznie w literaturze można podzielić na modelowanie procesu spalania i mechanizmów powstawania zanieczyszczeń [HoB10, MMH06, Nus03] oraz modelowanie kotłów, jako złożonych urządzeń i powiązanych z nimi zjawisk fizycznych [PCP09, SVH09, RuL02, DIJ12, GRB14].

Spotykane są blokowe modele opisujące zależności między strumieniem paliwa, powietrza, energią cieplną i temperaturą, w których trudne do zdefiniowania matematyczne zależności uproszczono i zastąpiono przez relacje wyznaczone eksperymentalnie. Jednakże dla celów sterowania, a co za tym idzie ograniczenia emisji szkodliwych związków, tego typu model jest zbyt dokładny i wymaga wielu danych dla jego weryfikacji. Z uwagi na powyższe, w pracy [SVH09] zdecydowano się na utworzenie i zastosowanie modeli zdefiniowanych za pomocą logiki rozmytej. Zastosowano specjalne czujniki nie będące standardowym wyposażeniem kotła, takie jak: czujnik O_2 , CO , CO_2 , NO_x oraz czujnik prędkości spalin. Wykonano szereg testów dla różnych wartości obciążenia kotła, z których dane były użyte do wyznaczenia parametrów rozmytego modelu. Wielkościami wejściowymi dla modelu rozmytego były wyniki pomiarów wartości NO_x , O_2 , stopień obciążenia kotła oraz okres podawania paliwa. Modelowano i porównano z wynikami rzeczywistymi zmienne mające decydujące znaczenie dla środowiska oraz sprawność obiektu, a więc stężenia CO , CO_2 , NO_x , temperaturę spalin i prędkość spalin na wyjściu z kotła. Jednakże liczba reguł rozmytych obowiązująca w proponowanym modelu rozmytym jest bardzo wysoka i złożona obliczeniowo w celu zastosowania jej do sterowania w czasie rzeczywistym. Dlatego też w publikacji tej przebadano także model neuronowy składający się z podwójnej warstwy sieci neuronowej z wielowarstwową architekturą percepcji.

Model stężenia CO_2 w spalinach oparty o strukturę rozmytego modelu Takagi-Sugeno, oraz porównanie go z wynikami innych modeli przedstawiono w [RuL02], gdzie obiektem był kocioł małej mocy opalany drewnem brzozy i topoli podawanym ręcznie. Modele mechanizmów ubytku masy paliwa, sprawności oraz mocy w postaci równań różniczkowych opisane są w [DIJ12], jednakże obiektem jest kocioł z ręcznym załadunkiem słomy i tylko w nielicznych aspektach może być porównany do badanego przez autora kotła.

W artykule [GRB14] przedstawiono model matematyczny kotła na zrębki drzewne, opisany równaniami różniczkowymi. Do wyznaczenia modelu kocioł został podzielony na cztery główne elementy składowe: układ podawanie powietrza i paliwa, złożo, komorę spalania oraz wymiennik ciepła.

Ostatecznie kocioł został opisany modelem trzeciego rzędu w przestrzeni stanu

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{c_{11}}{1 + c_{12}d_1}x_1 + \frac{d_1}{1 + c_{12}d_1}u_1 \quad (1.1)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{c_{21}}{1 + c_{12}d_1}x_1 - c_{22}x_2u_2 + \frac{d_1}{1 + c_{12}d_1}u_1 \quad (1.2)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = c_{31}x_1 + c_{32}x_2u_2 + c_{33}u_3 + c_{34}d_3(d_4 - x_3) \quad (1.3)$$

z trzema zmiennymi wejściowymi $u_1...u_3$ oraz stężeniem tlenu resztkowego w spalinach i temperaturą wody wychodzącej jako sterowane zmienne wyjściowe

$$y_1 = \frac{c_{51}x_2u_2 + c_{52}u_3}{c_{53}x_1 + c_{54}x_2u_2 + c_{55}u_3} \quad (1.4)$$

$$y_2 = x_3 \quad (1.5)$$

Zasadniczo każda pomiarowo dostępna zmienna wyjściowa, która może być przedstawiona jako funkcja zmiennej stanu, może być użyta do korekcji predykowanych zmiennych stanu. Jednakże z praktycznych uwarunkowań, jedynie stężenie tlenu w spalinach oraz temperatura wody wychodzącej z kotła są właściwymi do zastosowania w filtrze Kalmana zmiennymi. Z tego powodu autorzy wprowadzili dodatkowe zmienne: strumień masowy tzw. „fałszywego powietrza” $x_4 = \dot{m}_{fa}$ i współczynnik podawania paliwa $x_5 = k_{ff}$. W rezultacie zaproponowano model nieliniowy

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{c_{11}}{1 + c_{12}d_1}x_1 + \frac{d_1}{1 + c_{12}d_1}x_5u_1 + w_1 \quad (1.6)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{c_{21}}{1 + c_{12}d_1}x_1 - c_{22}x_2u_2 + \frac{d_1}{1 + c_{12}d_1}x_5u_1 + w_2 \quad (1.7)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = c_{31}x_1 + c_{32}x_2u_2 + c_{33}(x_4 + u_3) + c_{34}d_3(d_4 - x_3) + w_3 \quad (1.8)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = w_4 \quad (1.9)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = w_5 \quad (1.10)$$

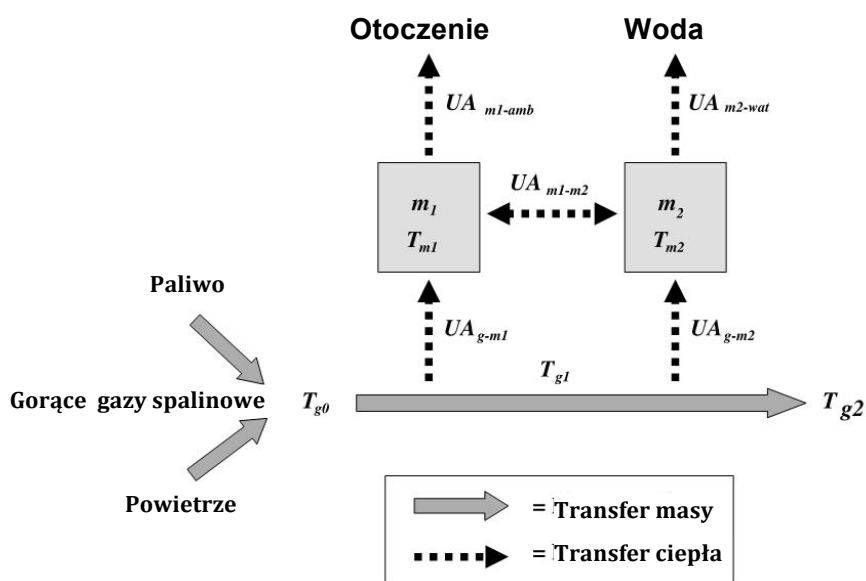
$$y_1 = \frac{c_{51}x_2u_2 + c_{52}(x_4 + u_3)}{c_{53}x_1 + c_{54}x_2u_2 + c_{55}(x_4 + u_3)} + v_1 \quad (1.11)$$

$$y_2 = x_3 + v_2 \quad (1.12)$$

gdzie	$x_1...x_5$	zmiennie stanu,
	$u_1...u_3$	zmiennie wejściowe,
	$d_1...d_4$	zmiennie zakłóceń,
	y_1, y_2	pomiarowo dostępne zmiennie wyjściowe,
	$c_{11}...c_{55}$	estymowane współczynniki,
	$w_1...w_5$	sygnał z zerową wartością średnią,
	v_1, v_2	szum pomiarowy.

Powyższe zmiennie są linearyzowane i dyskretyzowane w każdym kroku sterowania, a następnie równania filtra Kalmana są dostosowane do wynikowego, dyskretnego, zlinearyzowanego modelu.

Walidację dynamicznego modelu matematycznego kotła małej mocy opalanego peletem opisano w artykule [PFN09]. Zestawiono wyniki symulacji z wykorzystaniem komponentu programowego TRNSYS w środowisku Fortran z danymi otrzymanymi drogą pomiarową w warunkach rzeczywistych zasadniczo dla dwóch parametrów, tj. bilansu energetycznego (sprawności) oraz emisji tlenu węgla. Schemat blokowy modelu przedstawiono na Rys. 1.1.



Rys. 1.1. Schemat modelu kotła na pelet [PFN09].

Techniki sterowania pracą kotłów małych mocy na pelet drzewny obejmujące stabilizację temperatury lub zwiększenie sprawności procesu spalania i redukcji emitowanych zanieczyszczeń są przedmiotem badań ośrodków głównie w Czechach, Finlandii i Austrii. Do publikacji przeglądowych, w których przedstawia się różne sposoby regulacji ze względu na wielkość pomiarową wykorzystaną jako sygnał sprzężenia zwrotnego, należą [Pad02, Nus99]. Zastosowanie klasycznych metod sterowania kotłami na pelet pochodzenia drzewnego realizujących algorytm *PID* w oparciu o sygnały zwrotne z czujnika stężenia tlenu resztkowego, temperatury wody, spalin wewnątrz komory spalania i czopuchu, podciśnienia w komorze spalania przedstawiono w [HKB11, HrS11, HSP11, Nus99], natomiast koncepcje bazujące na

modelu opisuje [Ruu09]. Literatura opisuje również wykorzystanie regulatorów rozmytych sterujących procesem spalania peletu [SVH09] a także użycia sieci neuronowych [SVH09, VPO14]. Tematem pokrewnym opisywanym w literaturze jest sterowanie kotłami średniej i małej mocy opalonymi zrębkami drzewnymi [KBL09, PiM12, PMH13, GRB14] z wykorzystaniem technik zbliżonych do wyżej przedstawionych.

Praca [HKB11] skupia się na badaniu różnych metod sterowania procesem spalania peletu drzewnego w kotle o mocy 25 kW z palnikiem zrzutkowym, pracującego z mocą nominalną. Analizę procesu i sterowanie oparto o pomiar stężenia tlenu w spalinach oraz temperatury w górnej części komory spalania, jako najszybciej i najsilniej reagującej na fluktuacje zachodzące w złożu. Pokazano, że w/w wartość temperatury dobrze koreluje z zawartością tlenu w spalinach, przy czym nie wprowadza dodatkowego opóźnienia, które cechuje pomiar analizatorem spalin. Czujnik termoelektryczny został umieszczony możliwie blisko strefy spalania, jednak w takiej odległości, aby nie rejestrował zakłóceń wprowadzanych przez promieniowanie lub bezpośrednie działanie płomienia. Identyfikację oparto o odpowiedź skokową obiektu. Autorzy publikacji [HKB11] przeprowadzili badania dla następujących przypadków:

- sterowanie w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (ang. *open loop control*)
- sterowanie poprzez regulację strumienia powietrza w układzie z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego z pomiarem zawartości tlenu w spalinach [GoN98, PMH13, PiM12].
- sterowanie poprzez regulację strumienia paliwa w układzie z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego z pomiarem zawartości tlenu w spalinach
- sterowanie poprzez regulację strumienia paliwa w układzie z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego z pomiarem temperatury w górnej części komory spalania [Nus99, HSu11].

Do eksperymentu wykorzystano standardowy regulator PID [Pad02], strojony kilkoma technikami; metodą lokacji biegunów, metodą Åströma-Murraya i metodą AMIGO zaproponowaną przez Åströma i Hägglanda [ÅSH06]. Klasyczna metoda Zieglera-Nicolsa prowadziła do zbyt dużych wzmocnień i nie została wykorzystana.

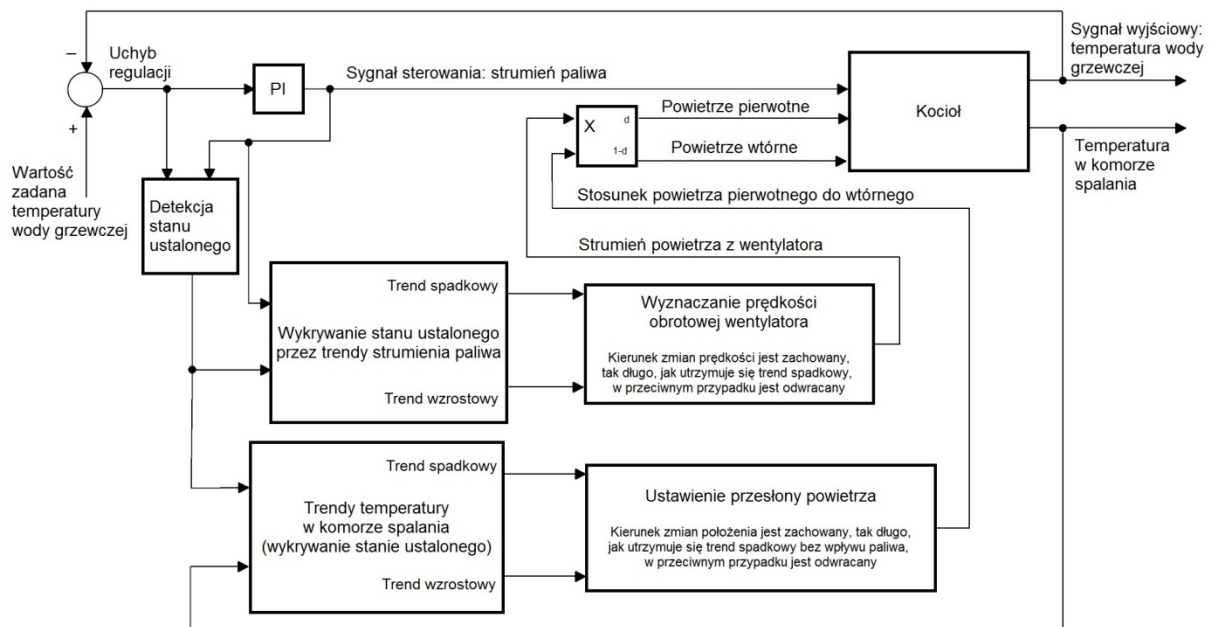
Tabela 1.1. Zestawienie wyników testowania różnych metod regulacji

Sposoby sterowania procesem	Metoda strojenia	Parametry PID	Wartość zadana
		K/T _i /T _d	
Sterowanie wartością O ₂ poprzez zmianę dostarczanego powietrza	AMIGO PI	2.4/125/0	10.5 %
	AMIGO PID	5.5/100/18	10.5 %
	Å&M PI	3.1/174/0	10.5 %
	Lokowanie biegunów	2.7/484/0	10.5 %
Sterowanie wartością O ₂ poprzez zmianę ilości dostarczanego paliwa	AMIGO PI	-0.00133/719/0	10.5 %
Sterowanie wartością temperatury poprzez zmianę ilości dostarczanego paliwa	Å&M PI	8.37*10 ⁻⁴ /722.5/0	480 °C
	AMIGO PI	4.9*10 ⁻⁴ /7035/0	500 °C

1. Wstęp

W przypadku gdy elementem wykonawczym układu regulacji jest wentylator nadmuchowy, sygnał sterujący definiowany jest jako częstotliwość wyjściowa przemiennika zasilającego silnik wentylatora. Podczas gdy sterowanie odbywa się poprzez regulację strumienia paliwa, sygnałem sterującym jest czas przerwy w podawaniu (silnik podajnika pracuje w trybie dwustanowym τ_1/τ_0).

Inne podejście do problematyki sterowania procesu spalania przedstawiono w publikacjach [HrS11, HSu11, OsS12], gdzie zaproponowano rozbudowany układ regulacji kotła o mocy 50 kW opalanego peletem drzewnym. Założono w nim, że należy stabilizować wartość zadaną temperatury wody wypływającej z kotła poprzez zmianę strumienia paliwa podawanego do komory spalania. Jednocześnie konieczne jest dostosowanie optymalnego (w sensie jakości spalania) strumienia powietrza potrzebnego do spalania zmiennej ilości peletu. Prosty regulator, będący standardowym wyposażeniem kotła, nie jest w stanie kontrolować jakości procesu spalania i jego zadanie ogranicza się do zapewniania żądanej temperatury z możliwie niskimi oscylacjami. Dlatego zaproponowano układ regulacji PI rozszerzony o blok optymalizacji warunków spalania. Dostosowując strumień powietrza do aktualnego zapotrzebowania na paliwo, można wpłynąć na sprawność procesu spalania, a co za tym idzie zminimalizować stężenie szkodliwych związków w spalinach (głównie CO , NO_x , C_xH_y). Jednak aby to osiągnąć potrzebna jest informacja o warunkach panujących w komorze spalania, dostarczana w tym przypadku za pośrednictwem czujnika temperatury.

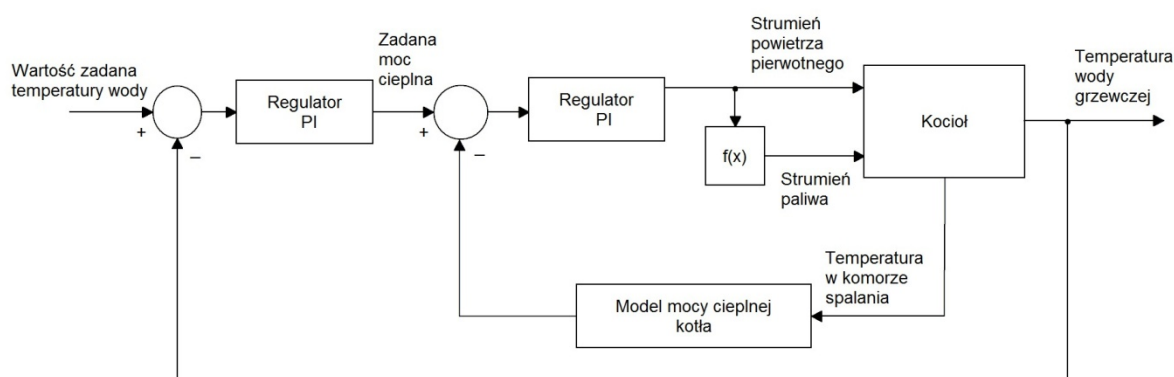


Rys. 1.2. Schemat blokowy sterowania temperaturą wody grzewczej opartego o regulator PI rozszerzony o algorytm optymalizacji spalania [HrS11, HSu11].

Stosunek ilości powietrza do paliwa (ang. *air to fuel ratio*) nie może być określony w regulatorze na stałą wartość i musi być adaptowany do zmieniających się warunków spalania. Strategię proponowanego rozwiązania można przestawić następująco: ustawić żądaną wartość wielkości regulowanej w standardowym algorytmie PI, a podczas pracy

w stanie ustalonym przeprowadzić wyznaczenie *on-line* nowych nastaw, których optymalna wartość jest wskazywana pośrednio za pomocą ekstremów w zależnościach dla stanu ustalonego. Cel regulacji dotyczy mocy kotła, efektywności spalania oraz stężenia niepożądanych związków w spalinach. Zadanie optymalnej pracy kotła można interpretować w ten sposób, że należy utrzymywać temperaturę wody grzewczej na zadanym poziomie poprzez zmiany strumienia paliwa tak, aby sterowanie ilością powietrza prowadziło do minimalizacji zapotrzebowania na paliwo, przy zachowaniu możliwości utrzymania zadanej temperatury. Należy się wtedy spodziewać, że maksymalna sprawność pracy kotła zostanie osiągnięta.

Strategia sterowania mocą jako wielkością wyjściową, bazująca na modelu matematycznym przedstawiona jest w [Ruu1], gdzie niwelowane są fluktuacje mocy spowodowane zmianą parametrów jakościowych paliwa, np. zawartością wilgoci. Na podstawie pomiaru temperatury w komorze spalania regulator może wyznaczyć bez opóźnienia wartość bezwzględną mocy wyjściowej i praktycznie w czasie rzeczywistym wpłynąć na proces spalania w celu jej stabilizacji.

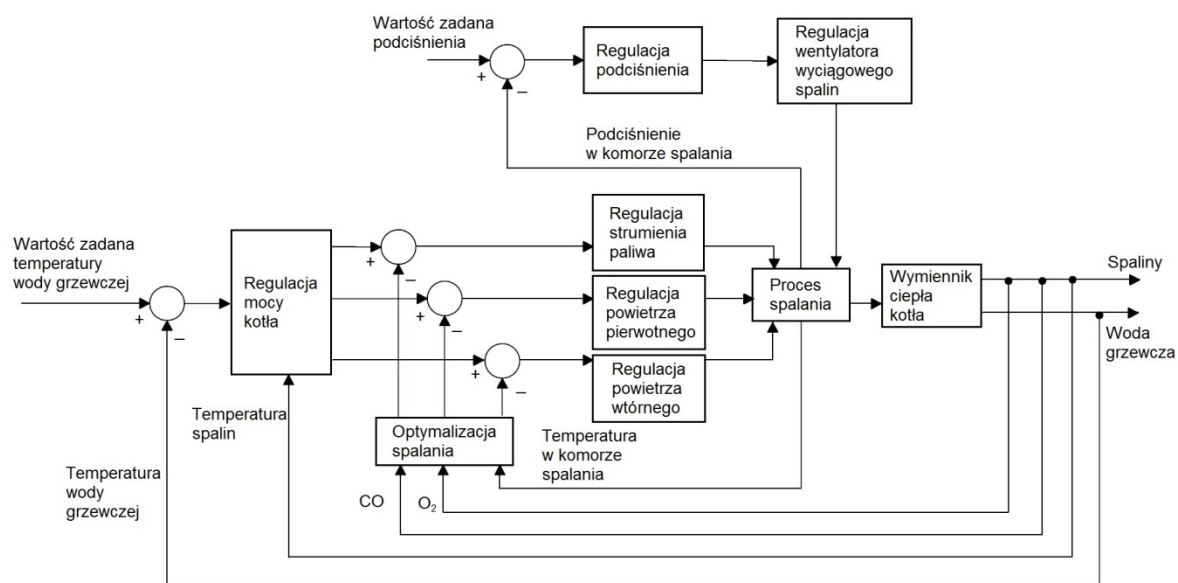


Rys. 1.3. Strategia stabilizowania mocy kotła w układzie z wykorzystaniem modelu [Ruu01].

Koncepcja sterowania bazuje na regulowaniu ilości powietrza pierwotnego odpowiednio do aktualnego obciążenia cieplnego kotła i zadanej temperatury wody grzewczej. Strumień masowy paliwa jest dopasowywany do aktualnej wartości przepływu powietrza pierwotnego. Górna i dolna granica zmian przepływu powietrza jest określana na podstawie estymowanej cieplnej mocy wyjściowej i stosunku powietrza pierwotnego do wtórnego. Powyższa zależność definiuje również zakres, w którym strumień paliwa pozostaje stały podczas stanu ustalonego dla mocy wyjściowej. Współczynnik nadmiaru powietrza jest ustawiany w oparciu o modelowaną zawartość wilgoci w paliwie [Ruu08].

Część prac badawczych opisywanych w literaturze, dotyczy sterowania kotłami małej mocy opalonymi zrębkami drzewnymi [PiM12, KBL09, GRB14]. Urządzenia te są bardzo zbliżone w budowie i działaniu do kotłów peletowych, a w niektórych przypadkach mają możliwość spalania obu tych paliw. Stąd przedstawione zostały również koncepcje sterowania kotłami na zrębki drzewne.

Rozbudowany układ sterowania pracą kotła małej mocy opalanego zrębkami drzewnymi, z zastosowaniem wielokrotnej pętli sprzężenia zwrotnego zaproponowano w publikacjach [PiM12, HoB10]. Informacje zwrotne o przebiegu procesu spalania oraz temperaturze i mocy kotła są dostarczane przez czujniki stężenia CO , O_2 , temperatur w wybranych punktach kotła oraz podciśnienia w komorze spalania. Układ sterowania wyposażono w blok optymalizacji procesu spalania, który odpowiada za zmianę stężenia tlenu w spalinach w celu utrzymania reżimu na emisję CO . Jednym z zadań układu regulacji jest dobór takiego współczynnika nadmiaru powietrza λ , aby wartość stężenia tlenu węgla była możliwie niska, nawet przy zmiennych parametrach paliwa.



Rys. 1.4. Schemat blokowy kotła opalanego biomasą z układem sterowania i blokiem optymalizacji procesu spalania [PiM12, HoB10].

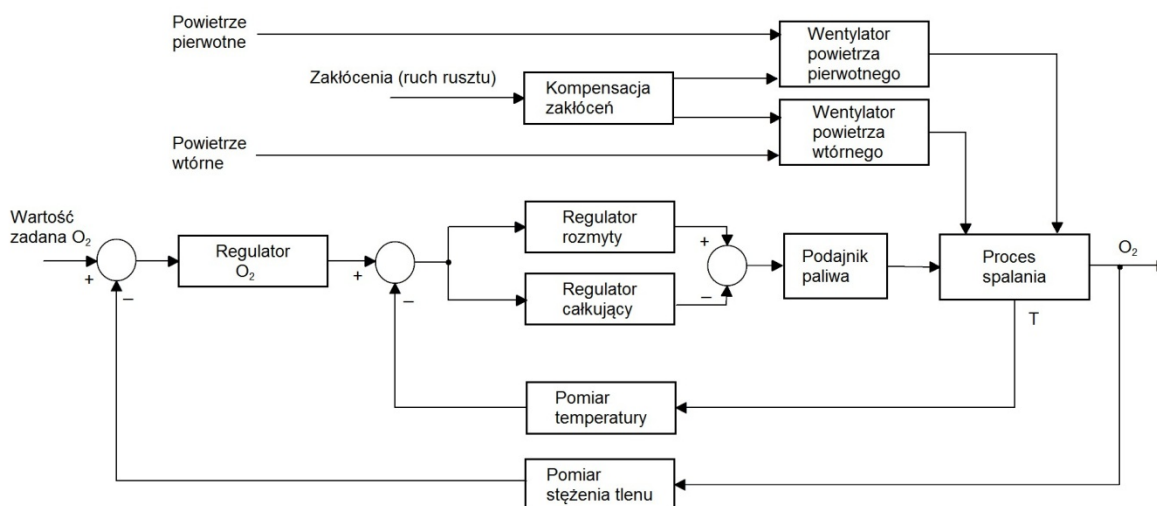
Działanie powyższego układu regulacji można opisać następująco:

- pętla sterowania strumienia paliwa dostosowuje ilość podawanej biomasy do aktualnego zapotrzebowania na moc cieplną,
- pętla sterowania powietrza pierwotnego wyznacza ilość dostarczanego w złożę powietrza w odniesieniu do strumienia paliwa i aktualnej temperatury wody wyjściowej,
- pętla sterowania powietrza wtórnego odpowiada za dostarczanie tlenu w strefę płomienia w ilości zależnej od aktualnego strumienia paliwa i zawartości tlenu resztkowego w spalinach,
- pętla sterowania podciśnienia w komorze stabilizuje podciśnienie w komorze spalania na ustawionej wartości.

Kaskadowy system sterowania procesem spalania i mocą kotła, oparty o sprzężenie zwrotne z wykorzystaniem czujników tlenu w spalinach (tzw. sondy lambda) oraz czujnika temperatury w górnej części komory spalania [HKB11] zaproponowany został przez zespół z Uniwersytetu Technicznego w Tampere w Finlandii [KBL08]. Jakkolwiek

1. Wstęp

badane kotły o mocy 80 kW i 200 kW przeznaczone są do spalania zrębków drzewnych, to autorzy publikacji deklarują, że można je zasilać inną formą biomasy, np. peletem. Dodatkowo układ sterowania zawiera blok sterowania predykcyjnego, który przeciwdziała z wyprzedzeniem zakłóceniom wprowadzanym cyklicznie przez układ automatycznego czyszczenia rusztu.



Rys. 1.5. Kaskadowa pętla regulacji [HKB11].

Układ regulacji przedstawiony na Rys.1.5 zawiera dwie pętle: pętla pierwotna odpowiedzialna jest za stabilizowanie zawartości tlenu w spalinach, natomiast pętla wtórna reguluje wartość temperatury. Zastosowanie regulatora rozmytego spowodowane jest potrzebą gwałtownego zwiększenia ilości podawanego paliwa po spadku temperatury. Ponadto, gdy proces zbliża się do stanu ustalonego, podawanie paliwa powinno wrócić do poprzedniej wartości. Taki rodzaj nieliniowego sterowania nie może być więc osiągnięty przez standardowy regulator *PID*.

Tabela 1.2. Reguły regulatora rozmytego [HKB11].

e/Δe	NL	NS	Z	PS	PL
NL	SL	SL	B	B	B
NS	SL	SS	B	B	B
Z	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	AS	AL
PL	B	B	AS	AL	AL

Powyższa Tabela 1.2 zawiera reguły sterowania rozmytego. W pierwszej kolumnie zawarto uchyb regulacji (e), natomiast pierwszy wiersz zawiera zmiany uchybu regulacji (Δe). Decyzje regulatora opisane są za pomocą oznaczeń: N =negatywny, P =pozytywny, S =mały, L =duży, Z =zero, natomiast operacje to: S =różnica, A =suma, B =baza, S =mało,

L =dużo. Przykładowo, jeżeli uchyb regulacji jest pozytywny (P), mały (S) oraz jeżeli zmiana (Δe) jest pozytywna (P) i duża (L) to dodaj (A) dużo (L).

Algorytm sterowania w oparciu o przedstawiony w [GRB14] model matematyczny opisany równaniami różniczkowymi, pozwala na regulację stężenia tlenu w spalinach, a przez to pośrednio zwiększa sprawność procesu spalania i minimalizuje emisję zanieczyszczeń. Autorzy dokonali porównania nowej metody sterowania w oparciu o model z konwencjonalnymi układami regulacji temperatury wody zasilającej i stężenia tlenu resztkowego w spalinach. Proponowane rozwiązanie daje dobre rezultaty w ograniczeniu tlenków węgla, zarówno w stanie ustalonym jak i w okresach przejściowych pracy kotła.

Przywołane przykłady realizacji układów sterowania spalania biomasy drzewnej w kotłach małej mocy dowodzą, że wciąż poszukiwane są algorytmy zapewniające właściwy, tzn. optymalny w aspektach ekonomicznych i ekologicznych proces. Należy zaznaczyć, że nie każde proponowane rozwiązanie może być zaimplementowane w obiektach małej mocy, chociażby ze względu na złożoność obliczeniową i wymagany sprzęt pomiarowo-wykonawczy, co generuje wysokie koszty, niewspółmierne do ceny samego kotła. Proponowane przez autora niniejszej pracy podejście do zagadnienia, nie jest dotychczas opisane w literaturze światowej i może być obiecującym, alternatywnym kierunkiem rozwoju układów regulacji dla kotłów małej mocy.

1.4. Zawartość pracy

Struktura niniejszej pracy przedstawia się następująco; w rozdziale pierwszym przedstawiono problematykę tzw. rozproszonej energetyki oraz emisji szkodliwych produktów spalania biomasy w kotłach wodnych małej mocy. Rozdział ten zawiera również cel i zakres pracy oraz sformułowaną tezę pracy. Drugi rozdział opisuje tematykę spalania, jako procesu fizykochemicznego, charakterystykę paliwa pochodzenia drzewnego, konstrukcję kotłów oraz normy emisji obowiązujące w Europie. Kolejny, trzeci rozdział, to prezentacja stanowiska badawczego, opis sprzętu pomiarowego i urządzeń wykonawczych. Modelowanie kotła jako systemu o złożonej strukturze dla celów sterowania przedstawiono w rozdziale czwartym. Dalsza część tego rozdziału zawiera weryfikację wyznaczonego modelu oraz uproszczenie go do modelu Hammersteina, jako wystarczającego dla celów projektowania regulatora. Rozdział piąty traktuje o sterowaniu procesem z zastosowaniem algorytmu regulacji predykcyjnej. Porównaniu i dyskusji poddano wyniki jakości sterowania obiektem rzeczywistym uzyskane podczas serii badań.

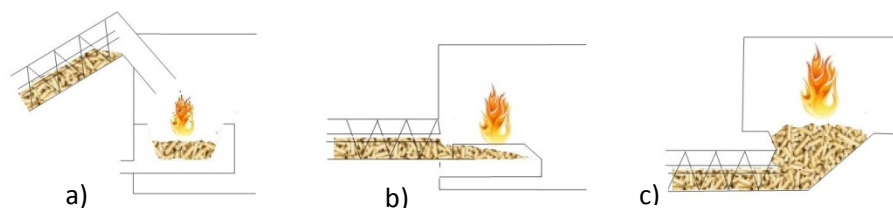
2. Spalanie biomasy w kotłach małej mocy

Spalanie biomasy w kotłach małej mocy stale zyskuje na popularności, zarówno w Polsce jak i na świecie. Powodem takiego stanu rzeczy jest głównie aspekt ekologiczny, bowiem spalanie biomasy powszechnie kojarzy się ze znacznie niższą emisją zanieczyszczeń. Ten sposób pozyskiwania energii cieplnej często nazywany jest „zielonym” lub „przyjaznym środowisku”, w porównaniu do spalania węgla lub oleju. Ponadto, wzrost liczby kotłów opalanych biomasą jest również skutkiem wyczerpywania się zasobów paliw kopalnych, a tym samym dążenia do pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych. Wśród różnych form biomasy spalanej w kotłach małych mocy, paliwem najpowszechniej stosowanym jest pelet drzewny, z powodu dużej gęstości energetycznej, niskiej zawartości wilgoci oraz popiołu, śladowych ilości siarki i azotu, a także wygodnej dla użytkownika formy transportu i składowania. Spalanie paliw stałych jest procesem złożonym, ze względu na specyficzne parametry fizykochemiczne oraz wynikające z nich wymagania dotyczące organizacji procesu, a w szczególności podawania paliwa i dystrybucji powietrza. Optymalne spalanie, mając za kryterium aspekty energetyczno-ekologiczne, wymaga odpowiednich technik sterowania. Zaawansowane algorytmy regulacji są konieczne, wobec stale zaostrzanych przepisów prawnych, dotyczących przede wszystkim granicznych wartości emisji takich zanieczyszczeń jak CO , NO_x , OGC oraz pyłów.

2.1. Kotły małej mocy na biomasę, rynek i konstrukcje

Kotły wodne niskotemperaturowe małych mocy są klasyfikowane wg różnych kryteriów, do których należą: rodzaj stosowanej biomasy, technika spalania, zastosowane rozwiązania konstrukcyjne i inne. Analiza rynku kotłów o mocach do 200 kW opalanych biomasą [MMG12] pokazuje, że ponad 1/3 z nich stanowią urządzenia do spalania peletu, co wynika z licznych zalet tego paliwa, opisanych w dalszej części niniejszego rozdziału. W zdecydowanej większości kotłów pelet spalany jest bezpośrednio w komorze paleniskowej, ale funkcjonuje także na rynku niewielka grupa urządzeń do zgazowania tego paliwa [INT16]. Klasyfikując kotły peletowe w oparciu o kryterium rozwiązań konstrukcyjnych, zasadniczo bierze się pod uwagę trzy elementy: komorę spalania, system podawania paliwa oraz wymiennik ciepła. W obszarze urządzeń o mocach do 40 kW na rynku europejskim zdecydowanie przeważają kotły ze złożem stałym (z rusztem i bez), które stanowią ok. 60 % [MMG12], z kolei wśród urządzeń większych mocy przewagę zyskują rozwiązania konstrukcyjne oparte o złożę ruchome, w tym popularne w Polsce palniki retortowe. Z pośród trzech głównych systemów podawania paliwa, w kotłach o mocach do 40 kW najpopularniejszy w Europie (55 % rynku) jest zasyp peletu od góry. Palniki z tzw. podawaniem górnym paliwa, w wykonaniach stalowych lub z wykorzystaniem materiałów ogniotrwałych [MMG12], są proste, funkcjonalne i bezpieczne (m.in. poprzez rozdział podawania paliwa od płomienia), niestety charakteryzują się często wyższymi poziomami emisji

zanieczyszczeń [VBV11, MMG12], ze względu na zaburzenia procesu spalania przez spadające w strefę płomienia paliwo.



Rys. 2.1. Systemy podawania paliwa w kotłach ze złożem stałym [HBK13],
a) horyzontalny, b) górny, c) dolny.

W 80 % kotłów peletowych dostępnych na rynku UE stosuje się wymienniki ciepła z kanałami pionowymi [MMG12] ze względu na niższą (w porównaniu do kotłów z wymiennikami poziomymi) depozycję pyłu na ich powierzchniach, szczególnie przy prawidłowo prowadzonym procesie spalania, co w konsekwencji znacznie poprawia wymianę ciepła. W większości kotłów peletowych (ok. 90 % [MMG12]) stosowane są wymienniki ciepła w postaci płomieniówek z zainstalowanymi wewnątrz turbulizatorami (zawirówaczkami) spalin, których zadaniem jest zwiększenie intensywności wymiany ciepła. W praktyce elementy te decydują o sprawności kotła, poprzez obniżenie temperatury spalin. Przeprowadzona przez autora analiza europejskiego rynku kotłów dowodzi, że badane w niniejszej pracy konstrukcja jest najpowszechniej stosowaną w przedziale mocy znamionowych do 20 kW.

2.2. Parametry fizykochemiczne paliw stosowanych w kotłach małej mocy

Kotły grzewcze małych i średnich mocy opalane są różnymi rodzajami biopaliw stałych, produkowanych z różnych surowców. O powszechności stosowania danego rodzaju paliwa decydują jego walory energetyczne i użytkowe, co uzasadnia duży popyt na pelet. Zużycie peletu na rynku europejskim osiągnęło poziom 18.8 mln ton w 2015 roku i stale rośnie [EAB15]. Szacuje się, że do 2020 roku popyt na pelet będzie wynosił ok. 40 mln ton rocznie [EAB15]. W Polsce w 2014 roku 60 % wyprodukowanego peletu zużyto w systemach wytwarzania ciepła średniej i małej skali.

Właściwości paliwa w głównym stopniu wpływają na proces spalania w kotle, uzyskiwane poziomy sprawności oraz emisję zanieczyszczeń, co jest przedmiotem wielu prac naukowych [SHT07, WiG04, VTB02, JMB98, OBB06]. Normy dotyczące metodyki badań kotłów małej mocy precyzują parametry fizykochemiczne paliwa stosowanego podczas testów spalania. Najczęściej wykorzystywane w testowaniu kotłów normy PN-EN 303-5:2012 oraz PN-EN 14785:2009 specyfikują poziomy zawartości wilgoci całkowitej, popiołu oraz wartości opałowej, jakie powinien spełniać pelet. Kompletna analiza fizykochemiczna paliwa ujmuje dodatkowo zawartość części lotnych w paliwie, udział karbonizatu oraz skład elementarny.

2. Spalanie biomasy w kotłach małej mocy

Biorąc pod uwagę powyższe, do badań własnych wytypowano pelet o nazwie handlowej *Olimp*, wyprodukowany przez przedsiębiorstwo Stelmet sp. z o.o. Pelet klasyfikowany jest w grupie A1 wg normy PN-EN 14961-2 „Biopaliwa stałe – Specyfikacja paliw i klasy – Część 2: Pelety drzewne do zastosowań nieprzemysłowych” oraz spełnia wymagania obu wyżej wymienionych norm stosowanych w testowaniu kotłów.

Tabela 2.1. Charakterystyka wybranych paliw w formie peletu drzewnego stosowanego w badaniach kotłów małej mocy.

Pelet	Parametry fizykochemiczne								wartość opałowa, $q_{v,net}$ (J/g)
	wilgoć całkowita, $w_{r,t}$ (%)	popiół, A_d (%)	części lotne, V_d (%)	fixed carbon, FC_d (%)	węgiel, c_r (%)	wodór, h_r (%)	azot, n_r (%)	siarka, s_r (%)	
wg PN-EN 303-5:2012	≤ 12	$\leq 0,5$							> 17
wg PN-EN 14785:2009	≤ 12	$\leq 0.5^a$	$80 \div 88^b$		$40 \div 50^a$	$5.0 \div 6.5^a$		$\leq 0.1^a$	$16.9 \div 19.5$
Pelet Olimp	5.74	0.21	87.10	12.69	50.88	6.95	0.15	0.048	19.35
Sosna [FeC11]	7.3	1.4	86.8	11.8	42.05	5.66	0.45	<0.01	17.10
Sosna [SPM13]	6.4	0.25	82.7	17.05	48.83	5.34	0.1	0.01	17.66
Świerk [CWP13]	10.2	0.21	-	-	42.30	5.54	0.17	0.09	16.72
Wierzba [FPM15]	9.6	4.4	-	-	46.57	5.90	0.54	0.03	14.30
Pył drzewny [LRL11]	9.76	0.9	80.6	18.5	45.57	6.41	0.08	0	17.92
drewno [DSR14]	5.4	0.3	83.2	16.5	47.84	5.61	0.08	0	17.58
drewno [FGP15]	6.85	0.44	73.54	26.02	43.98	5.77	0.13	-	16.28
drewno [FPM15]	6.3	0.3	-	-	48.07	6.00	0.12	0	16.30
drewno [JLG04]	7.6	0.5	-	-	46.38	5.45	0.07	-	17.37
drewno [KMP14]	7.1	0.5	-	-	46.17	5.30	0.05	0.01	16.90
drewno [SLE11]	7.6	0.26	-	-	46.20	5.82	0.11	0.01	17.07
drewno [CLW08]	9.4	0.2	-	-	45.93	5.35	0.18	-	16.80
drewno [VBD12]	7.14	0.7	-	-	45.97	5.85	0.37	0.01	17.40

a) stan roboczy (*r*), b) stan suchy i bezpopiołowy (*daf*)

W Tabeli 2.1 zestawiono parametry fizykochemiczne stosowanego paliwa na tle norm PN-EN 303-05:2012 i PN-EN 14785:2009 oraz peletów drzewnych testowanych w badaniach naukowych. W większości przypadków opisywanych w literaturze nie precyzowano gatunku drewna, z którego wyprodukowano paliwo. Analizując tabelę można zauważyć, że każdy z peletów spełniał wymagania w/w norm w zakresie

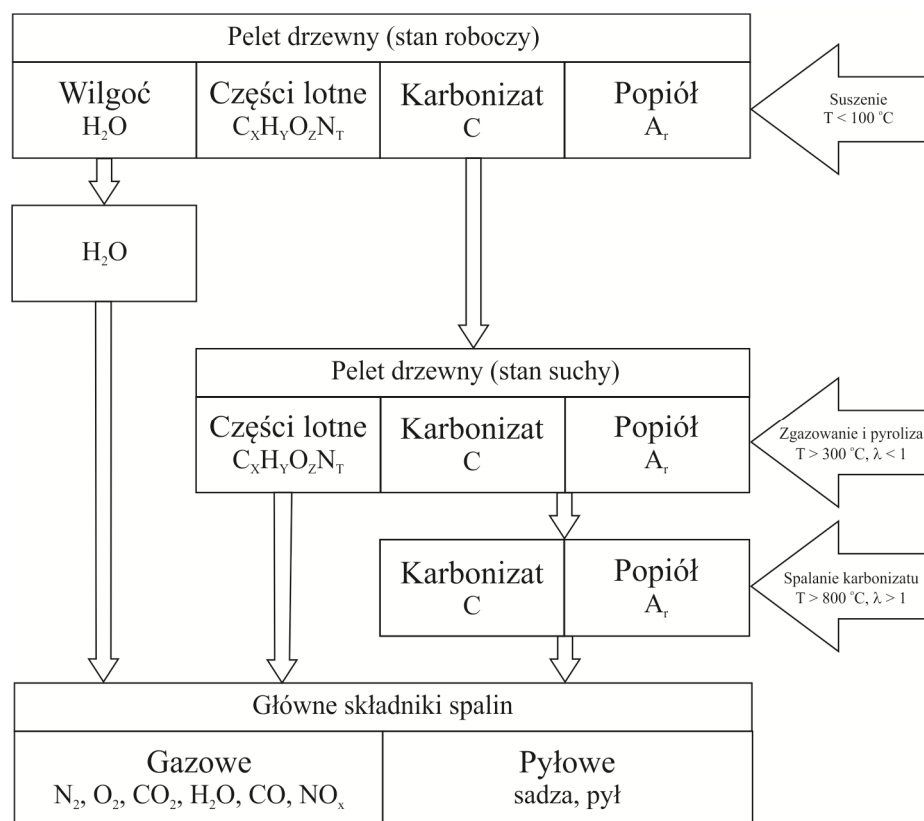
zawartości wilgoci całkowitej, tylko kilka z nich zbliżyło się do granicy, jaką jest 12 % udziału masowego. Zawartość popiołu nie powinna przekraczać 0.5 % masy całkowitej w odniesieniu do stanu roboczego i jest to charakterystyczna własność peletu wyprodukowanego z drewna. Warto zauważyć, że parametr ten nie jest spełniony przez wszystkie przedstawione w Tabeli 2.1 paliwa, a największe przekroczenie wartości dopuszczalnej zanotowano dla peletu wyprodukowanego z wierzb (FPM15). Pelet drzewny charakteryzuje również wysoki udział części lotnych, tzn. że znaczna część pierwiastków palnych zawarta jest w związkach, które uwalniane są w procesie zgazowania i spalane w płomieniu. Cytowane wyżej normy określają udział części lotnych w przedziale od 80 do 88 % w odniesieniu do masy suchej i zasadniczo ten parametr spełnia większość paliw zestawionych w Tabeli 2.1. Pelet drzewny powinien zawierać od 40 do 50 % pierwiastka węgla C biorąc pod uwagę masę w stanie roboczym. W podanym zakresie mieszczą się wszystkie paliwa ujęte w zestawieniu, a pelet spalany w badanym kotle nawet nieznacznie przekracza próg ujęty w normie. Udział pierwiastków wodoru H i siarki S oznaczonych w paliwach badanych w cytowanej literaturze spełnia wymagania norm europejskich, natomiast zawartość tzw. azotu paliwowego, będącego źródłem emisji tlenków azotu NO_x nie jest obecnie przez nie regulowana. Charakterystyczny dla tego rodzaju paliw jest wysoki udział masowy pierwiastka tlenu O w paliwie, co także bezpośrednio przekłada się na charakter spalania.

Najważniejszym, z punktu widzenia użytkownika końcowego parametrem jakościowym peletu, jest jego wartość opałowa. Zasadniczo określa się ją dla stanu roboczego, jednakże w literaturze spotyka się również odniesienia do stanu suchego. Jak można zauważyć, nie wszystkie przedstawione paliwa posiadają wymaganą dla potrzeb normatywnych badań wartość opałową, chociaż większość ma wynik mocno do niej zbliżony. Wyraźnie odbiega jedynie kaloryczność peletu wyprodukowanego z drewna wierzbowego.

2.3. Proces spalania peletu drzewnego

Poszczególne etapy procesu spalania i powstające w jego trakcie półprodukty oraz finalne składniki spalin zaprezentowano na Rys. 2.2. Pelet dostarczany w tzw. stanie roboczym do komory paleniskowej zawiera w swoim składzie palną substancję organiczną oraz balast w postaci związków mineralnych i wilgoci, które na skutek przemian termicznych, ulegają odseparowaniu w określonych etapach procesu spalania. Wilgoć zawarta w paliwie odparowuje, części lotne oraz karbonizat ulegają spalaniu w wyniku czego uwalniana jest energia, oraz powstają produkty uboczne takie jak dwutlenek węgla CO_2 oraz w mniejszych ilościach tlenek węgla CO , węglowodory C_xH_y i inne związki chemiczne. Z kolei część mineralna paliwa zostaje w palenisku w postaci popiołu lub (w mniejszej ilości) unoszona jest do atmosfery z gazami spalinowymi w postaci tzw. popiołów lotnych.

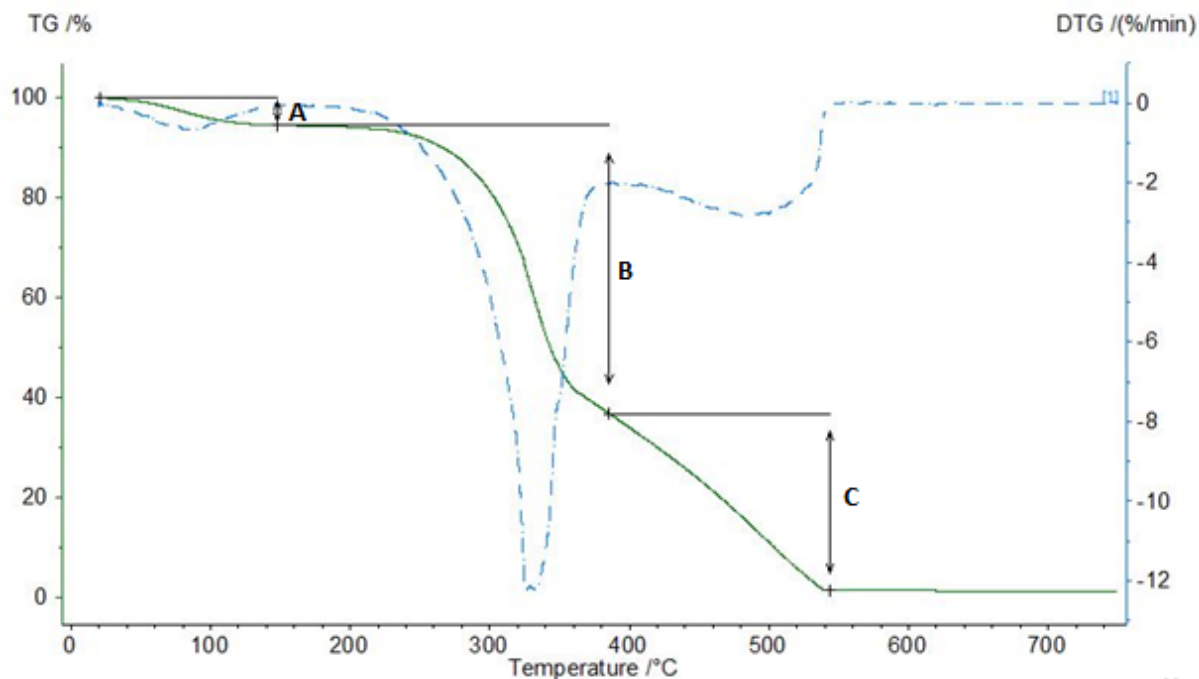
2. Spalanie biomasy w kotłach małej mocy



Rys. 2.2. Przemiany fizykochemiczne podczas spalania peletu.

Do wyznaczania poszczególnych stadiów procesu spalania stosuje się analizy termogravimetryczne *TGA*. Nieizotermiczna analiza spalania peletu *Olimp* wskazuje charakterystyczne etapy dla tego procesu, z wyraźnymi granicami poszczególnych obszarów:

- Suszenie. W wyniku nagrzewania biomasy następuje odparowanie wilgoci. Przyjmuje się, że etap ten ma miejsce w temperaturze do 105-110 °C,
- Odgazowanie i spalanie części lotnych. Początek odgazowania, charakteryzuje się postępującą dehydratacją i depolimeryzacją biomasy, zaś zapłon lżejszych części lotnych peletu następuje w temperaturze rozkładu termicznego hemicelulozy, tj. ok. 220 °C. Najintensywniejszy rozkład lignocelulozy obserwuje się w przedziale temperatur od 250 °C do 400 °C, zaś w wyższej temperaturze ma miejsce wyhamowanie dynamiki odgazowania, ze względu na przewagę rozkładu termicznego ligniny,
- Spalanie pozostałości koksowej. W ostatnim etapie zachodzi utlenianie pozostałości części koksowej, aż do całkowitego spalania biomasy, co w prezentowanym przypadku następuje w temperaturze ok. 650 °C.

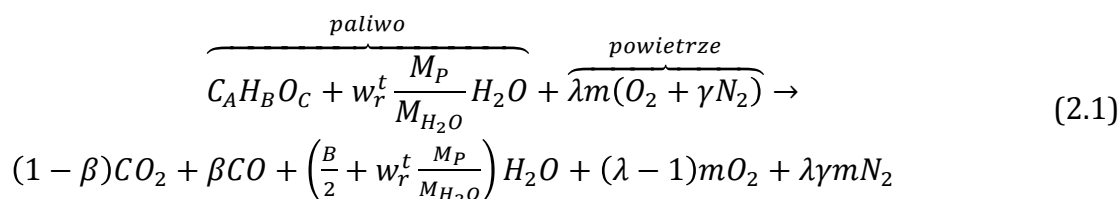


Rys. 2.3. Analiza termogravimetryczna peletu *Olimp*
(powietrze syntetyczne 5.0, przepływ 70 ml/min, szybkość grzania 10 °C/min).

Zwiększanie prędkości ogrzewania próbek biomasy podczas analiz termicznych prowadzi do przesunięć charakterystycznych punktów temperaturowych, jednak mechanizm procesu spalania pozostaje ten sam. Przedstawiona identyfikacja w/w faz nie może być bezpośrednio ekstrapolowana na obiekty w dużej skali, ale jest często wykorzystywana w budowie kotłów przemysłowych, jako element pozwalający na zrozumienie podstawowych procesów. W mniejszych jednostkach, jak i w badanym urządzeniu, poszczególne fazy wzajemnie się przenikają. Niemniej z punktu widzenia sterowania kotłem, najważniejszą informacją jest dominujący charakter procesu odgazowania i spalania części lotnych w procesie.

2.3.1. Stechiometria procesu spalania peletu

Proces utleniania paliwa pochodzenia drzewnego, scharakteryzowanego udziałami węgla, wodoru i tlenu (w niniejszej pracy $CH_{1.64}O_{0.53}$) z niewielką ilością wilgoci, można opisać na potrzeby sterowania uproszczonym globalnym równaniem



gdzie

$$m = A + \frac{B}{4} - \frac{C}{2},$$

$$\gamma = \frac{79}{21},$$

$$\beta = \frac{(CO)}{(CO)+(CO_2)},$$

A, B, C – udziały poszczególnych pierwiastków w odniesieniu do węgla,

w_r^t – zawartość wilgoci całkowitej, %,

M_P – masa molowa drewna, kg/kmol,

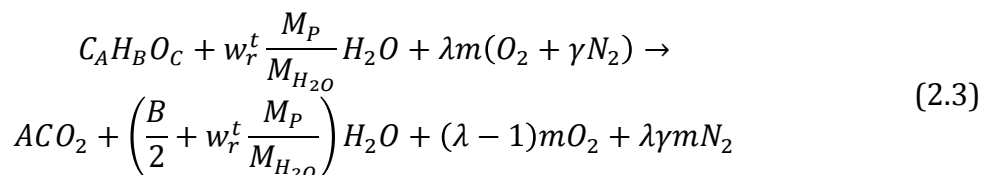
M_{H_2O} – masa molowa wody, kg/kmol,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza.

Powyższe równanie dotyczy przypadku spalania niezupełnego, przy jednoczesnym założeniu, że całkowity węgiel zawarty w karbonizacie zostaje spalony. Ponadto zakłada się pominięcie mechanizmów syntezy NO_x , o czym w Podrozdziale 2.4. Tym samym skład spalin wilgotnych określa się wzorem

$$(CO_2) + (CO) + (N_2) + (O_2) + (H_2O) = 1 \quad (2.2)$$

W praktyce do paleniska dostarcza się odpowiedni nadmiar powietrza (utleniacza), co prowadzi do spalania zupełnego i uproszczenia wzoru (2.1) do postaci



W technice kotłowej powszechne jest przeliczanie objętości na warunki umowne $T_u = 0^\circ C$ i $p_u = 1013.25$ Pa, w których molowa objętość właściwa powietrza wynosi $(M_v)_u = 22.414$ um³/kmol (umownych metrów sześciennych na kilomol).

Stechiometryczna objętość tlenu dla spalania zupełnego opisana jest wzorem

$$V_{O_2}^{min} = \frac{(M_v)_u}{M_{O_2}} (D c_r + E h_r - o_r) \quad (2.4)$$

gdzie

$(M_v)_u$ – molowa objętość właściwa powietrza, um³/kmol,

M_{O_2} – molowa objętość właściwa tlenu, um³/kmol,

$D = 2.667$ kg O_2 /kg C , oznacza minimalną ilość tlenu potrzebną do spalania 1 kg węgla pierwiastkowego,

$E = 8$ kg O_2 /kg H_2 , oznacza minimalną ilość tlenu potrzebną do spalania 1 kg wodoru,

c_r – masowy udział węgla w paliwie w stanie roboczym,

h_r – masowy udział wodoru w paliwie w stanie roboczym,

o_r – masowy udział tlenu w paliwie w stanie roboczym,

Uwzględniając, że powietrze podawane do spalania składa się z tlenu i azotu o udziałach objętościowych (molowych) wynoszących odpowiednio 21 % i 79 %, objętościowe zapotrzebowanie na powietrze do stechiometrycznego spalania zupełnego i całkowitego 1 kg peletu wylicza się w oparciu o formułę

$$V_{pow}^{min} = \frac{(M_v)_u}{M_{O_2} u_{O_2}^{pow}} (Dc_r + Eh_r - o_r) \quad (2.5)$$

gdzie $u_{O_2}^{pow}$ oznacza udział tlenu w powietrzu atmosferycznym.

Ponieważ pelet jest paliwem niejednorodnym pod względem granulacji, co ma znaczący wpływ na jego wymieszanie z powietrzem, niezbędne jest określenie odpowiedniej ilości powietrza w zależności od zapotrzebowania na paliwo (mocy kotły) oraz warunków eksploatacyjnych (temperatury czynnika grzewczego, powietrza podawanego do kotła, ciągu kominowego itd.). W warunkach eksploatacyjnych spalania paliw stałych zapotrzebowanie na powietrze jest wyższe niż obliczona powyżej minimalna ilość powietrza. Dlatego też, aby zapewnić lepsze wymieszanie utleniacza z paliwem, do komory spalania (paleniska) należy dostarczyć powietrze z odpowiednim nadmiarem

$$\lambda = \frac{V_{O_2}}{V_{O_2}^{min}} = \frac{V_{pow}}{V_{pow}^{min}} \quad (2.6)$$

Wstawiając równanie (2.6) do (2.5) otrzymuje się równanie ujmujące rzeczywistą, wymaganą ilość tlenu do spalania:

$$V_{O_2} = \lambda \left(\frac{(M_v)_u}{M_{O_2}} (Dc_r + Eh_r - o_r) \right) \quad (2.7)$$

Analogicznie ilość powietrza uwzględniającą współczynnik λ można wyznaczyć ze wzoru:

$$V_{pow} = \lambda \left(\frac{(M_v)_u}{M_{O_2} u_{O_2}^{pow}} (Dc_r + Eh_r - o_r) \right) \quad (2.8)$$

Skuteczna regulacja procesu spalania w kotle oparta na modelu, który zostanie przedstawiony w Rozdziale 4, wymaga ponadto obliczenia ilości spalin. Zakładając spalanie zupełne i całkowite, z poszczególnych pierwiastków tworzących paliwo oraz zawartej w nim wilgoci, powstają spaliny w ilościach

- $1.868c_r$ um³ na 1 kg spalonego paliwa,
- $11.21h_r$ um³ na 1 kg spalonego paliwa,
- $1.245w_r^t$ um³ na 1 kg spalonego paliwa.

Uwzględniając powyższe, a także azot i parę wodną doprowadzane w powietrzu atmosferycznym do komory spalania, objętość minimalna spalin wynosi

$$V_{sp}^{min} = 1.868c_r + 11.21h_r + 1.245(w_r^t + \delta V_{pow}^{min}) + 0.79V_{pow}^{min} \quad (2.9)$$

gdzie δ oznacza zawartość bezwzględnej wilgoci w powietrzu atmosferycznym.

Ostatecznie całkowitą objętość spalin uwzględniającą zarówno produkty spalania, jak i nadmiar powietrza podawany do procesu wyznacza się w oparciu o formułę:

$$V_{sp} = 1.868c_r + 11.21h_r + 1.245(w_r^t + \delta \lambda V_{pow}^{min}) + 0.79\lambda V_{pow}^{min} + 0.21(\lambda - 1)V_{pow}^{min} \quad (2.10)$$

2.4. Główne produkty procesu spalania

Optymalny proces spalania peletu oznacza obecność w produktach spalania wyłącznie dwutlenku węgla i pary wodnej. Jednakże podczas spalania biomasy w warunkach rzeczywistych powstają dodatkowe zanieczyszczenia, do których należą głównie: tlenek węgla, tlenki azotu, niedopalone węglowodory, sadza i popiół lotny. W śladowych ilościach w spalinach znajdują się z kolei tlenki siarki (ze względu na znikomy udział siarki w pelecie drzewnym) oraz inne zanieczyszczenia jak: pozostałe lotne związki organiczne (*VOC*), wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (*WWA*), czy też metale ciężkie.

2.4.1. *CO* i *OGC*

Emisja tlenku węgla *CO* oraz niespalonych substancji organicznych w postaci gazowej wykazanych jako węgiel organiczny związany *OGC* jest pochodną niepełnego spalania wynikającego z:

- niewystarczającego wymieszania powietrza z paliwem, na skutek niewłaściwej dystrybucji powietrza w poszczególne strefy spalania. Powoduje to powstawanie obszarów ubogich w paliwo, w których proces spalania nie może być utrzymywany, lub zbyt bogatych lokalnie w paliwo, gdzie brakuje utleniacza,
- zbyt niskiej temperatury spalania, co jest charakterystyczne przy spalaniu ze zbyt wysokim współczynnikiem nadmiaru powietrza,
- krótkiego czasu przebywania gazów palnych w komorze paleniskowej, spowodowanego dużą prędkością powietrza dostarczanego do spalania [JLG04],
- wystudzenia spalin w warstwie przyściennej kotła, spowodowanego niewłaściwie dobranymi wymiarami geometrycznymi komory paleniskowej, lub złymi warunkami pracy kotła.

2.4.2. NO_x

Spalanie biomasy jest również znaczącym źródłem emisji tlenków azotu do atmosfery. Związki te powstają zasadniczo jako skutek trzech mechanizmów:

- utleniania azotu zawartego w paliwie, powstają wtedy tzw. paliwowe NO_x [SLE11],
- utleniania azotu zawartego w powietrzu dostarczanym do komory spalania, jest to tzw. termiczne generowanie NO_x (mechanizm Zeldowicza) [DSR14, Hsu11],
- szybkiej reakcji rodników węglowodorów z azotem zawartym w powietrzu dostarczanym do komory spalania, której produktem są tzw. szybkie lub inaczej płomieniowe NO_x (mechanizm Fenimore'a) [PTT00].

Mechanizm powstawania termicznych tlenków azotu wymaga wysokiej energii aktywacji, co oznacza że staje się on przewodni w wyższych temperaturach (w praktyce powyżej 1300 °C) [DSR14], stąd jest pomijany podczas spalania biomasy w kotłach małej mocy. Dominujący w opisywanym przypadku jest udział paliwowych tlenków azotu i do pewnej granicy tlenków szybkich. Mechanizm paliwowy powstawania tlenków azotu jest związany z uwalnianiem podczas spalania azotu w postaci związków cyjanowodorowych HCN i amonowych NH_3 , które z kolei w obecności wolnego tlenu syntezują z rodnikami O , H i OH tworząc NO . Równocześnie wspomniane rodniki węglowodorowe i aminowe są najefektywniejszymi prekursorami redukcji NO , ale w podstechiometrycznych warunkach prowadzenia procesu spalania. Analizy [DSR14] pokazują, że istotną rolę odgrywa także heterogeniczny mechanizm redukcji, czyli absorpcji NO na powierzchni cząstek stałych i karbonizatu [MMH06].

Dlatego w kotłach małych mocy podkreśla się szczególnie wpływ konstrukcji komory paleniskowej (jej rozmiarów, usytuowania i ukierunkowania dysz nadmuchu powietrza, czy też rozmieszczenia stref doprowadzenia powietrza pierwotnego i wtórnego) oraz warunków prowadzenia procesu spalania (głównie współczynnika nadmiaru powietrza), na temperaturę, czas pozostawania cząstek oraz całkowite i lokalne warunki napowietrzania komory paleniskowej. Spośród wymienionych parametrów najlepsze wyniki w eliminacji NO_x ma odpowiednia dystrybucja powietrza, a przede wszystkim jego stopniowanie [DSR14]. Podkreśla się także rolę parametrów paliwa, jak wilgotności, wielkości ziaren paliwa, zawartości części lotnych czy też charakterystyk popiołu na syntezę NO_x [OBB06].

2.4.3. Pyły

Znaczącym problemem w eksploatacji kotłów małych mocy opalanych biomasą jest emisja pyłu. Problem ten występuje ze względu na brak urządzeń odpylających i jest szczególnie niebezpieczny dla środowiska, ze względu na rozmiary unoszonych pyłów, najczęściej poniżej 2.5 μm [FeC11] lub 1.0 μm [Baf08, BNW05].

Rozróżnia się kilka źródeł cząstek stałych emitowanych z procesów spalania biomasy, są to zarówno związki organiczne, jak i substancja mineralna obecna w paliwie, która po spalaniu tworzy popioły lotne.

Emisja cząstek stałych w postaci tzw. sadzy (składających się w 94÷99 % z węgla z niewielkim udziałem wodoru), formowanych z węglowodorów w rejonie płomienia, najczęściej występuje w pierwszej fazie procesu spalania, czyli rozpalaniu. Technologicznie, sadza płomieniowa powstaje w skutek niezupełnego spalania, czyli w strefach bogatych w paliwo lub w przypadkach niewystarczającego wymieszania powietrza z gazami palnymi. Strefy takie występują powszechnie w kotłach małych mocy, mimo utrzymywania w nich całkowitego współczynnika nadmiaru powietrza na poziomie wyraźnie powyżej jedności ($\lambda > 1$) [Tis08]. Negatywnym aspektem tworzenia się sadzy płomieniowej jest jej gromadzenie się na powierzchniach wymiennika, co pogarsza wymianę ciepła i w efekcie obniża sprawność kotła [Fie04].

Pozostałe cząstki stałe wywodzące się z substancji organicznej (tzw. węglowodorów ciężkich) powstają także na skutek niezupełnego spalania i w większości kondensują na cząstkach popiołów lotnych [Tis08] lub unoszone są bezpośrednio ze spalinami w postaci aerozoli. Przyczyną powstawania smoły jest niska temperatura oraz niewystarczająca ilość powietrza podawanego do spalania.

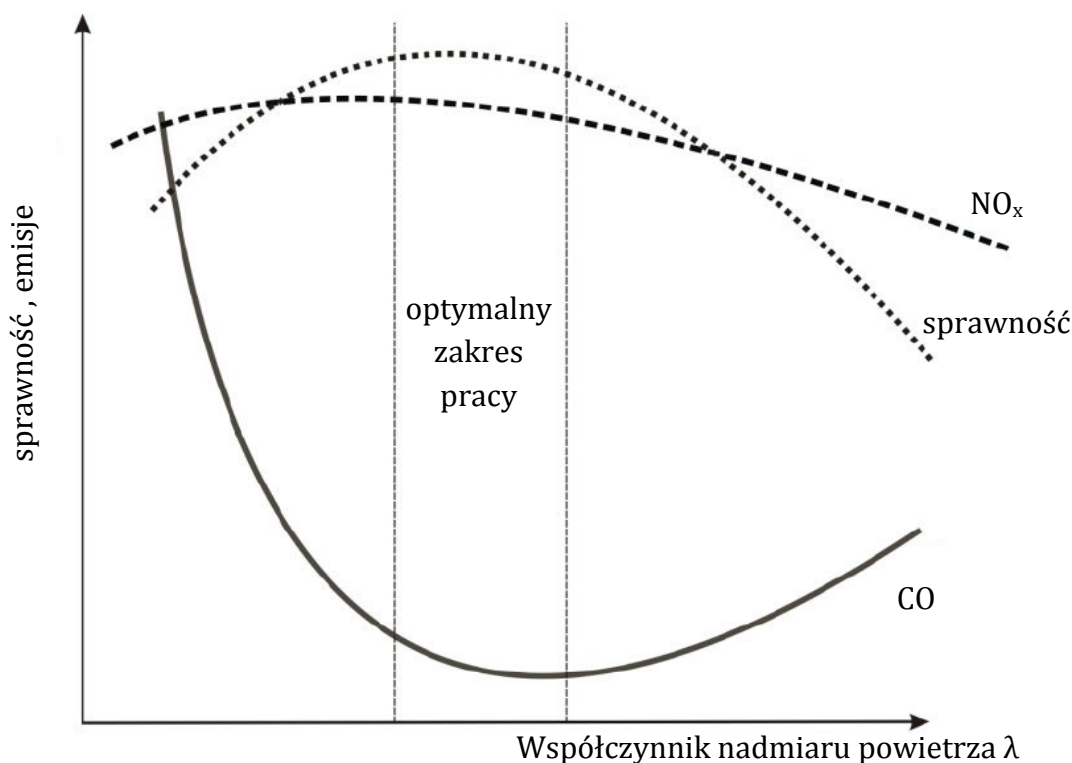
Niewielką, ale istotną część cząstek stałych stanowi także koksik węglowy, czyli czysty karbonizat, który powstał na etapie odgazowania paliwa i nie uległ spalaniu, ale jest unoszony ze spalinami. Z kolei popioły lotne powstają głównie na skutek odparowania nieorganicznych części mineralnych zawartych w paliwie. Składniki te podczas pirolizy łatwo ulegają oderwaniu od części organicznej, a ich powstawaniu sprzyja wysoka temperatura spalania [DSP02]. Głównymi komponentami drobnych popiołów lotnych są potas oraz cynk. Powstawanie drobnych popiołów lotnych jest związane także z warunkami spalania (wartość współczynnika λ), składnikami paliwa i zawartością wilgoci [JLG04, WiG04]. Badania przeprowadzone przez [Sip10] wykazały bezpośrednią korelację między zawartością części mineralnych w paliwie a emisją cząstek $PM < 1 \mu m$, dla kotłów z górnym podawaniem peletu.

Badania przeprowadzone przez autora pracy [Tis08] wskazują, że warunki eksploatacyjne wpływają znacząco na jakość oraz ilość emitowanych cząstek stałych. Z kolei w pracy [WiG04] stwierdzono, że na powstawanie cząstek stałych znacznie większy wpływ ma typ paliwa niż warunki prowadzenia urządzenia.

2.5. Wpływ współczynnika lambda na emisję zanieczyszczeń

Stężenie tlenu węgla i tlenków azotu w spalinach oraz sprawność procesu spalania jest zależna od ilości powietrza dostarczanego do komory paleniskowej. Dla spalania peletu drzewnego optymalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ zawiera się w przedziale od 1.6 do 1.9 [PiM11], w zależności od budowy paleniska, aktualnej mocy kotła i parametrów paliwa. Wartości graniczne emisji poszczególnych związków podawane w normach i przepisach prawnych są przeliczane na referencyjne

stężenie tlenu w spalinach. Najczęściej przyjmuje się 10-cio procentową wartość tlenu odniesienia, co odpowiada współczynnikowi $\lambda = 1.9$. Wykres zależności wpływu współczynnika λ na wielkość emisji oraz sprawność przedstawiono na Rys. 2.3.



Rys. 2.3. Zależność sprawności oraz emisji zanieczyszczeń od współczynnika nadmiaru powietrza dla kotłów na biopaliwa stałe [HrS11].

Jak przedstawiono na Rys. 2.3, wartość minimalna emisji tlenku węgla przypada na pewien określony przedział wartości współczynnika λ . Wartość współczynnika nadmiaru powietrza może być wyliczana na podstawie zmierzonego stężenia tlenu resztkowego w spalinach. Jeżeli sterowanie odbywa się na podstawie wskazań emisji CO, to algorytm powinien tak dobrać współczynnik nadmiaru powietrza, aby emisja tlenku węgla była najniższa, co zapewnia jednocześnie najwyższą sprawność procesu spalania. Zadanie jest dużo bardziej złożone w przypadku regulacji stężenia NO_x w spalinach, gdyż na optymalny z punktu widzenia sprawności spalania oraz stężenia tlenku węgla przedział λ , przypada bliska wartości maksymalnej emisja tlenków azotu. Stąd też konieczne jest znalezienie takiego współczynnika nadmiaru powietrza, aby poziom CO utrzymywał się na zadowalającym poziomie przy możliwie niskiej emisji NO_x [PiM12, HrS11]. Efektywne sterowanie poziomem tlenków azotu można uzyskać poprzez odpowiedni podział powietrza dostarczanego do komory spalania na tzw. powietrze pierwotne (doprowadzane w obszar złoża) i powietrze wtórne (dodawane w strefę płomienia). Jednakże nie wszystkie kotły posiadają możliwość zmiany proporcji powietrza pierwotnego do wtórnego, często (jak w przypadku badanego urządzenia) podział ten jest określony przed producenta poprzez liczbę i umiejscowienie dysz

nadmuchowych w palniku. Ponadto, pomiar koncentracji NO_x w spalinach nie jest możliwy bez zastosowania drogich, nie akceptowalnych ekonomicznie czujników, dlatego algorytm sterowania musi bazować na predefiniowanej krzywej (Rys. 2.3) lub wyznaczać stężenie tlenków azotu na podstawie parametrów paliwa, temperatury w komorze spalania i współczynnika λ .

2.6. Graniczne stężenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłu w odniesieniu do Norm Europejskich

Graniczne dopuszczalne stężenia szkodliwych dla środowiska związków w gazach spalinowych dla kotłów o mocy nie przekraczającej 500 kW na paliwa stałe zawarte są w normie PN-EN 303-5:2012 [PNE12]. Ponadto, wytyczne dla instalacji i kotłów opalanych peletem opisuje norma PN-EN 14785:2009 [PNE09], natomiast norma PN-EN 12809:2002 [PNE02] dotyczy wymagań stawianym kotłom na paliwa stałe o mocy cieplnej do 50 kW. Ponieważ norma [PNE02] określa jedynie graniczne wartości emisji tlenku węgla (CO) bez podziału na rodzaj paliwa (te same wartości graniczne dla węgla, brykietu i innych biopaliw, w tym peletu) i sposób jego załadunku, to wartości w niej podane nie są adekwatne do obecnej techniki spalania w niskoemisyjnych kotłach małej mocy z automatycznym podawaniem paliwa. Wartości graniczne stężenia CO w spalinach zostały przedstawione w Tabeli 2.2 w celu ukazania ewaluacji ograniczeń emisji tlenku węgla, która ma miejsce w normach [PNE09] i [PNE12].

W Polsce wciąż jeszcze nie zostały wprowadzone prawne regulacje emisji z instalacji opalanych paliwami stałymi o mocy poniżej 1 MW. Stąd w kraju nadal sprzedawane są urządzenia „pozaklasowe”, tzn. takie, które nie spełniają wytycznych normy [PNE12] dotyczących emisji nawet dla najniższej klasy 3. Aby poprawić czystość powietrza w Polsce, wszystkie urządzenia dopuszczone do sprzedaży w naszym kraju powinny być przebadane pod kątem zgodności emisji pyłów i zanieczyszczeń gazowych z normą PN-EN 303-5:2012. Jednak polskie prawo, w przeciwieństwie do ustawodawstwa krajów zachodnich, milczy o potrzebie wycofania ze sprzedaży urządzeń małej mocy, niespełniających wymagań czystości spalin zawartych w [PNE12]. Produkowane w Polsce kotły opalane peletem, w większości przypadków spełniają wymogi normy PN-EN 303-5:2012 dotyczące emisji dla klasy 4, a niektóre urządzenia nawet dla najwyższej klasy 5. Posiadanie certyfikatu potwierdzającego zgodność czystości spalin z w/w normą, pozwala producentowi wyróżnić kocioł na rynku spośród innych urządzeń gorszej jakości. Pomaga to również budować świadomość ekologiczną użytkowników kotłów małej mocy i daje poczucie dbałości o czystość powietrza. Należy podkreślić, że aspekty ekologiczne są ściśle związane z ekonomią eksploatacji kotła, gdyż mniej emitowanego tlenku węgla świadczy o spalaniu paliwa zbliżonym do spalania zupełnego, a więc większej sprawności kotła. Tylko produkty posiadające certyfikat potwierdzający zgodność z normą [PNE12] w zakresie emisji CO , OGC i pyłów mogą być

2. Spalanie biomasy w kotłach małej mocy

eksportowane do krajów Europy Zachodniej, co jest strategicznym celem wielu firm specjalizujących się w wytwarzaniu kotłów opalanych biomasą.

Należy jednak mieć na uwadze, w niektórych krajach obowiązują wewnętrzne akty prawne zakazujące wprowadzaniu na rynek kotłów nie spełniających krajowych wymogów emisyjnych, dużo bardziej rygorystycznych niż te określone w normie [PNE12], zwłaszcza w kwestii dopuszczalnych poziomów emisji pyłów, *CO* i *OGC*. Zapisy te są odnotowane w załączniku C normy PN-EN 303-5:2012 jako odchylenia typu A, spowodowane przepisami, których zmiana w danym czasie jest poza kompetencjami członka krajowego *CEN/CENELEC*.

Tabela 2.2. Graniczne wartości emisji zanieczyszczeń dla kotłów o mocy do 45 kW zasilanych peletem w sposób automatyczny (w przeliczeniu na $O_2=10\%$).

Dokument regulujący	Odchylenia od normy (kraj obowiązujący)	Klasa kotła	Pyły [mg/m ³]	<i>CO</i> [mg/m ³]	<i>NO_x</i> [mg/m ³]	<i>OGC</i> [mg/m ³]
Norma PN-EN 12809:2002	-	1	-	5156	-	-
		2	-	13750	-	-
		3	-	17188	-	-
Norma PN-EN 14785	-	-	-	687.5	-	-
Norma PN-EN 303-5:2012	-	3 ¹⁾	150	3000	-	100
		4 ²⁾	60	1000	-	30
		5 ³⁾	40	500	-	20
	Artykuł 15a B-VG ⁴⁾ (Austria)	-	45.4	573	230	45.4
	EPA Statutory Order 1432 ¹⁾ (Dania)	≥3	150	3000	-	100
	1.BImSchV §4 (Niemcy)	-	27.5	550	-	-
	Zał. 4 Luftreinhalte-Verordnung (Szwajcaria)	-	55	412.5	-	-
	UK Clean Air Act 1993 (Wlk. Brytania)	-	66	275	440	55
	Norme in materia ambientale 14.04.2006 ⁵⁾ (Włochy)	-	220	-	-	-
Certyfikat BAFA ⁶⁾	(Niemcy)	-	27.5	275	-	-
Certyfikat Blue Angel ⁶⁾	(Niemcy)	-	27.5	110	206	-

1) minimalna sprawność $(67+6 \log P_n) \%$

2) minimalna sprawność $(80+2 \log P_n) \%$

3) minimalna sprawność $(87+\log P_n) \%$

4) minimalna sprawność $(72.3+7.7 \log P_n) \%$

5) dla kotłów o mocy od 35 kW do 150 kW, dla pierwszej godziny pracy w głównym cyklu pracy

6) minimalna sprawność 89 %.

Warto podkreślić, że w Niemczech, kotły grzewcze opalane paliwami stałymi mogą być instalowane i uruchamiane tylko wówczas, gdy spełniają wymagania 1. BImSchV [Bim10]. Ponadto, instytucje rządowe w krajach takich jak Austria czy Niemcy, wprowadziły programy dofinansowania do zakupu ekologicznych urządzeń grzewczych (kotłów grzewczych, pieców, kominków) dla indywidualnych klientów. Aby więc zachęcić obywateli do instalacji urządzeń o najwyższej klasie czystości spalin, powstały organizacje skupiające wytwórców, których produkty spełniają najbardziej restrykcyjne wymogi czystości spalin, określone w certyfikatach i etykietach ekologicznych. Zakup kotła może być dofinansowany w Niemczech, jeżeli dane urządzenie znajduje się na tzw. liście BAFA [BAF16]. Nie jest to zadanie proste, gdyż jak można zauważyć w Tabeli 2.2, emisja pyłów dopuszczalna przez BAFA, jest dwukrotnie mniejsza niż wartość graniczna określona w normie [PNE12] i wynosi 20 mg/m^3 , natomiast maksymalne stężenie tlenu węgla nie może przekraczać 200 mg/m^3 w odniesieniu do 10 % zawartości tlenu w spalinach. Dodatkowym wymogiem jest również sprawność kotła, która nie może być mniejsza niż 89%. Warto zaznaczyć, że kwota dofinansowania przy zakupie nowego, opalanego peletem, wspieranego przez BAFA kotła wynosi obecnie 80 €/kW, ale nie mniej niż 3000 € [BAF16]. Obecnie tylko niektóre regulacje określają maksymalną emisję tlenków azotu (NO_x) i gazowych organicznych zanieczyszczeń (OGC). Jednak sądząc po aktualnych trendach w ochronie czystości powietrza atmosferycznego, należy oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości obostrzenia dotyczące emisji w/w związków będą obligatoryjnie obowiązywać dla kotłów małej mocy.

Badania kotłów na zgodność poziomu emisji i sprawności z normą PN-EN 303-5:2012 mogą wykonywać wyłącznie jednostki badawcze posiadające akredytację w tym zakresie, jak Laboratorium Badań Kotłów i Urządzeń Grzewczych w Łodzi czy Strojírenský zkušební ústav, s.p. w Brnie w Republice Czeskiej. Potwierdzeniem uzyskanych przez urządzenie parametrów jest certyfikat wystawiony przez akredytowaną jednostkę badawczą.

Zestawienie dopuszczalnych emisji określonych substancji do atmosfery zawarte w Tabeli 2.2 ukazuje, że wartości zawarte w normach nie są zadowalające dla rządów niektórych krajów europejskich. Niemniej, produkowane w Polsce urządzenia często nie spełniają wymogów dla klasy 5 wg normy PN-EN 303-5:2012, co praktycznie uniemożliwia ich eksport do takich państw jak Niemcy, Austria, Szwajcaria. Producenci kotłów stawiają sobie za cel, aby ich kotły znajdowały się na listach urządzeń dofinansowanych przez instytucje państwowe, jednak aby było to możliwe, spełnione muszą być surowe warunki dotyczące emisji.

Mając na uwadze powyższe, zasadne jest optymalizowanie procesu spalania poprzez odpowiednie sterowanie w celu redukcji emisji szkodliwych związków i zwiększenia efektywności kotła. Stąd silne jest, zdaniem autora, umocowanie niniejszej pracy w obszarze aktualnych zagadnień związanych z ekologicznym spalaniem biomasy oraz innych paliw stałych. Jak to zostało przedstawione, zawartość szkodliwych związków w spalinach jest funkcją wielu czynników, począwszy od jakości paliwa, poprzez konstrukcję kotła, na układzie sterowania kończąc. Niniejsza praca skupia się wokół problemu modelowania dla celów sterowania procesem spalania, a ściślej rzecz

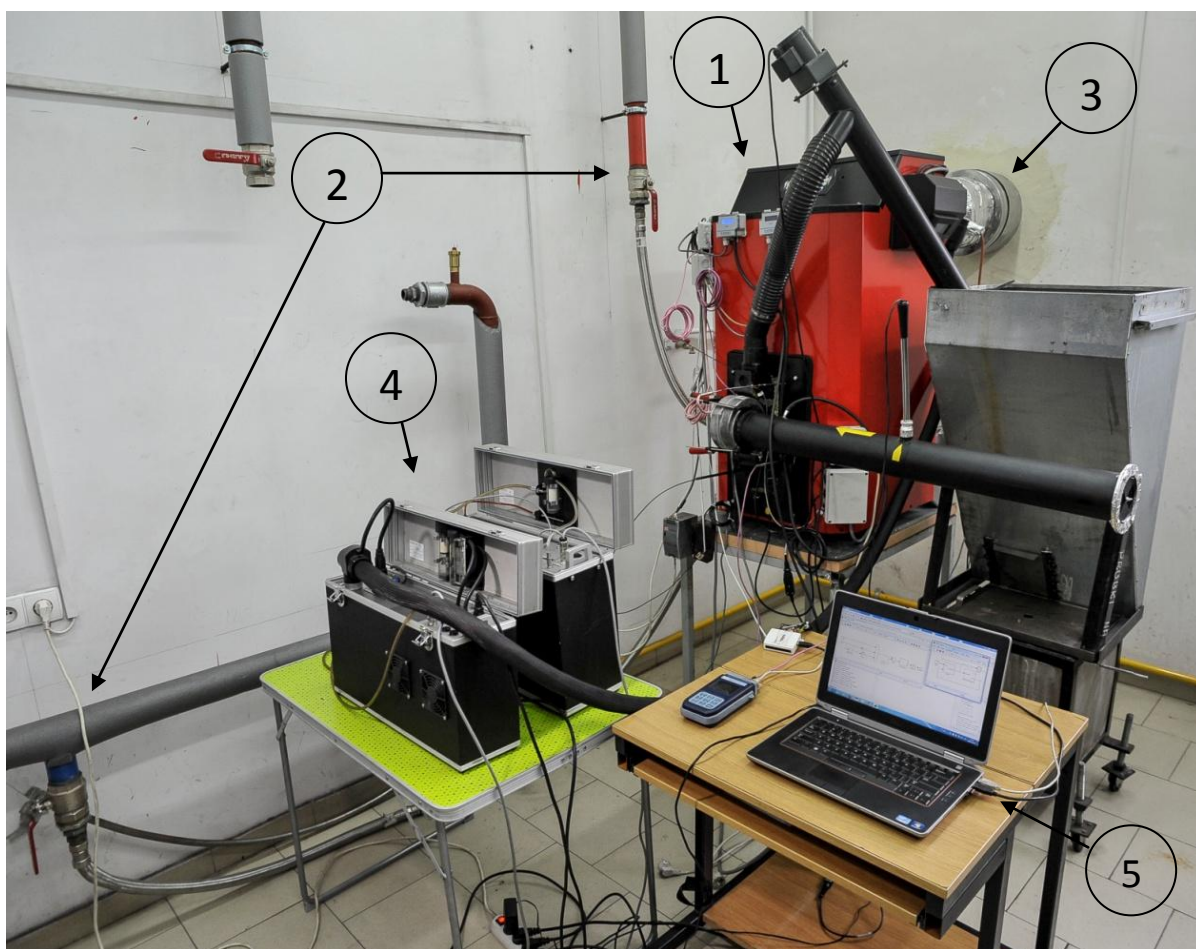
ujmując, do zapewniania optymalnego dozowania powietrza do komory paleniskowej w odniesieniu do aktualnego zapotrzebowania na paliwo.

2.7. Podsumowanie

Niniejszy rozdział zawiera zwarty i usystematyzowany opis techniki spalania peletu drzewnego, począwszy od przedstawienia konstrukcji kotłów i palników, poprzez analizę parametrów fizykochemicznych paliwa, na opisie procesu spalania i mechanizmów powstawania zanieczyszczeń kończąc. Autor umiejscowił badany kocioł wśród rozwiązań konstrukcyjnych dostępnych na rynku, wyznaczył właściwości i skład stosowanego paliwa i porównał je z danymi przedstawionymi w literaturze. Następnie opisano reakcję spalania paliwa drzewnego, procesy powstawania produktów spalania oraz wyznaczono zapotrzebowanie na powietrze w eksploatacyjnych warunkach pracy kotła. Przedstawione zostały również regulacje prawne, jakim poddawane są kotły małej mocy w Europie oraz graniczne wartości emisji szkodliwych związków. Podkreśla to celowość podjęcia przez autora problemu sterowania pracą kotłów opalanych peletem pochodzenia drzewnego. Mając świadomość tego, jak bardzo złożonym procesem fizykochemicznym jest spalanie paliw stałych, dokonano pewnych uproszczeń, jednakże przyjęty opis jest wystarczający dla przedstawienia zagadnienia i podjęcia próby identyfikacji obiektu i syntezy regulatora.

3. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze znajduje się w Laboratorium Techniki Spalania należącym do Katedry Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej przy ul. Prószkowskiej 72. Instalacja wodna oraz kominowa została zaprojektowana i wykonana w sposób umożliwiający badanie urządzeń grzewczych opalanych paliwami stałymi, ciekłymi oraz gazowymi. Uniwersalność instalacji pomiarowej sprawia, że podłączenie do niej badanego obiektu jest stosunkowo proste i nie wymaga dużych nakładów czasowych. W laboratorium dostępne są dwa pomieszczenia, w których mogą być jednocześnie zainstalowane kotły lub inne urządzenia służące do badań procesów spalania.



Rys. 3.1. Główna część stanowiska laboratoryjnego do badania kotła małej mocy opalanego peletem drzewnym.

Powyższy rysunek przedstawia badany kocioł (1) wyposażony w urządzenia pomiarowe i wykonawcze, podłączony do instalacji grzewczej (2) i kominowej (3). Analizator gazowy (4) dostarcza informacji o składzie spalin i warunkach fizycznych w czopuchu, a komputer przenośny (5) z oprogramowaniem rejestruje i przetwarza dane pomiarowe oraz generuje sygnał sterujący. Poszczególne elementy stanowiska badawczego, jak i samego kotła zostały opisane w dalszej części niniejszego rozdziału.

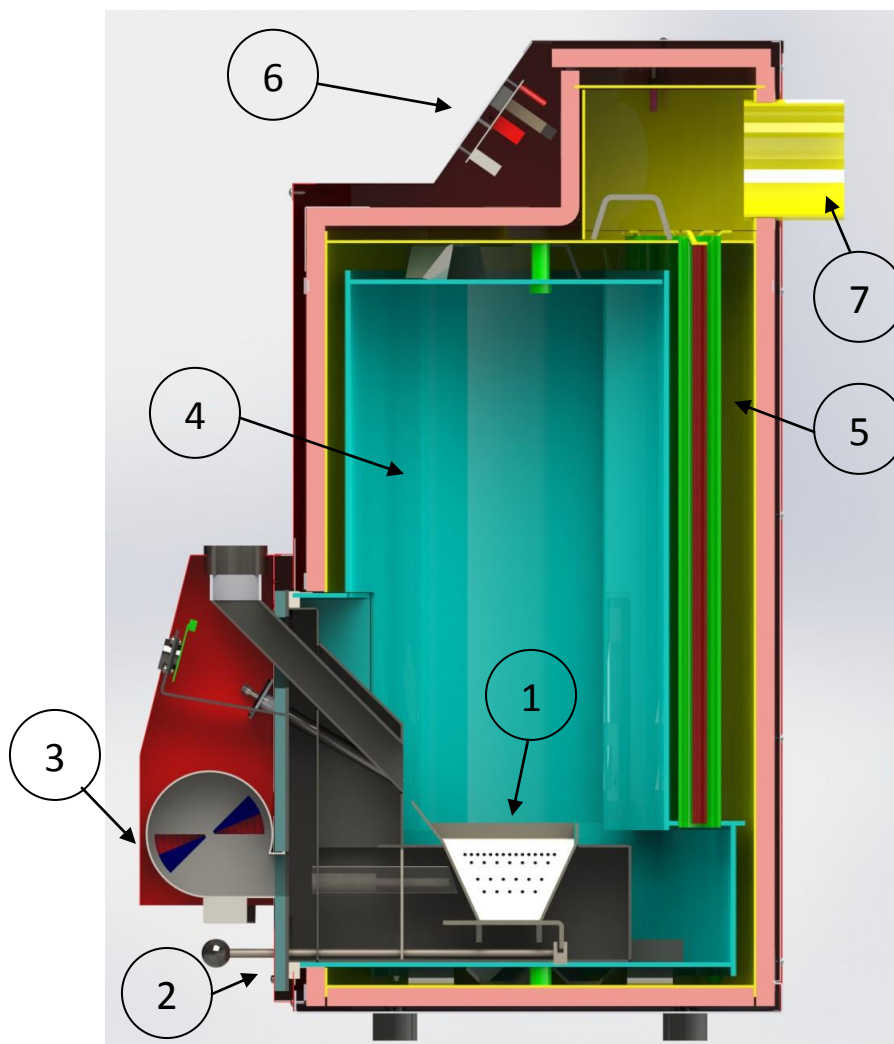
3.1. Kocioł wodny małej mocy na pelet drzewny jako obiekt badań

Obiektem badań jest niskotemperaturowy kocioł wodny *Orligno* 400 o mocy znamionowej 16 kW wyprodukowany przez firmę *Eko-Vimar Orłański* z Otmuchowa. Kocioł ten jest dostępny zarówno na rynku krajowym jak i europejskim, m.in. w Niemczech, Austrii, Danii. Został on zaprojektowany do spalania peletu drzewnego o średnicy 6-8 mm i wyposażony w palnik zasypowy ze stałym złożem znajdujący się w dolnej części komory spalania. Zarówno korpus w kształcie walca jak i wymiennik ciepła zostały wykonane w sposób umożliwiający wykorzystanie specyficznych parametrów pracy palnika peletowego. Wymiennik rurowy, pionowo osadzony w tylnej części kompaktowego korpusu wyposażony jest w turbolizatory, zwane też zawirowywaczami spalin. Urządzenia te mają za zadanie zwiększenie efektywności wymiany ciepła poprzez wprowadzanie swoistych zaburzeń w przepływie strugi, a równocześnie przyczyniają się do wytrącenia pyłów ze spalin. Paliwo pobierane jest z zasobnika za pośrednictwem przenośnika ślimakowego, po czym grawitacyjnie spada do palnika. Palenisko w formie koszyka posiada ruchomy ruszt przesuwany ręcznie, umożliwiającą oczyszczanie go z popiołu podczas pracy.

Tabela 3.1. Podstawowe parametry eksploatacyjne badanego kotła.

KOCIOŁ WODNY ORLIGNO 400		
Moc znamionowa	kW	16
Czopuch kominowy	Ø mm	133
Paliwo (pelet drzewny)	Ø mm	6-8
Zakres mocy	kW	3.9 – 16
Sprawność	%	89.4
Klasa kotła (wg PN- EN 303-5:2012)	-	3
Maksymalna temp. zasilania	°C	80
Minimalna temp. powrotu	°C	60
Maksymalne ciśnienie robocze	bar	2.5
Zalecany ciąg kominowy	Pa	10
Pojemność zasobnika	l	450
Stałość	godz.	90
Zużycie paliwa przy mocy nominalnej	kg/godz.	3.5
Zużycie paliwa przy mocy minimalnej	kg/godz.	0.9
Temp. spalin przy mocy nominalnej	°C	145
Temp. spalin przy mocy minimalnej	°C	80

Należy zaznaczyć, że autor nie dokonał zmian w konstrukcji kotła i zachował jego fabryczne urządzenia zewnętrzne (podajnik paliwa, wentylator). Jediną ingerencją było wykonanie otworów umożliwiających pomiar wybranych wielkości fizycznych w komorze spalania. Czujniki zostały zainstalowane w sposób niezakłócający procesu spalania.

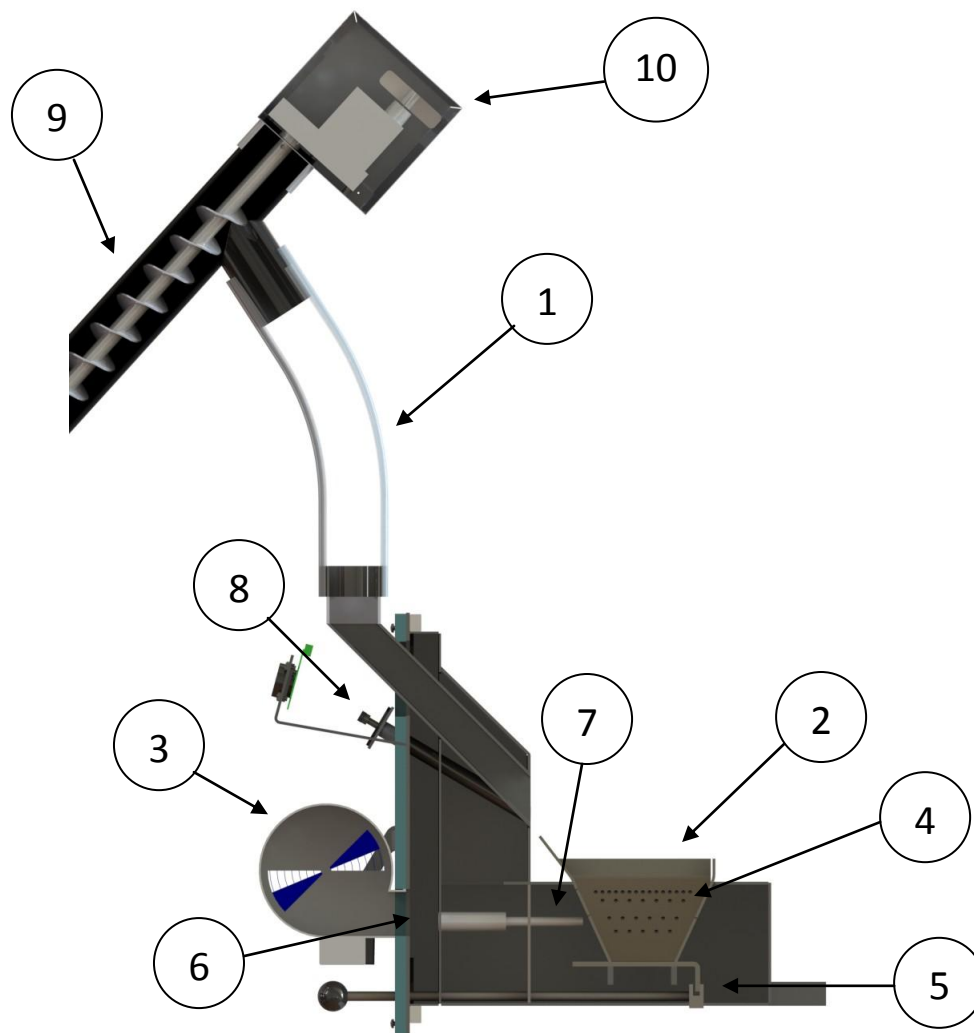


Rys. 3.2. Przekrój poprzeczny kotła *Orligo 400*.

Budowę wewnętrzną kotła, będącego obiektem badań przedstawiono na Rys. 3.2. Zaznaczono na nim podstawowe części składowe: palnik zrzutkowy ze złożem stałym (1) wyposażony w ręczny mechanizm usuwania popiołu (2), wentylator nadmuchowy (3), cylindryczną komorę spalania (4), rurowo-płaszczowy wymiennik ciepła wyposażony w turbulizatory (5), fabryczny sterownik (6) oraz czopuch kominowy (7). Rysunek wykonany został z uwzględnieniem rzeczywistych wymiarów i odzwierciedla faktyczne rozmieszczenie części składowych kotła.

3.1.1. Palnik

Kocioł wyposażony jest w palnik zasypowy, zwany również zrzutkowym, który jest rozwiązaniem zaprojektowanym do spalania biomasy w postaci peletu. Należy zaznaczyć, że niektóre konstrukcje z tej grupy mają możliwość zasilania zrębkami o określonej ziarnistości. Kompaktowa konstrukcja palnika umożliwia jego łatwy demontaż z komory kotła w celach konserwacyjnych.



Rys. 3.3. Palnik na pelety drzewny wraz z układem doprowadzenia paliwa.

Przekrój poprzeczny palnika peletowego przedstawiono na Rys. 3.3. Paliwo wsypywane jest od góry przez rurę (1) na złożę stacjonarne znajdujące się w tzw. koszyku (2). W obszar ten wentylator (3) dostarcza powietrze pierwotne i wtórne od spodu oraz z boków poprzez odpowiednio rozmieszczone dysze nawiewowe (4). Palenisko wykonane w kształcie odwróconego, ściętego ostrosłupa, wykonane ze stali kwasoodpornej, posiada ruszt, który może być ręcznie przesuwany aby ułatwić transport popiołu do dolnej komory popielnika (5). Mankamentem takiego rozwiązania jest stosunkowo trudny sposób opróżniania popiołu, gdyż do tego celu należy zdemontować koszyk. W kanale dolotowym powietrza (6) umieszczona jest elektryczna grzałka ceramiczna (7), służąca do automatycznego zapłonu peletu w trybie rozpalania. Ogrzewane przez nią powietrze, doprowadzone do wypełnionego paliwem paleniska inicjuje proces spalania w złożu. Czujnik optoelektryczny (8) zainstalowany w palniku ma za zadanie wykrycie pojawienia się płomienia i zawiadomienie sterownika o potrzebie przełączenia trybu z rozpalania na pracę.

3.1.2. Układ doprowadzenia paliwa

Zasobnik pozwala na załadunek ok. 300 kg paliwa, co wg producenta pozwala na pracę kotła przy znamionowej mocy przez czas 90 godzin. Ponieważ biomasa w postaci peletu jest dostępna w workach o wadze 15 kg, to zasyp zasobnika jest wygodny. Ilustrację układu podawania paliwa przedstawiono na Rys. 3.3. Paliwo pobierane przez przenośnik ślimakowy (9), którego otwór zasypowy usytuowany jest w dolnej części zasobnika peletu. Otwór wysypowy połączony jest z giętka rurą (1) odpowiedzialną za transport grawitacyjny peletu do palnika. Idea ta zapewnia przerwę w strumieniu podawanego paliwa, co jest istotne w kwestii zapewnienia zabezpieczenia przed zapłonem paliwa w zasobniku. Dlatego też, tego rodzaju konstrukcje nie muszą być wyposażane w urządzenia typu „strażak”, jak ma to miejsce w palnikach retortowych. Przenośnik ślimakowy napędzany jest przez silnik jednofazowy (10) za pośrednictwem reduktora obniżającego prędkość obrotową przy jednoczesnym zwiększaniu momentu napędowego. Parametry podajnika paliwa przedstawia Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Parametry ślimakowego podajnika paliwa.

PODAJNIK PALIWA	
Napięcie znamionowe	230 VAC
Średnica wewnętrzna rury	67 mm
Średnica ślimaka	50.4 mm
Średnica osi	17 mm
Skok ślimaka	41 mm
Strumień masowy paliwa przy pracy ciągłej	12 kg/godz.

Wydajność przenośnika ślimakowego jest zależna od jego wymiarów, prędkości obrotowej, kąta nachylenia oraz gęstości nasypowej transportowanego materiału. W okresie wykonywania badań na obiekcie wymienione wyżej parametry były stacjonarne, dlatego też strumień masowy paliwa dostarczanego do kotła zależny był jedynie od współczynnika wypełnienia sygnału sterującego napędem podajnika. Wzorcowanie podajnika paliwa przeprowadzono z użyciem wagi laboratoryjnej o dokładności 0.01 g, a czas pracy przenośnika ślimakowego ustalany był programowo za pomocą aplikacji sterującej w środowisku Matlab/Simulink. Pozwoliło to na wyznaczenie wydajności układu podawania paliwa, która przy pracy ciągłej podajnika wynosi $B_{max} = 12$ kg/h. Aby kocioł pracował z określoną mocą, musi być zasilany odpowiednią ilością paliwa. Należy mieć na uwadze, że energia chemiczna dostarczona do kotła w postaci paliwa nie zostanie w całości przekazana do czynnika grzewczego, gdyż zarówno proces spalania, jak również wymiana ciepła odbywa się z pewną sprawnością. Strumień masowy paliwa dostarczanego do paleniska w celu zapewnienia zadanej mocy cieplnej można w przybliżeniu obliczyć w oparciu o wartość opałową peletu, stopień zawilgocenia, straty związane z niecałkowitym i niezupełnym spalaniem oraz unoszeniem ciepła do komin i otoczenia. Największy udział w bilansie strat stanowi ilość ciepła unoszonego przez spaliny do atmosfery - tzw. strata kominowa q_A . Strata wylotowa (kominowa) zazwyczaj

obliczana jest wg wzoru empirycznego zwanego wzorem Siegerta jako różnica temperatury spalin i powietrza dostarczanego do kotła w odniesieniu do ilości ciepła, jaką można uzyskać ze spalania danego paliwa.

$$q_A = (T_{gas} - T_{amb}) \left(\frac{A_1}{CO_2} + B \right) \quad (3.1)$$

gdzie q_A oznacza procentową ilość ciepła wydzielonego w procesie spalania, jaka zostaje uniesiona ze spalinami, T_{gas} temperaturę spalin, T_{amb} temperaturę powietrza wlotowego do kotła, CO_2 stężenie dwutlenku węgla w spalinach, natomiast A_1 i B to współczynniki Siegerta charakterystyczne dla danego paliwa. Dla drewna suchego wynoszą one odpowiednio 0.65 i 0.

Na podstawie obliczonej straty kominowej szacowana jest sprawność energetyczna procesu spalania, której nie należy mylić ze sprawnością kotła

$$\eta = 100 - q_A \quad (3.2)$$

gdzie

η - sprawność procesu spalania w %

Powyższy wzór zakłada, że jedyną wielkością powodującą zmniejszenie sprawności spalania jest strata kominowa. Pomija, zatem straty niecałkowitego i niepełnego spalania, straty na promieniowanie, straty do otoczenia itp. Ze względu na daleko idące uproszczenie w powyższym wzorze należy pamiętać, że obliczonej w ten sposób sprawności nie można traktować jako wartości dokładnej, natomiast pozwala ona oszacować jaką ilość paliwa należy dostarczyć do kotła w jednostce czasu, aby osiągnąć zadaną moc cieplną.

$$B = \frac{P}{q_{v\ net}\eta} \quad (3.3)$$

gdzie $q_{v\ net}$ to wartość opałowa peletu, P oznacza moc cieplną, z jaką pracuje kocioł.

Po uwzględnieniu wartości opałowej peletu oraz sprawności procesu spalania (zależność 3.3) obliczono, że praca z mocą nominalną 16 kW wymaga dostarczenia paliwa w ilości $B_n = 3.43$ kg/h. Ponieważ wydajność układu podawania paliwa regulowana jest dwustanowo a nie w sposób ciągły (prędkość kątowna przenośnika ślimakowego jest stała), to żądana ilość podawanego w jednostce czasu paliwa jest wartością średnią za okres. Zgodnie z powyższym, współczynnik wypełnienia prostokątnego sygnału sterującego pracą podajnika paliwa dla mocy nominalnej wynosi

$$\tilde{B}_n = \frac{B_n}{B_{max}} = 0.2859 \quad (3.4)$$

Częstotliwość sygnału załączenia i wyłączenia podajnika może więc teoretycznie mieć wartość dowolną (ważny jest stosunek τ_1 do τ_0), jednak biorąc pod uwagę stałopalność palnika i fizykę spalania paliw stałych, czas pracy podajnika musi się zawierać

w określonym przedziale. Zbyt krótki czas trwania cyklu podawania paliwa (z zachowaniem określonego współczynnika wypełnienia) wpływa na żywotność elementów wykonawczych i cechuje się mniejszą stabilnością strumienia masowego paliwa. Natomiast długie przerwy pomiędzy załączeniami podajnika i dłuższy czas jego pracy powodują generowanie silnych zmian w intensywności przebiegu procesu spalania a także wprowadzają silną nieminimalnofazowość do obiektu. W badaniach przeprowadzonych na potrzeby niniejszej pracy częstotliwość sygnału prostokątnego sterującego pracą układu podawania paliwa wynosiła 1/7 Hz ($\tau_1 = 2$ s, $\tau_0 = 5$ s)

3.1.3. Układ doprowadzenia powietrza - wentylator nadmuchowy

Powietrze tłoczone jest do komory spalania za pośrednictwem nadmuchowego wentylatora promieniowego *RV-13* napędzanego jednofazowym silnikiem indukcyjnym z wirnikiem zewnętrznym. Obudowa wentylatora wykonana jest ze stopu aluminium, metalowy wirnik wentylatora mocowany jest bezpośrednio na zewnętrznym wirniku silnika. Wlot powietrza do wentylatora posiada przesłonę pozwalającą na regulację powierzchni czerpni oraz zabezpieczony jest osłoną uniemożliwiającą dotknięcie części ruchomych. Wentylator posiada wbudowany hallotronowy czujnik obrotów, który podłączony do sterownika umożliwia dokładną regulację wydatku powietrza. Impulsy z czujnika wyprowadzone są złączem *R/11* do sterownika, który podaje odpowiednią wartość skuteczną napięcia na zaciski silnika. Zastosowany wentylator nie posiada przepustnicy na wylocie redukującej ciąg grawitacyjny. Badany kocioł nie jest wyposażony w dzielony kanał dostarczający powietrze do komory spalania, dlatego nie ma w tym przypadku wyraźnego rozgraniczenia na powietrze pierwotne i wtórne. Konstrukcja paleniska zapewnia jednak, że strumień powietrza jest dostarczany zarówno bezpośrednio w złożę jak i w strefę płomienia. Powietrze jest zasysane poprzez rurę o średnicy \varnothing 100 mm, umożliwiającą pomiar jego prędkości, a pośrednio również objętościowy i masowy strumień dostarczany do komory spalania.

Tabela 3.3. Parametry wentylatora nadmuchowego.

Wentylator <i>RV-13</i>	
Rodzaj silnika napędowego	indukcyjny
Napięcie znamionowe	230 V
Częstotliwość znamionowa	50 Hz
Moc pobierania	70 W
Prąd znamionowy	0.35 A
Max. wydajność	240 m ³ /h
Max. spiętrzenie	310 Pa



Rys. 3.4. Wentylator nadmuchowy RV-13 wraz z rurą i czujnikiem prędkości powietrza.

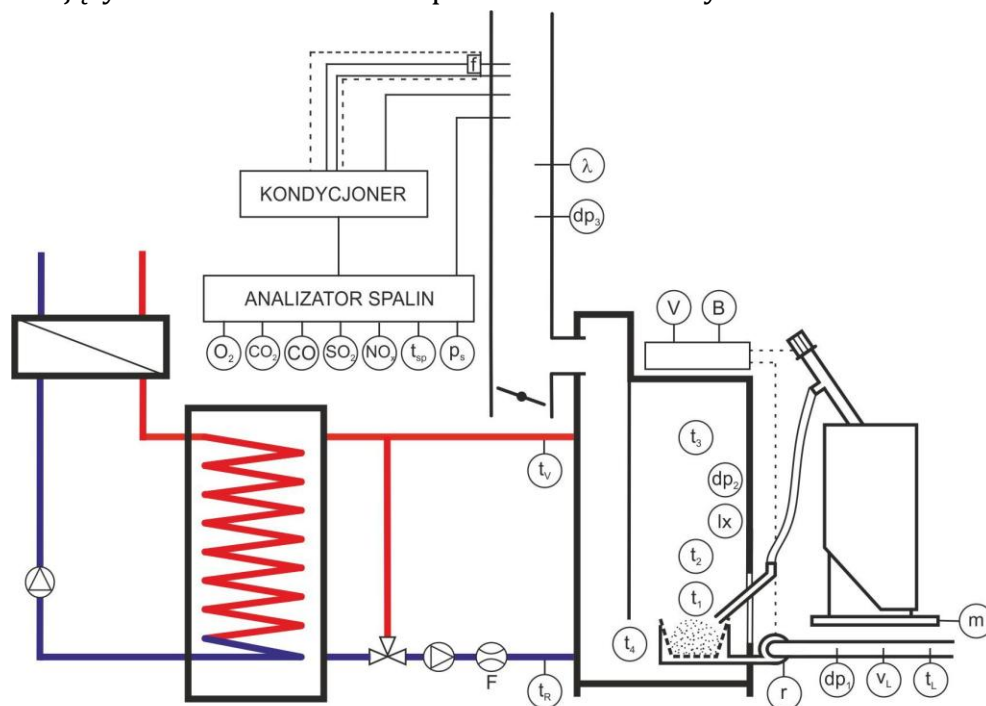
3.1.4. Sterownik fabryczny

Badany kocioł posiada wbudowany sterownik zapewniający nadzór nad temperaturą cieczy grzewczej, mocą kotła, oraz obsługę urządzeń peryferyjnych (zawory, pompy itp.). Standardowo współpracuje on z czujnikiem temperatury czynnika grzewczego, znajdującym się w płaszczu wymiennika kotła, czujnikiem temperatury spalin zainstalowanym w czopuchu i czujnikiem optycznym wykrywającym obecność płomienia w palniku. Zadaniem fabrycznego regulatora jest osiągnięcie zadanej temperatury w oparciu o nastawy wprowadzone przez użytkownika, takie jak czas podawania paliwa, czas przerwy w podawaniu, zakres prędkości obrotowej wentylatora nadmuchowego. Z uwagi na wybraną metodykę prowadzenia badań, cel i zakres niniejszej pracy oraz wykorzystanie autorskiego układu pomiarowo-rejestrującego, oryginalny sterownik nie był wykorzystywany podczas identyfikacji kotła i testowania algorytmów sterowania.

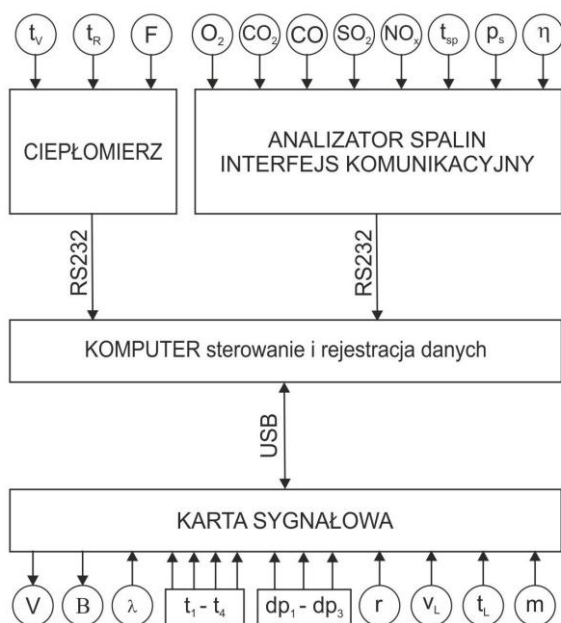
3.2. Stanowisko laboratoryjne

Stanowisko pomiarowe, wchodzące w skład Laboratorium Techniki Spalania, pozwala na prowadzenie badań w ściśle określonych warunkach, zgodnie z wymogami normy PN-EN 303-5:2012. Badany kocioł podłączony jest do instalacji obiegu wodnego wyposażonej w bufor o pojemności 1 m³, pompę o regulowanej wydajności, trójdrożny zawór regulacyjny wraz z regulatorem elektronicznym oraz wymiennik ciepła z chłodnicami rozpraszającymi energię cieplną na zewnątrz. Instalacja posiada aparaturę pomiarową oraz system monitorowania i rejestracji zmiennych procesowych,

głównie temperatur, ciśnień i koncentracji wybranych związków w spalinach. Schemat przedstawiający stanowisko badawcze przedstawiono na Rys. 3.5.



Rys. 3.5. Schemat stanowiska badawczego z kotłem *Orligno 400* o mocy 16 kW.

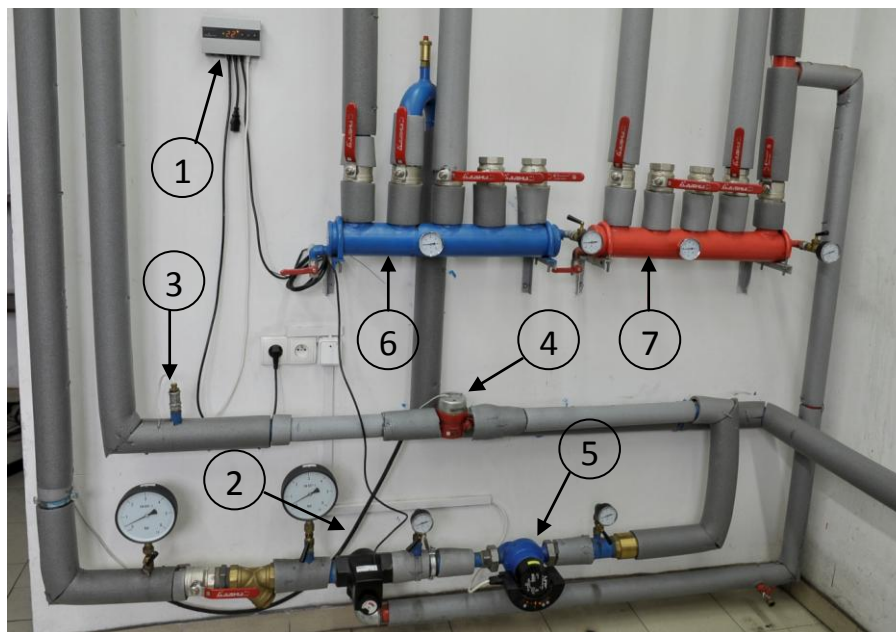


Rys. 3.6. Schemat funkcjonalny układu pomiaru i rejestracji danych oraz sterowania.

3.2.1. Obieg wodny

Instalacja grzewcza znajdująca się w Laboratorium Techniki Spalania, umożliwia pracę testowanego kotła w szerokim zakresie mocy. Składa się ona zasadniczo z dwóch, odseparowanych od siebie obiegów, których sprzężeniem jest zbiornik akumulacyjny

o pojemności 1m³. Obieg kotłowy wypełniony jest wodą pod ciśnieniem ok. 1 bara, natomiast w części zrzutowej ciepła, jako medium służy płyn chłodniczy zawierający alkohol glikolowy. Uwarunkowane jest to faktem, że chłodnice (wymyenniki ciepła cieczerpowietrze) zainstalowane są na zewnętrznej ścianie budynku laboratorium, gdzie w okresie zimowym poddawane są działaniu ujemnych temperatur. Chłodnice wyposażone w wentylatory mają zdolność rozproszenia energii cieplnej przy mocy ok. 100 kW, w zależności od różnicy temperatur zewnętrznej i czynnika grzewczego.



Rys. 3.7. Główny węzeł układu wodnego kotła.

Główny węzeł instalacji przedstawiono na Rys. 3.7. Obieg pierwotny (do którego podłączony jest kocioł) wyposażony jest w trójdrożny zawór mieszający (2), który umożliwia regulowany przepływ gorącej wody z nitki zasilania do magistrali powrotu wody do kotła. W ten sposób możliwe jest utrzymywanie temperatury wody powrotnej na żądanej wartości, niezbędnej do prawidłowego przebiegu procesu spalania oraz zabezpieczającej przed powstaniem tzw. punktu rosy w spalinach. Zbyt niska temperatura wody wpływającej do kotła ochładza ścianki płaszcza wodnego i powoduje zakłócenia procesu spalania. Ponadto, para wodna zawarta w gazach spalinowych kondensuje na chłodnych ściankach wymiennika, co znacznie przyspiesza korozję i pogarsza wymianę ciepła. Stopień otwarcia zaworu wymuszany jest poprzez siłownik elektryczny zasilany z dedykowanego do tego celu regulatora (1). Mikroprocesorowy regulator *DELTA 200 3D* utrzymuje zadaną temperaturę na nitce powrotnej do kotła w oparciu o pomiar dokonywany czujnikiem rezystancyjnym *Pt100* (3), przez co umożliwia pracę kotła przy stałej mocy, co jest jego podstawowym zadaniem w przestawianym układzie badawczym. Sterowanie siłownikiem elektrycznym zaworu trójdrożnego realizowane jest poprzez podawanie napięcia na odpowiednie zaciski silnika powodując jego obrót w lewo lub w prawo. Funkcja sterowania pracą pompy, którą oferuje sterownik zaworu nie jest wykorzystywana w w/w obiegu.

Tabela 3.4. Parametry regulatora zaworu trójdrogowego.

Regulator <i>DELTA</i> 200 3D		
Zakres mierzonych temperatur		- 9 °C do + 99 °C
Zakres ustawienia temperatur		+ 10 °C do + 90 °C
Histereza zaworu 3-drogowego		1 °C do 5 °C
Obciążalność wyjścia:	pompa	100 VA / 230 V
	zawór 3D	50 VA / 230 V

Przepływ wody w obiegu pierwotnym wymuszany jest przez pompę obiegową *LFP* (5) z elektronicznym układem sterowania silnika, zapewniającą stabilny przepływ czynnika w instalacji. Kolektory nitki wody grzewczej (7) i powrotu do kotła (6) umożliwiają jednoczesne podłączenie czterech urządzeń do obiegu pierwotnego, co jest rozwiązaniem bardzo wygodnym i elastycznym. Za pomiar mocy kotła metodą bezpośrednią oraz temperatur wody w nitce zasilającej i powrotnej odpowiada układ, w skład którego wchodzi: mikroprocesorowy przelicznik wskazujący *LEC 5*, wirnikowy przetwornik przepływu *POWOGAZ* (4) zainstalowany na odcinku powrotnym instalacji oraz parowane kablowe rezystancyjne czujniki temperatury *Pt100*.

Rys. 3.8. Ciepłomierz *LEC 5* z parowanymi czujnikami temperatury *Pt100*.

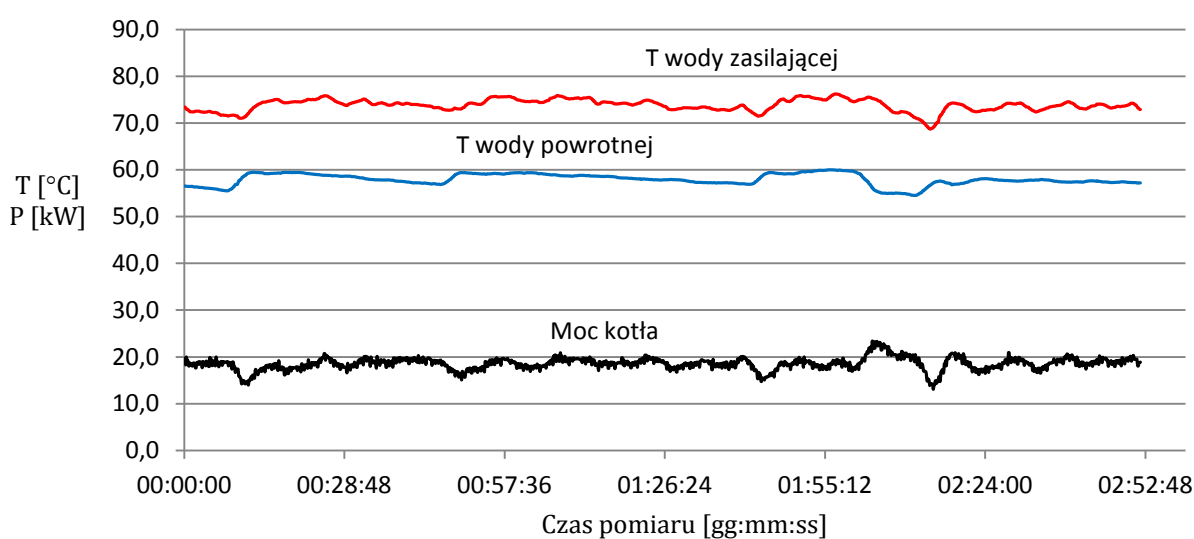
Licznik energii ciepłej *LEC 5* umożliwia dokładny pomiar temperatury zasilania i powrotu oraz strumienia objętościowego czynnika grzewczego wyznaczając w ten sposób moc kotła oraz ilość wygenerowanej energii cieplnej. Integrator współpracuje z wirnikowym przetwornikiem przepływu oraz z parowanymi czujnikami temperatury. Ciepłomierz wyposażony jest również w nieulotną pamięć *EEPROM*, w której przechowuje dane z ostatnich dwunastu miesięcy, takie jak: wskazania energii, energii

taryfowej, objętości, maksymalnej mocy, maksymalnego przepływu i stanów awaryjnych.

Tabela 3.5. Dane techniczne ciepłomierza LEC 5.

Ciepłomierz LEC 5			
Parametr	Wartość		
Jednostka wskazań	GJ		
Zakres temp. nośnika	2...180°C		
Zakres różnicy temp.	3...150°C		
Dokładność przelicznika	$E_{La} = \pm \left(0.5 + \frac{\Delta t_{min}}{\Delta t} \right) \%$		
Rejestry wartości średnich dobowych i godzinowych	Standardowo 300, dostępne wersje 700 i 1500		
Rejestry miesięczne	Standardowo 12		
Czujniki temperatury	Pt 100 lub Pt 500 do 3 m		
Przetwornik przepływu	<table border="0"> <tr> <td>V_0 (w litrach na 1 impuls) 0.1 do 2500 Częstotliwość max 5 Hz Czas impulsu stan niski min 80 ms, stan wysoki min 100 ms</td> <td>k_v (w impulsach na 1 liter) 0.1 do 1000 Częstotliwość max 200 Hz Czas impulsu stan niski min 1 ms, stan wysoki min 1 ms</td> </tr> </table>	V_0 (w litrach na 1 impuls) 0.1 do 2500 Częstotliwość max 5 Hz Czas impulsu stan niski min 80 ms, stan wysoki min 100 ms	k_v (w impulsach na 1 liter) 0.1 do 1000 Częstotliwość max 200 Hz Czas impulsu stan niski min 1 ms, stan wysoki min 1 ms
V_0 (w litrach na 1 impuls) 0.1 do 2500 Częstotliwość max 5 Hz Czas impulsu stan niski min 80 ms, stan wysoki min 100 ms	k_v (w impulsach na 1 liter) 0.1 do 1000 Częstotliwość max 200 Hz Czas impulsu stan niski min 1 ms, stan wysoki min 1 ms		

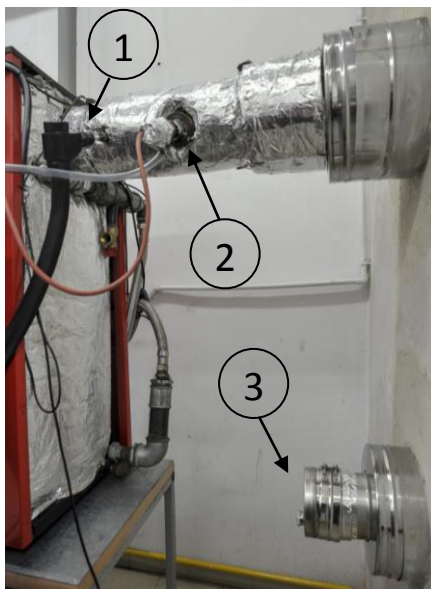
Licznik został opcjonalnie wyposażony w interfejs komunikacyjny RS232 umożliwiający odczyt, monitoring i rejestrację parametrów układu w środowisku INKAL zainstalowanym na komputerze klasy PC. Dane pomiarowe rejestrowane podczas prowadzenia eksperymentu pozwalają odnieść zjawiska zachodzące w komorze spalania do aktualnego obciążenia kotła i warunków zewnętrznych przy których pracuje.



Rys. 3.9. Przebiegi czasowe temperatury wody na wyjściu z kotła (zasilającej) i na wejściu do kotła (powrotnej) oraz mocy podczas serii pomiarowej.

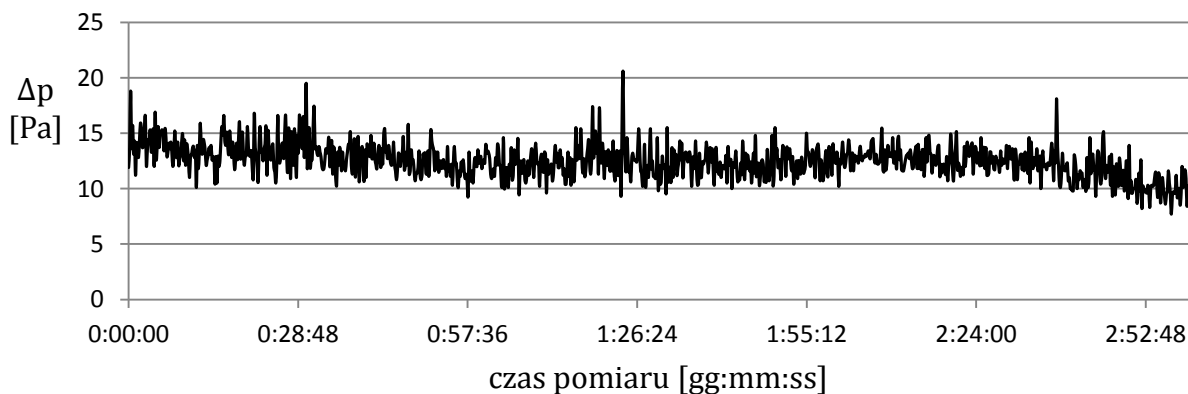
3.2.2. Przewód kominowy

Laboratorium, w którym zainstalowano badany kocioł, wyposażone jest w izolowany cieplnie komin o średnicy czynnej 200 mm i wysokości 8 m zainstalowany na zewnątrz budynku.



Rys. 3.10. Punkty pomiarowe w przewodzie kominowym oraz regulator ciągu.

W celu zapewnienia stabilnego ciągu kominowego układ kominowy wyposażono w grawitacyjny regulator ciągu. Urządzenie to reguluje kąt otwarcia przepustnicy dostarczającej do komina dodatkowy strumień powietrza, co skutkuje obniżeniem wartości podciśnienia statycznego. Na Rys. 3.10. ukazano punkt pobierania próbki gazów spalinowych (1), podłączenia przewodu czujnika podciśnienia oraz sondy lambda (2), a także miejsce zainstalowania mechanicznego regulatora ciągu kominowego (3). Żądana wartość podciśnienia statycznego w kominie została ustawiona na 15 Pa. Stabilizacja ciągu kominowego na zadanej poziomie jest możliwa wyłącznie wtedy, gdy podciśnienie w kominie będące funkcją wymiarów kanału kominowego, temperatury i warunków atmosferycznych, ma wartość wyższą od ustawionej na regulatorze.



Rys. 3.11. Przebieg czasowy podciśnienia statycznego w kominie zarejestrowany przez analizator *Photon Madur*.

3.2.3. Analizator spalin

Układ do pomiarów stężeń zanieczyszczeń gazowych w spalinach składa się z sondy aspiracyjnej, grzanego filtra wstępnego, ogrzewanego węża aspiracyjnego, urządzenia kondycjonującego próbkę PD-100 oraz analizatora spalin *PHOTON MADUR* (nr 4 na Rys. 3.1). Do poboru próbek spalin wykorzystano sondę gazu o długości 150 mm, wyposażoną w termoelektryczny czujnik typu *K* do pomiaru temperatury spalin. Ogrzewany wąż zapobiega wykropleniu się pary wodnej w sposób niekontrolowany, co z kolei prowadzi do niepoprawnych wyników pomiarów SO_2 . Kondycjoner oparty na ogniwach Peltiera stabilizuje poziom wilgoci i temperaturę gazu w torze pomiarowym oraz przetłacza próbkę spalin do analizatora.

Analizator *PHOTON* wyposażony jest w sensor elektrochemiczny pomiaru stężenia objętościowego (w %) O_2 oraz 5 sensorów mierzących metodą niedispersyjnej spektrometrii w podczerwieni (z ang. *NDIR* – *Non-Dispersive Infrared Spectroscopy*) stężenia objętościowe (w ppm) następujących gazów: CO_2 , CO , NO , NO_2 , SO_2 . Dodatkowo analizator mierzy temperaturę otoczenia (czujnik rezystancyjny *Pt500*), ciśnienie atmosferyczne i różnicowe.

W poniższej tabeli zestawiono wykaz przyrządów pomiarowych zastosowanych do wyznaczenia parametrów fizycznych spalin oraz stężeń zanieczyszczeń gazowych.

Tabela 3.6. Parametry analizatora spalin *PGD-100*.

ANALIZATOR SPALIN MADUR PHOTON PGD-100					
Parametr	Metoda pomiarowa	Zakres	Jedn.	Błąd pom.	Rozdz.
Stężenie CO	Spektrometria <i>NDIR</i>	0 ÷ 20000	ppm	4 ppm (4 %)	1 ppm
Stężenie NO	Spektrometria <i>NDIR</i>	0 ÷ 5000	ppm	5 ppm (5 %)	1 ppm
Stężenie NO_2	Spektrometria <i>NDIR</i>	0 ÷ 5000	ppm	5 ppm (5 %)	1 ppm
Stężenie SO_2	Spektrometria <i>NDIR</i>	0 ÷ 5000	ppm	5 ppm (5 %)	1 ppm
Stężenie CO_2	Spektrometria <i>NDIR</i>	0 ÷ 25	%	0.2 % (2 %)	0.01 %
Stężenie O_2	Elektrochemiczna	0 ÷ 25	%	0.2 % (2 %)	0.01 %
Temperatura spalin	Pomiar termoelementem	-10 ÷ 1000	°C	2 °C (1 %)	1 °C
Temperatura otoczenia	Pomiar czujnikiem rezystancyjnym	-10 ÷ 100	°C	1 °C	1 °C
Ciąg/podciśnienie	Czujnik tensometryczny	-25 ÷ +25	hPa	2 Pa lub 5 % rel.	1 Pa
Ciśnienie atmosferyczne	Czujnik półprzewodnikowy	800 ÷ 1200	mbar	5 mbar lub 2 % rel.	1 mbar

Wyniki pomiarów stężeń objętościowych (w ppm) zanieczyszczeń są przeliczane na stężenia masowe bezwzględne w mg/m^3 oraz stężenia masowe odniesione do (ważone względem) ilości tlenu w spalinach, czyli w przeliczeniu na tzw. warunki referencyjne.

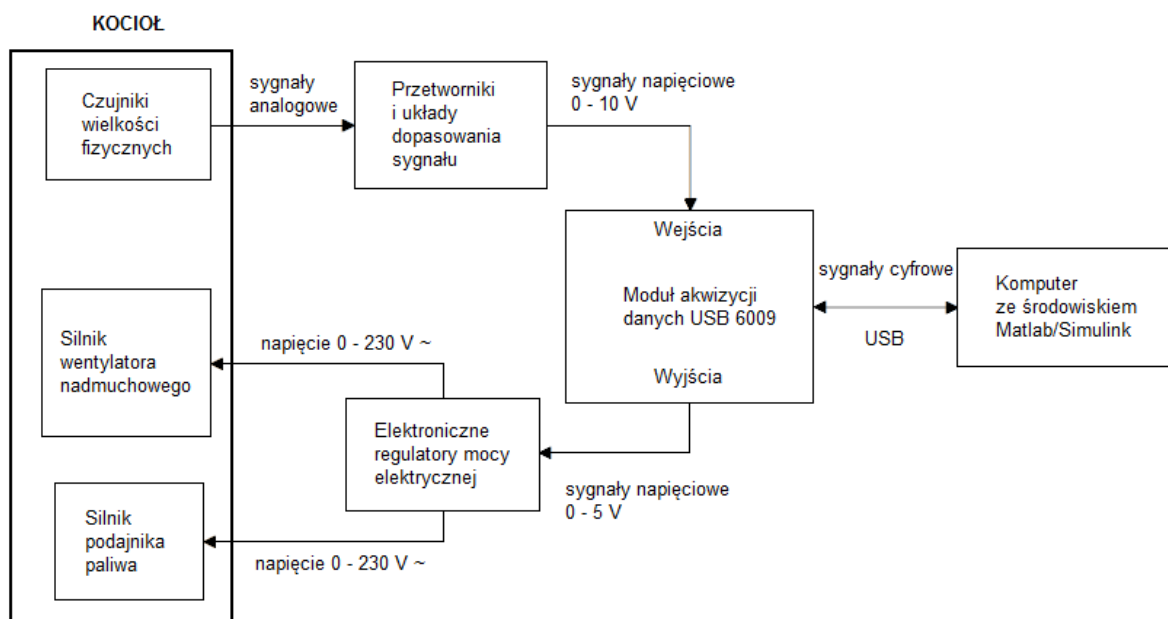
Na podstawie powyższych danych pomiarowych oraz parametrów paliwa analizator wylicza dodatkowe parametry, takie jak:

- stężenie tlenków azotu, jako sumę stężeń NO i NO_2 bezpośrednio mierzonych z pomiarów,
- strata wylotowa fizyczna, na podstawie powszechnie stosowanego, empirycznego wzoru Siegerta [RCD11],
- strata wylotowa chemiczna (niezupełnego spalania) [CLW08],
- sprawność kotła metodą uproszczoną, na podstawie obliczonych strat,
- współczynnik nadmiaru powietrza λ .

Należy zaznaczyć, że sprawność wyznaczana metodą powyższą jest wygodna w zastosowaniu, jako parametr porównawczy do celów regulacji kotła. Jednak dokładne energetyczne zbilansowanie kotła (czyli obliczenie jego całkowitej sprawności) wymaga dodatkowo znajomości strat niecałkowitego spalania i strat do otoczenia oraz strat wylotowej na podstawie entalpii paliwa i powietrza.

3.2.4. Układ pomiarowy wybranych wielkości fizycznych

Standardowe pomiarowe wyposażenie kotła ogranicza się do czujnika temperatury wody wypływającej z kotła, czujnika temperatury spalin umiejscowionego w czopuchu kominowym oraz czujnika prędkości obrotowej wentylatora. Sygnały z tych sensorów są przetwarzane i wykorzystywane przez fabryczny sterownik i w normalnych warunkach nie są dostępne dla zewnętrznych układów pomiarowych. Poza tym, wielkości te są wystarczające do regulacji dwustanowej mocy kotła, lecz nie zawierają wystarczającej informacji o procesie spalania. Na potrzeby przeprowadzenia eksperymentu dla identyfikacji obiektu został on doposażony w szereg czujników, pozwalających mierzyć i rejestrować wielkości fizyczne niosące informacje o warunkach pracy kotła. Następnie, w oparciu o dostępne na rynku podzespoły oraz z wykorzystaniem autorskich układów elektronicznych zbudowano układ pomiarowo-rejestrujący, dostarczający dane niezbędne do zbudowania modelu matematycznego badanego obiektu. Wspomniany system akwizycji danych składa się zasadniczo z czterech głównych części: czujników, przetworników pomiarowych, karty pomiarowej z przetwornikiem A/C oraz aplikacji w środowisku Matlab/Simulink. Moduł akwizycji danych *NI USB-6009* firmy National Instruments, zwany również kartą pomiarową, pozwala m.in. na przetworzenie analogowych sygnałów z czujników na postać cyfrową umożliwiając ich obróbkę w systemie komputerowym, oraz umożliwia wygenerowanie zmiennego sygnału napięciowego w zakresie 0...5 VDC na dwóch wyjściach analogowych.



Rys. 3.12. Schemat blokowy drogi pomiarowej i rejestracji wielkości fizycznych oraz układu wykonawczego pętli sterowania.

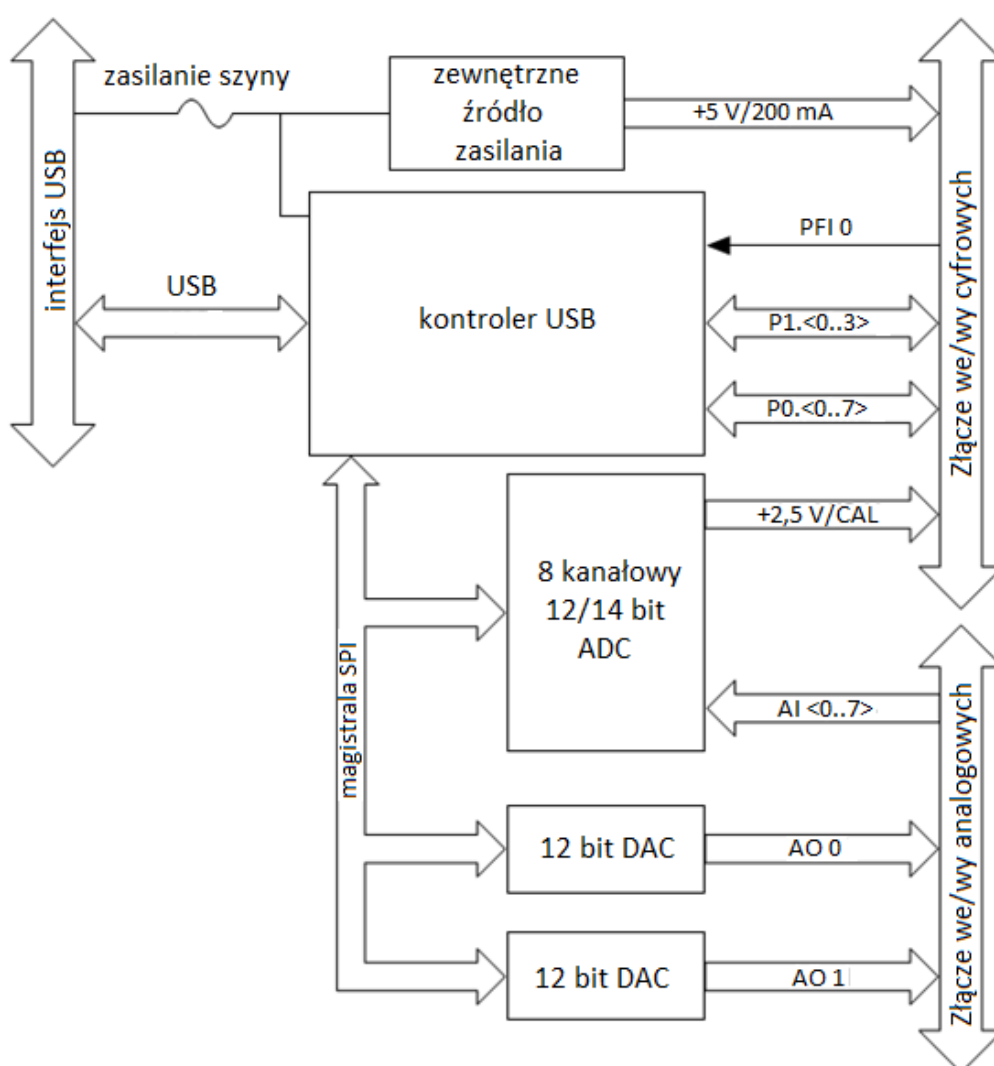
Pomimo tego, że karta pomiarowa zaprojektowana została przez NI dla środowiska LabView, to dzięki odpowiednim sterownikom jest w pełni obsługiwany przez środowisko Matlab/Simulink. Zestawienie zacisków sygnałowych karty NI USB-6009 przedstawia Tabela 3.7.

Tabela 3.7. Interfejs przyłączeniowy karty sygnałowej USB-6009.

Nazwa sygnału	Odniesienie	Kierunek	Opis
<i>GND</i>	-	-	Masa (wspólny punkt odniesienia)
<i>AI(0...7)</i>	Zmienne	Wejście	Wejścia analogowe, kanały 0...7
<i>AO(0...7)</i>	<i>GND</i>	Wyjścia	Wyjścia analogowe, kanały 0 i 1
<i>PO.(0...7)</i>	<i>GND</i>	Wejścia/Wyjścia	Port 0 cyfrowych wejść/wyjść, kanały 0...7
<i>P1.(0...3)</i>	<i>GND</i>	Wejścia/Wyjścia	Port 1 cyfrowych wejść/wyjść, kanały 0...3
<i>PFI 0</i>	<i>GND</i>	Wejście	Wejście licznika/wejście wyzwalające
+2,5 V	<i>GND</i>	Wyjście	Źródło napięcie referencyjnego
+5 V	<i>GND</i>	Wyjście	Źródło napięcia zasilającego

Omawiany produkt firmy National Instruments posiada 8 wejść analogowych *AI* (0..7) dla konfiguracji asymetrycznej (ang. *single-ended*), tzn. dla połączenia wszystkich wejść w odniesieniu do wspólnej masy. Zakres mierzonych napięć każdego kanału dla takiego trybu pracy zawiera się w przedziale -10...10 V. Dla połączenia różnicowego (ang. *differential*) liczba wejść analogowych ogranicza się do 4, ale podwaja się wtedy zakres

pomiarowy do wartości od -20 do 20 V. Moduł *NI USB-6009* dla wejścia różnicowego posiada następujące stopnie zakresów: ± 20 , ± 10 , ± 5 , ± 4 , ± 2.5 , ± 2 , ± 1.25 oraz ± 1 V. Dopasowanie do tych zakresów następuje dzięki programowanemu wzmacniaczowi (ang. *PGA*) dostarczającemu wzmocnienia sygnału wejściowego o wartościach 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16 i 20. Jeżeli wejście skonfigurowane jest jako asymetryczne (pomiar względem masy), to możliwa jest tylko jedna wartość zakresu tj. ± 10 V (wzmocnienie o wartości 1). Rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego dla trybu różnicowego wynosi 14 bitów, natomiast sygnał z wejścia asymetrycznego przetwarzany jest 13-bitowo. Układ pracuje z częstotliwością próbkowania 48 kHz dla podłączenia pojedynczego kanału i 42 kHz, gdy pomiar przeprowadzany jest z wykorzystaniem większej liczby kanałów.

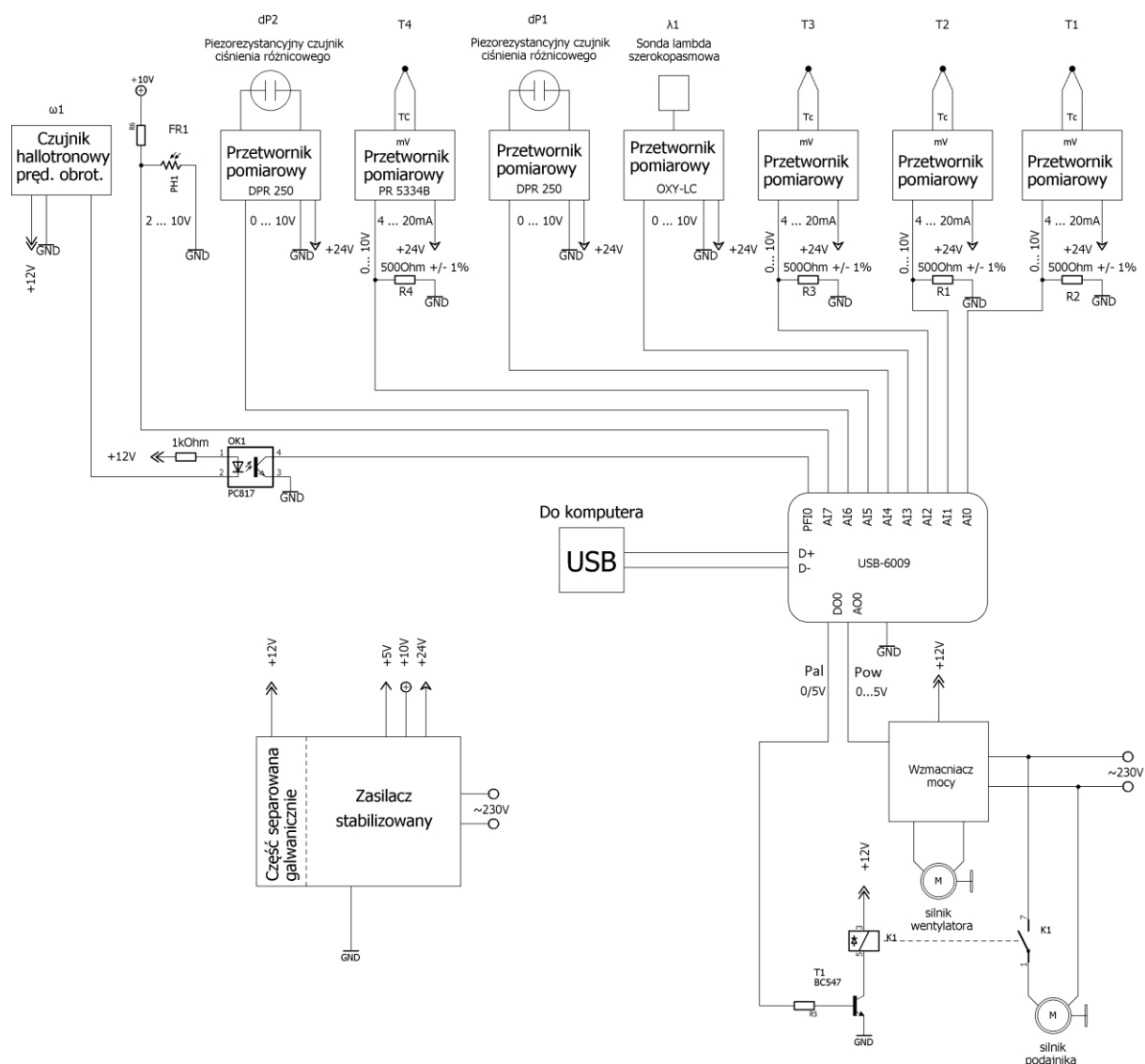


Rys. 3.13. Struktura wewnętrzna modułu akwizycji danych *NI USB-6009*.

Omawiana karta posiada również dwa wyjścia analogowe, obsługiwane przez 12-bitowy przetwornik cyfrowo-analogowy (ang. *DAC Digital to Analog Converter*) o maksymalnej częstotliwości przetwarzania 150 Hz i zakresie wyjściowym od 0 do +5 V. Interfejs cyfrowy układu składa się z dwunastu kanałów cyfrowych, programowalnych jako

3. Stanowisko badawcze

wejścia lub wyjścia w standardzie *TTL*, *CMOS* i *LVTTL* oraz 32-bitowego licznika pracującego z maksymalną wejściową częstotliwością wynoszącą 5 MHz. Wejście licznikowe może być też wykorzystany jako wyjście wyzwalające, czyli cyfrowy *trigger*. W oparciu o moduł *NI USB-6009* oraz czujniki wielkości fizycznych wraz z przetwornikami sygnałów, zbudowany został przez autora system umożliwiający pomiar i rejestrację zmiennych dostępnych pomiarowo oraz sterowanie urządzeniami wykonawczymi (pracą wentylatora i podajnika paliwa). Oprócz elementów i urządzeń dostępnych na rynku, układ zawiera również autorski sprzęt elektroniczny wykonany na potrzeby pracy.



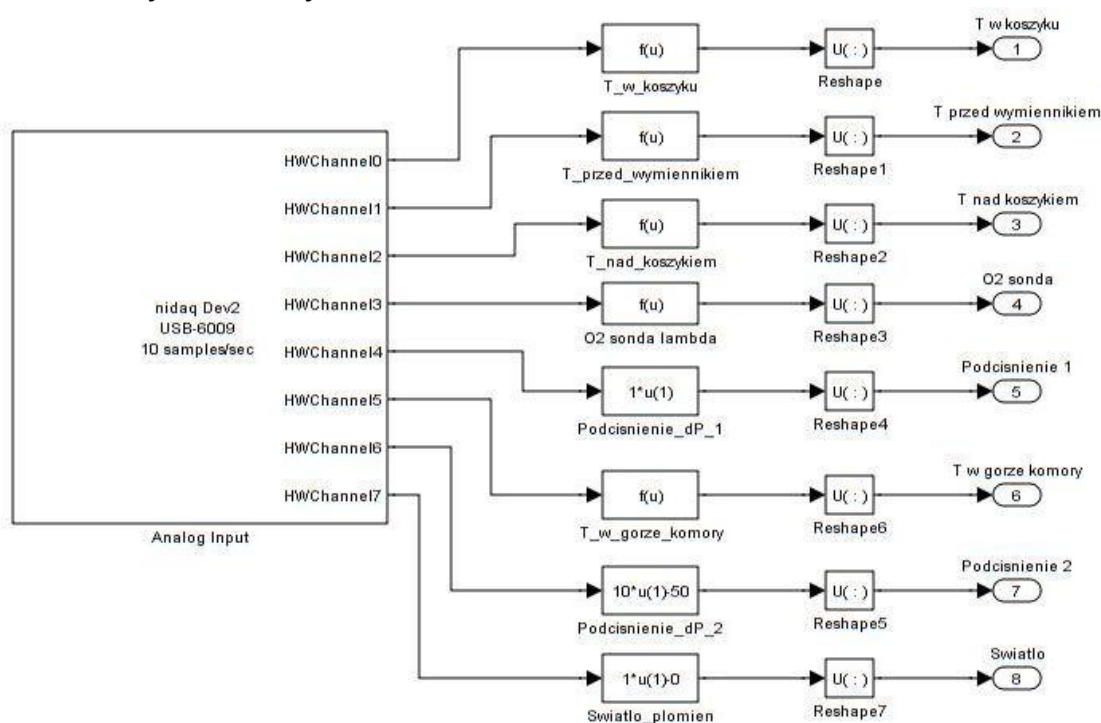
Rys. 3.14. Schemat systemu pomiarowo-sterującego.

Jak już zostało wspomniane, środowisko Matlab/Simulink w pełni współpracuje z modułem *NI USB-6009*. Pozwoliło to autorowi na połączenie aplikacji rejestrująco-sterującej z elektronicznymi układami pomiarowo-wykonawczej. Wyznaczone przez regulator programowe sygnały sterujące przetwarzane są w omawianym module do postaci napięciowej i podawane na fizyczne układy podawania powietrza i paliwa.

Tabela 3.8. Przyporządkowanie wejść i wyjść w karcie sygnałowej.

We/Wy karty pomiarowej	Oznaczenie	Wielkość pomiarowa
Wejście analogowe AI0	$T1$	Temperatura w koszyku
Wejście analogowe AI1	$T2$	Temperatura przed wymiennikiem
Wejście analogowe AI2	$T3$	Temperatura nad koszykiem
Wejście analogowe AI3	$\lambda 1$	Stężenie tlenu w spalinach
Wejście analogowe AI4	$dp1$	Podciśnienie różnicowe 1
Wejście analogowe AI5	$T4$	Temperatura w górnej części komory
Wejście analogowe AI6	$dp2$	Podciśnienie różnicowe 2
Wejście analogowe AI7	$FR1$	Natężenie światła w komorze
Wejście licznika PF10	$\omega 1$	Prędkość obrotowa wentylatora
Wyjście cyfrowe DO0	Pal	Sygnal zał/wył podajnika paliwa
Wyjście analogowe AO0	Pow	Sygnal mocy wentylatora

Opis wejść i wyjść modułu *NI USB-6009* oraz sygnałów z nimi połączonych zawarto w Tabeli 3.8. Implementacja programowa układu pomiarowego zawiera oferowany przez środowisko Matlab/Simulink system obsługujący wejścia sygnałowe karty *NI USB-6009* oraz funkcje skalowania wartości napięcia na zakres pomiarowy czujników. Dane są rejestrowane z określonym czasem próbkowania (0.2 sekundy) i zapisywane w zdefiniowanych zmiennych.

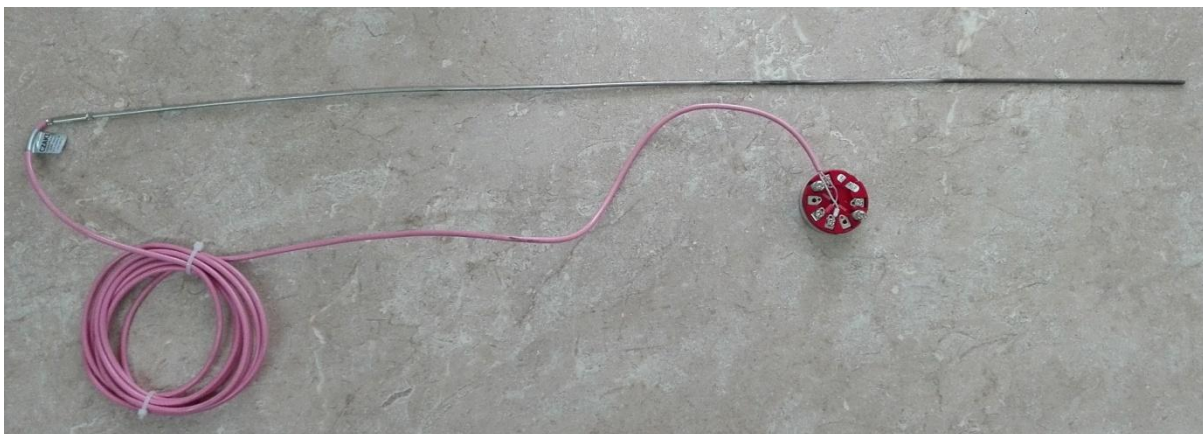


Rys. 3.15. Podsystem w środowisku Matlab/Simulink – skalowanie i rejestrowanie napięciowych sygnałów z czujników zainstalowanych na kotle.

Wejścia badanego kotła (układy wykonawcze sterujące podajnikiem paliwa i wentylatorem nadmuchowym) oraz jego wyjścia (czujniki wielkości fizycznych z przetwornikami) wraz z funkcjami skalowania napięcia i kartą pomiarową, zostały scalone w jeden system środowiska Matlab/Simulink. W punktu widzenia aplikacji programistycznej badany kocioł jest zatem widziany jako układ z dwoma wejściami i dziewięcioma wyjściami, co zostało przedstawione w Podrozdziale 3.5. na Rys. 3.27. Układ, którego schemat ideowy przedstawiono na Rys. 3.14. umożliwia pomiar i rejestrację następujących wielkości fizycznych dostępnych w badanych obiekcie:

a) Pomiar temperatury w wybranych punktach kotła

Do pomiaru temperatury w określonych obszarach komory spalania zastosowano czujniki termoelektryczne (zwane potocznie „termoparami”) o charakterystyce „N” i średnicy 3 mm oraz 5 mm. Elementy te wykazują liniową zależność siły termoelektrycznej od temperatury w szerokim jej zakresie (od $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ wg IEC584), przy czym ich płaszcz jest odporny na utlenianie i warunki panujące wewnątrz komory.



Rys. 3.16. Płaszczowy termoelektryczny czujnik temperatury z przetwornikiem pomiarowym.

Ponieważ wartość generowanego na styku dwóch metali napięcia (zjawisko Seebecka) jest rzędu mV, to termoelement należy podłączyć do karty pomiarowej za pośrednictwem odpowiednio wyskalowanego przetwornika. Do tego celu został użyty programowalny przetwornik *PR5334B*, który zapewnia zlinearyzowany pomiar temperatury, wysoką dokładność pomiaru oraz izolację galwaniczną. Posiada on również wbudowany czujnik temperatury służący do kompensacji tzw. zimnego końca. Przetwornik konwertuje bipolarny sygnał napięciowy (siłę termoelektryczną) na sygnał pętli prądowej 4-20 mA wg zdefiniowanej i zaprogramowanej zależności liniowej. Z uwagi na to, że karta pomiarowa posiada wyłącznie wejścia napięciowe 0-10 V, toteż sygnał prądowy posłużył do wygenerowania spadku napięcia w przedziale 2-10 V na

precyzyjnym rezystorze o wartości $500 \Omega \pm 1 \%$. Schemat połączenia czujników termoelektrycznych do karty pomiarowej przestawiono na Rys. 3.10.

Tabela 3.8. Parametry przetwornika sygnały temperatury.

Podstawowe parametry przetwornika PR5334B	
Temperatura pracy	-40...85 °C
Napięcie zasilania	7.2...28 VDC
Pobór mocy	25 mW...0.8 W
Spadek napięcia	7.2 VDC
Czas nagrzewania	5 min
Stosunek sygnał/szum	Min. 60 dB
Dynamika sygnału wejściowego	18 bitów
Dynamika sygnału wyjściowego	16 bitów
Błąd podstawowy dla TC typu N	$\leq \pm 1$ °C
Współczynnik temperaturowy dla TC typu N	$\leq \pm 0.05$ °C/°C
Wpływ zmiany napięcia zasilania	< 0.005 % zakresu /1 VDC
Zakres pomiarowy wejścia napięciowego	-12...150 mV
Kompensacja zimnych końców	$< \pm 1.0$ °C
Zakres sygnału wyjściowego	4...20 mA
Czas odświeżania sygnału wyjściowego	440 ms

Pomiar temperatury odbywa się w określonych obszarach komory spalania (Rys. 3.5), a więc:

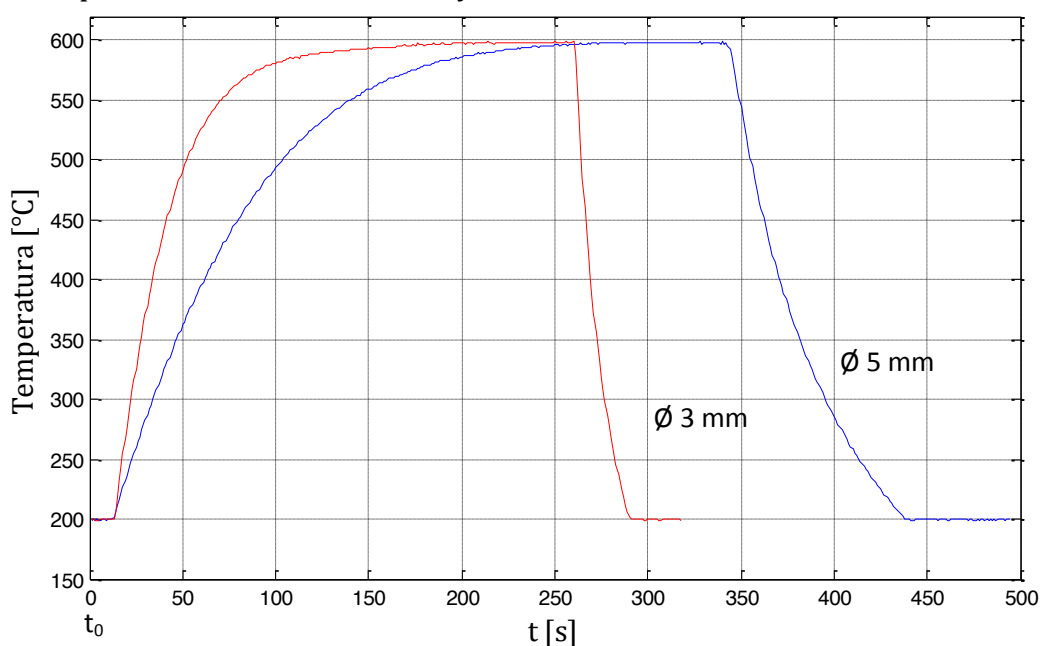
- w koszyku, gdzie rejestrowana jest temperatura w złożu, wewnątrz płomienia.
- nad strefą płomienia, gdzie temperatura jest najwyższa a jej pomiar niesie informację o przebiegu procesu spalania. Wadą tego umiejscowienia jest silny wpływ płomienia, który omywa płaszcz czujnika, wprowadzając zakłócenia sygnału.
- w górnej części komory, gdzie następuje niejako nawrót gorących spalin, ich odbicie w kierunku wymiennika ciepła. Czujnik jest umiejscowiony na tyle blisko, że opóźnienie sygnału z płomienia jest nieduże, a jednocześnie w takiej odległości, aby bezpośredni wpływ płomienia był wyeliminowany.
- przed wlotem do pionowego wymiennika ciepła, gdzie temperatura spalin jest wyraźnie niższa w porównaniu do innych stref komory spalania. Wyraźnie widoczna jest inercja wprowadzona przez komorę, wyższe harmoniczne sygnału są odfiltrowane.

Ponieważ w każdej z wymienionych stref spotykane są inne zakresy temperatur, toteż przetworniki zostały wyskalowane również indywidualnie, aby zapewnić możliwie wysoką rozdzielczość sygnału pomiarowego.

Tabela 3.9. Parametry termoelementów zastosowanych w układzie pomiarowym.

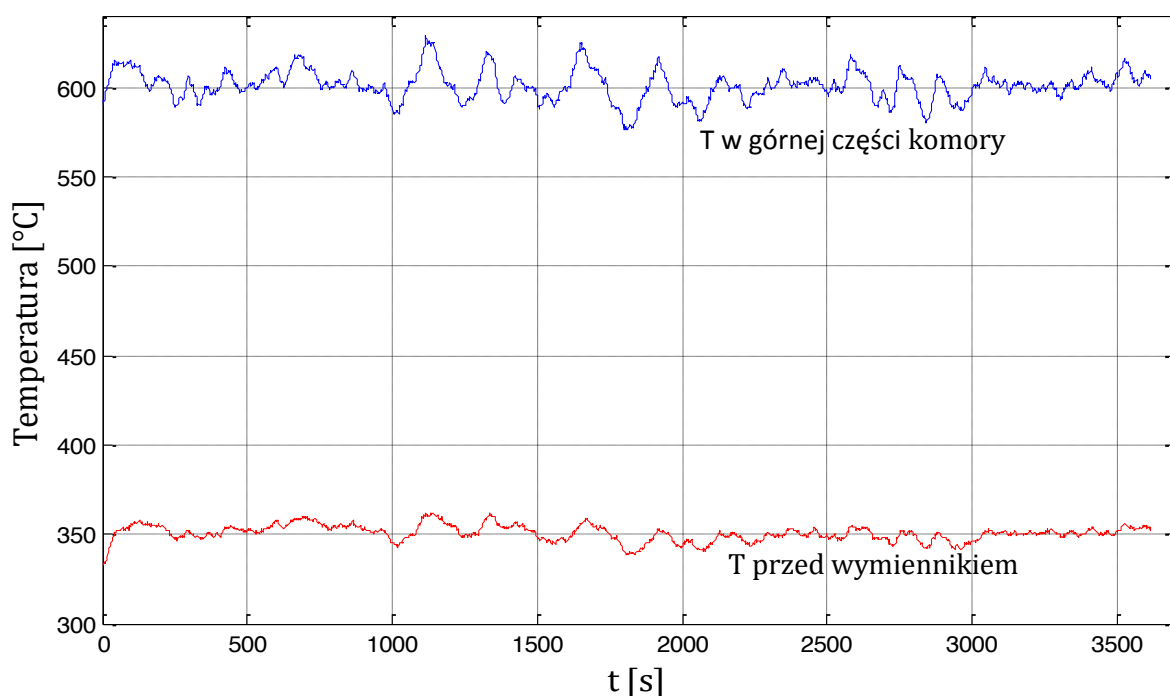
Punkt pomiaru	Średnica	Typ	Zakres przetwornika
-	mm	-	°C
w koszyku	5	N (NiCrSi-NiSi)	200-800
nad strefą płomienia	3	N(NiCrSi-NiSi)	400-1000
w górnej cz. komory	3	N(NiCrSi-NiSi)	300-1000
przed wymiennikiem	3	N(NiCrSi-NiSi)	200-600

W celu wyznaczenia inercji stosowanych termoelektrycznych czujników temperatury, zbadano ich odpowiedzi na skokowe zmiany temperatury. W chwili czasowej t_0 czujniki zostały włożone przez otwór pomiarowy do piecyka laboratoryjnego rozgrzanego do temperatury 600 °C. Energoelektroniczny układ regulacji temperatury w piecyku zapewniał jej stabilność na poziomie ± 1 °C. Po uzyskaniu stanu ustalonego, przy którym wartość sygnału z przetworników pomiarowych już nie wzrastała, termoelementy zostały wyjęte w nagrzanej komory i poddane stygnięciu w temperaturze pokojowej. Rejestrowana wartość minimalna nie osiąga temperatury otoczenia, gdyż dolny zakres skalowania przetworników PR5334B wynosił 200 °C.



Rys. 3.17. Odpowiedź termoelementów na skokowe zmiany temperatury.

Jak widać na Rys. 3.17, mniejszą stałą czasową wykazuje czujnik o mniejszej średnicy, co jest wynikiem mniejszej bezwładności cieplnej płaszczka, którym osłonięty jest złącze termoelektryczne. Inercja termoelementu o większej średnicy (5 mm) w naturalny sposób filtruje wysokoczęstotliwościowe zmiany temperatury, w prowadzi jednak opóźnienie w obwodzie przesyłu informacji o procesie spalania. Do pomiaru w tych miejscach komory, w których temperatura najlepiej koreluje ze stężeniem tlenu w spalinach (górną część komory, nad koszykiem i przed wymiennikiem) stosowano termoelementy o średnicy 3 mm.

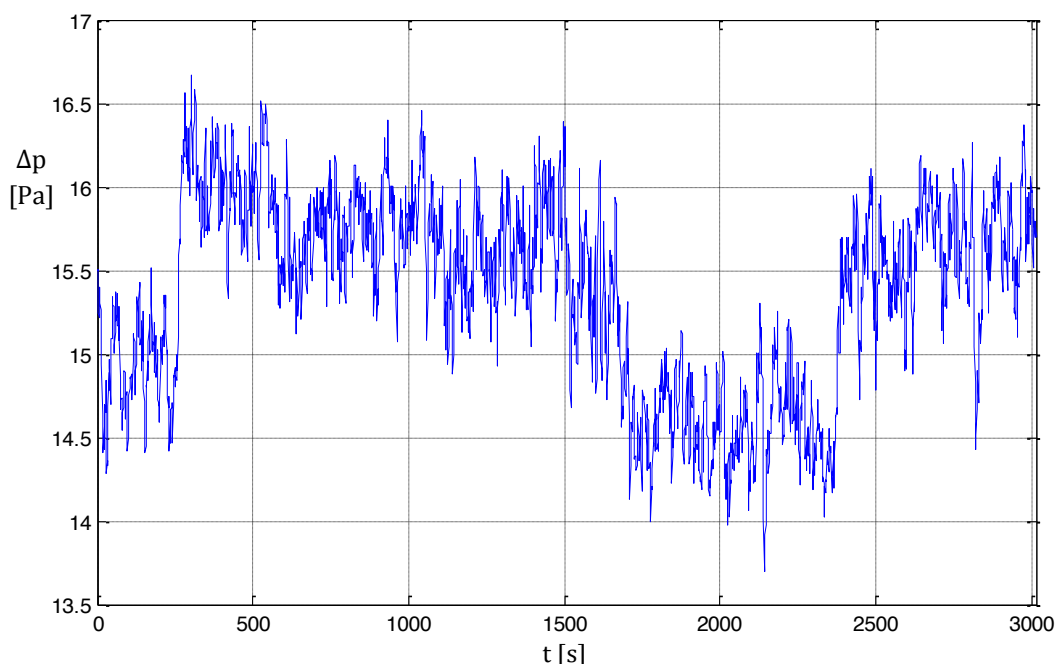


Rys. 3.18. Przebiegi czasowe temperatury spalin w wybranych częściach kotła.

Przedstawiony powyżej Rys. 3.18 ukazuje przebieg temperatury w dwóch wybranych obszarach komory spalania podczas jednej serii pomiarowej. Temperatura spalin w górnej części komory oscyluje wokół wartości 600 °C, natomiast termoelement zainstalowany przed wejściem do wymiennika wskazuje wartość ok. 350 °C. Okres próbkowania sygnału przetwornika temperatury wynosi 0.2 s dla wszystkich zmiennych rejestrowanych przez układ pomiarowy.

b) Pomiar ciśnień różnicowych

Na skutek pracy wentylatora nadmuchowego, zachodzących w komorze spalania przemian fizykochemicznych oraz ciągu kominowego, rozkład ciśnień w różnych obszarach kotła ulega ciągłej zmianie. Z uwagi na to, iż literatura światowa informuje o sterowaniu pracą kotłów w oparciu o podciśnienie [Nus99, Pad02], wartości tej wielkości fizycznej były również rejestrowane i analizowane w niniejszej pracy. Pomiar podciśnienia statycznego, a ściślej rzecz ujmując różnicy ciśnień pomiędzy dwoma wybranymi obszarami obiektu umożliwiały przetworniki ciśnienia różnicowego DPT250. Zasada działania tego urządzenia oparta się o wykorzystanie piezorezystancyjnego elementu pomiarowego. Zmiany ciśnienia różnicowego wywołują naprężenia w strukturze kryształu kwarcu a to z kolei skutkuje zmianą rezystancji czujnika. Wartość rezystancji układu jest przetwarzana na analogowy, liniowy, napięciowy sygnał wyjściowy (0-10 VDC) proporcjonalny do różnicy mierzonych ciśnień. Sygnał napięciowy z przetworników ciśnienia są bezpośrednio dołączone do karty pomiarowej, która pośredniczy w rejestrowaniu danych przez aplikację komputerową.



Rys. 3.19. Przebieg czasowy podciśnienia statycznego w czopuchu kominowym, zarejestrowany za pomocą przetwornika *DPT250*.

Przetwornik posiada funkcję autokalibracji, tzn. że czujnik samoczynnie eliminuje długoterminowy dryft zera w piezorezystancyjnym elemencie pomiarowym. Ustawienie zera odbywa się co 10 minut, a sygnał wyjściowy w tym czasie (4 sekund) jest niezmienny.

Tab. 3.10. Podstawowe parametry przetwornika ciśnienia *DPT250*

Przetwornik różnicy ciśnień <i>DPT250</i>	
Napięcie zasilania	24 VDC $\pm 10\%$
Pobór mocy	< 1 W
Czas reakcji	0.8/4 s (wybierany zworką)
Jednostki pomiarowe	Pa, kPa, mbar, inchWC, mmWC,
Element pomiarowy	Piezorezystancyjny
Błąd pomiaru całkowity	± 3 Pa
Sygnał wyjściowy	0...10 VDC ($R \geq 1$ k Ω) lub 4...20 mA ($R \leq 500$ Ω)
Temperatura pracy	-10...50 °C
Wilgotność pracy	0...95 % RH
Stopień ochrony	IP54

Pomiar ciśnienia różnicowego dokonywany był w następujących punktach:

- między czerpnią a wylotem wentylatora – określony w ten sposób został spręż wentylatora nawiewowego),
- między wylotem wentylatora a komorą spalania (w strefie nad płomieniem) – dokonano pomiaru zjawiska rozprężenia powietrza i wahań ciśnienia związanych z intensywnością procesu spalania,

- między komorą spalania a czopuchem kominu – pomiar wpływu wymiennika ciepła i wahań ciągu kominowego (ciśnienia statycznego w kominie),
- w czopuchu kominowym względem ciśnienia atmosferycznego za pomocą analizatora spalin *MADUR* (Rys. 3.10).

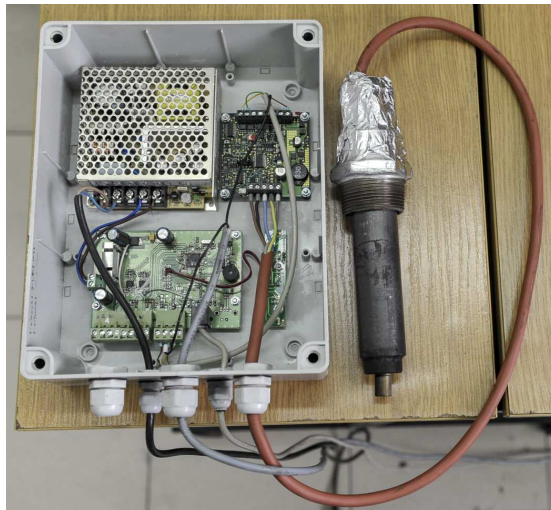
c) Pomiar stężenia tlenu w spalinach

Udział objętościowy tlenu resztkowego w gazach wylotowych z kotła był mierzony równolegle poprzez dwa urządzenia pomiarowo-rejestrujące. Pomiar referencyjny dokonywany był przez analizator spalin, wyposażony w celkę elektrochemiczną umożliwiającą oznaczenie stężenia tlenu w spalinach (Rozdział 3.2.2). Ze względu na sposób pracy analizatora, układ pobierania i przygotowania próbki, wprowadzał on opóźnienie sygnału informującego o składzie chemicznym spalin na poziomie 40 sekund. O ile omawiane opóźnienie nie miało wpływu na proces wyznaczenia modelu kotła, gdyż można było je uwzględnić podczas obróbki sygnałów, to jednak zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego regulatora przez analizator okazało się niemożliwe w wyniku braku możliwości wyprowadzenia sygnału. Między innymi z tego powodu wynikła potrzeba zastosowania szerokopasmowego czujnika tlenu, zwanego też sondą lambda. Czujnik ten posiada monolityczną strukturę, zintegrowaną grzałkę i własne źródło tlenu odniesienia a jego zasada działania oparta jest na pomiarze tzw. ciśnienia parcjalnego (cząstkowego) tlenu z wykorzystaniem właściwości dwutlenku cyrkonu. Ponadto odznacza się krótkim czasem podgrzewania do temperatury pracy i wysoką niezawodnością, jeżeli użytkowana jest zgodnie z przeznaczeniem. Sonda lambda wytwarza sygnał wyjściowy proporcjonalny do resztkowej zawartości tlenu w gazach spalinowych, dostępny w szerokim zakresie stężenia O_2 . Szerokopasmowe czujniki tlenu posiadają dwie komory - jedną pomiarową i jedną pompową. W komorze detekcyjnej mierzony jest tlen zawarty w gazach spalinowych, a jego stężenie, za pośrednictwem wygenerowanego napięcia, porównywane jest do wartości zadanej 450 mV (odpowiadającej $\lambda=1$). Jeśli wystąpi odchylenie od tej wartości, to przez włączenie prądu pompy w komorze pompowej następuje wpompowanie lub wypompowanie jonów tlenu do/z komory detekcyjnej, do momentu, w którym wartość napięcia komory pomiarowej ponownie będzie odpowiadać wartości 450 mV. Wartość prądu pompy stanowi wielkość pomiarową, która w sposób praktycznie liniowy opisuje stężenie tlenu. Podczas spalania paliwa w warunkach stechiometrycznych wartość sygnału wyjściowego wynosi zero, ponieważ ciśnienie cząstkowe tlenu w komorze detekcyjnej odpowiada podanej powyżej wartości zadanej. Jak wynika z powyższego opisu, szerokopasmowa sonda lambda może pracować tylko i wyłącznie w połączeniu z zawansowanym elektronicznie układem sterującym. Sterownik sondy lambda szerokopasmowej zawiera:

- blok zasilania elementu grzejnego, odpowiedzialny za zapewnienie żądanej temperatury pracy sondy,
- układ źródła prądowego, który dostarcza wymaganą wartość natężenia prądu do komory pompowej,
- źródło napięcia odniesienia 450 mV, jako wartość wzorcowa dla wartości $\lambda=1$,

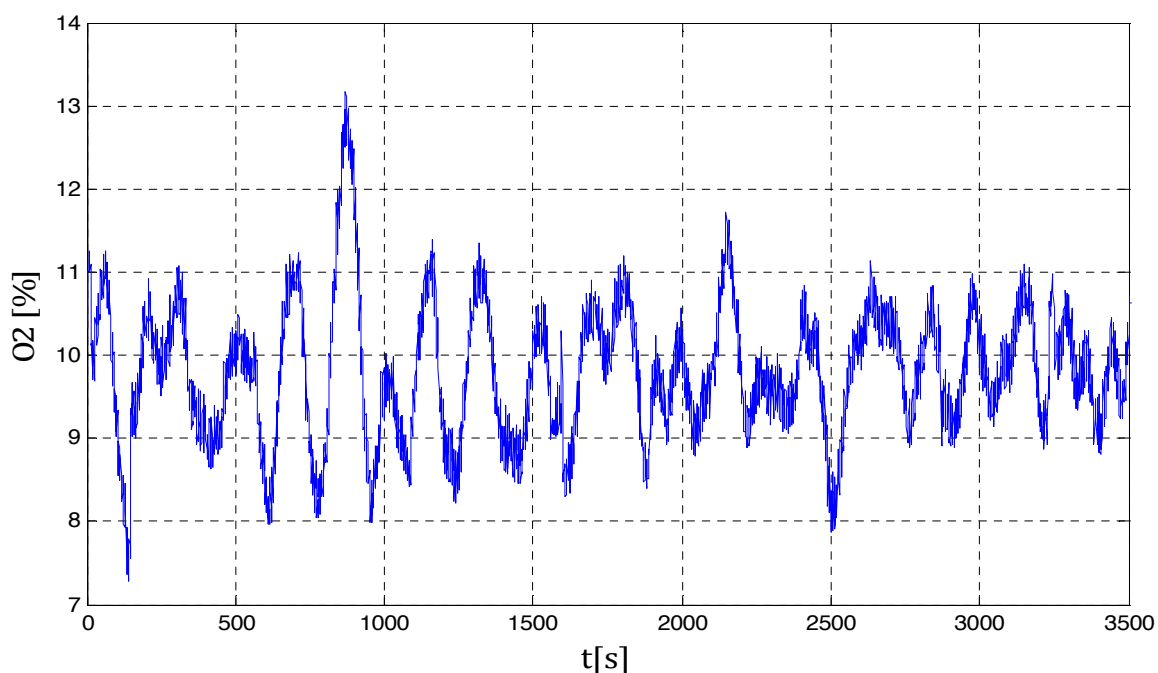
3. Stanowisko badawcze

- przetwornik pomiarowy, generujący wyjściowy, napięciowy sygnał wyjściowy proporcjonalny do wartości prądu pompy,
- interfejs komunikacyjny, umożliwiający wymianę danych z nadrzędnym sterownikiem procesu spalania (w zastosowaniach motoryzacyjnych jest to zwykle port magistrali CAN).



Rys. 3.20. Szerokopasmowa sonda lambda zamocowana w adapterze wraz z układem sterującym i zasilaczem.

W układzie laboratoryjnym wykorzystywano analogowy, napięciowy sygnał wyjściowy z przetwornika pomiarowego, którego wartość zawiera się w zakresie od 0 do 10 V i jest proporcjonalna do stężenia tlenu w badanym gazie. Wartość napięcia podawana jest bezpośrednio na wejście karty pomiarowej i w formie cyfrowej rejestrowana w systemie akwizycji danych.



Rys. 3.21. Przebieg czasowy stężenia tlenu w spalinach podczas pracy kotła z regulatorem fabrycznym.

Zastosowanie szerokopasmowego czujnika tlenu z wyjściem napięciowym, który ponadto charakteryzuje się krótkim czasem odpowiedzi w porównaniu do analizatora gazowego, daje możliwość wykorzystania sygnału stężenia O_2 zarówno do celów identyfikacji, jak i do sterowania procesem spalania.

d) Pomiar prędkości obrotowej wentylatora nadmuchowego

Wentylator nadmuchowy przedstawiony w Podrozdziale 3.1.3. wyposażony jest przez producenta w czujnik prędkości obrotowej, którego działanie oparte jest na zjawisku Halla. Podczas każdego obrotu wirnika silnika sprzężonego z wentylatorem, czujnik hallotronowy poddawany jest działaniu pola magnetycznego wytworzonego przez magnes trwały zamocowany na obwodzie wirnika. Skutkiem tego jest wygenerowanie binarnego sygnału napięciowego, w którym liczba impulsów jest równa liczbie obrotów wentylatora. Poprzez zliczanie liczby impulsów w jednostce czasu, czyli wyznaczając częstotliwość przebiegu, można określić prędkość obrotową wentylatora. Sygnał elektryczny doprowadzane są do wejścia licznikowego *PF10* karty pomiarowej *NI USB-6009* i rejestrowane przez aplikację komputerową. Układ elektroniczny realizujący zasadniczo pomiar prędkości obrotowej wentylatora przedstawiono na Rys. 3.10.

e) Pomiar natężenia światła emitowanego przez płomień

Jak powszechnie wiadomo, płomień towarzyszący spalaniu biomasy emituje promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie widzialnym (światło) i niewidzialnym (promieniowanie cieplne, nadfioletowe). Czujnik wykrywający emisję światła z płomienia służy w standardowym układzie sterowania do przełączenia regulatora z trybu rozpalania do trybu pracy, a ponadto kontroluje obecność płomienia również w trybie podtrzymania. Brak płomienia w czasie innym niż tryb rozpalania powoduje wyłączenie wentylatora i podajnika paliwa i włączenie alarmu dźwiękowego, informującego użytkownika o zaniku procesu spalania. W zmodyfikowanym na potrzeby niniejszej pracy układzie sterowania, czujnik spełnia funkcję dodatkowego wyjścia z kotła, którego sygnał niesie informacje o intensywności przebiegu procesu spalania paliwa. Jako sensor wykorzystano element fotorezystancyjny, którego opór elektryczny maleje wraz ze wzrostem natężenia światła nań padającego. Czujnik zainstalowany jest na zewnątrz palnika tak, że dociera do niego światło emitowane przez płomień. Układ elektroniczny, będący częścią systemu przedstawionego powyżej (Rys. 3.10), konwertuje zmianę rezystancji czujnika na proporcjonalny sygnał napięciowy w zakresie akceptowalnym przez kartę pomiarową 0-10 VDC. Pozwala to na pomiar i archiwizację wartości natężenia światła emitowanego przez płomień, które jest pochodną intensywności spalania paliwa w palniku.

f) Pomiar prędkości i temperatury powietrza w układzie ssącym wentylatora

Powietrze wtłaczane do komory spalania przez wentylator nadmuchowy, zasysane jest przez rurę o średnicy $\varnothing = 100$ mm i długości 1000 mm szczelnie połączoną od strony ssącej z wentylatorem. W rurze zainstalowano teleskopową sondę termiczną *AP471S2*

(grzany drut), o zakresie pomiarowym 0.1...5 m/s, przy temperaturze -25...+80 °C, która podłączona z anemometrem typu *HD2103.2* firmy Delta Ohm, umożliwia pomiar prędkości i temperatury powietrza. Urządzenie ma możliwość rejestrowania danych pomiarowych w wewnętrznej pamięci nieulotnej a dzięki interfejsowi *USB*, możliwość komunikacji z komputerem, gdzie dane są wizualizowane i zapisywane w środowisku *DeltaLog9*. Podstawowe parametry anemometru *HD2103.2* dla pracy z sondą typu przedstawia Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Parametry techniczne anemometru

Anemometr <i>HD2103.2</i>	
Zakres temperatur pracy	-5...50 °C
Okres próbkowania	1 s, 5 s, 10 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, ...
Maksymalna liczba próbek w pamięci	38000
Zakres pomiaru prędkości	0.1...5 m/s
Rozdzielczość pomiaru prędkości	0,01 m/s
Dokładność pomiaru prędkości	±0.15 m/s
Zakres pomiaru temperatury	-25...80 °C
Rozdzielczość pomiaru temperatury	0.1 °C
Dokładność pomiaru temperatury	±0.8 °C

3.3. Układy wykonawcze

Zasadniczo kocioł, jako obiekt układu automatyki posiada dwa wejścia. Pierwsze z nich to układ doprowadzenia paliwa, które stanowi o mocy z jaką pracuje kocioł. Ponieważ jednak do spalania określonej ilości paliwa niezbędny jest dopływ powietrza, za który odpowiada drugie wejście. Coraz częściej, zwłaszcza w kotłach większych mocy, stosuje się rozdzielanie strumienia powietrza, które wtłaczane jest dwoma kanałami w strefę żaru (pierwotne) i w okolice płomienia (wtórne). Ważne jest w tym przypadku prawidłowe wyznaczenie nie tylko sumarycznej ilości powietrza potrzebnego do spalania, ale również odpowiedni stosunek jego podziału. Niniejsza praca, z uwagi na budowę badanego kotła, traktuje tylko o pojedynczym układzie doprowadzenia powietrza do komory spalania. Właściwy dla danej mocy strumień masowy paliwa oraz odpowiednio dopasowany, w celu zapewnienia optymalnego spalania, strumień powietrza wyznaczane są przez układ sterujący pracą kotła i realizowany za pośrednictwem elementów wykonawczych.

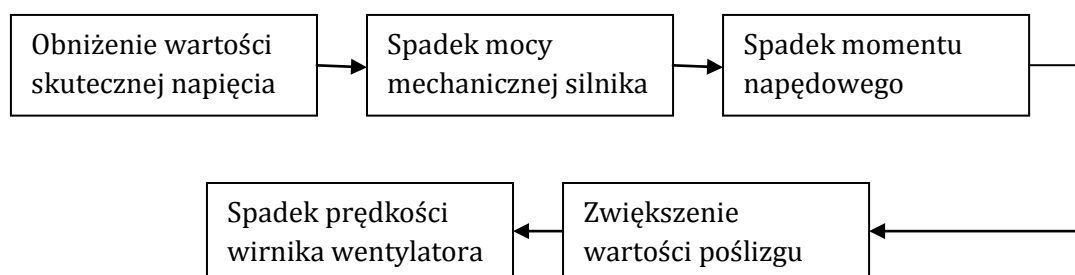
3.3.1. Elektroniczny układ sterowania pracą podajnika paliwa

Strumień masowy paliwa podawanego do palnika regulowany jest dwustanowo poprzez cykliczne załączanie silnika elektrycznego napędzającego przenośnik ślimakowy. Częstotliwość i współczynnik wypełniania sygnału sterującego dobrana została na podstawie obliczeń przedstawionych w Podrozdziale 3.1.2. Przebieg napięcia

o wymaganej dla zadanej mocy częstotliwości i współczynnika wypełnienia generowany jest w środowisku Matlab/Simulink i za pośrednictwem karty sygnałowej NI USB-6009 podawany na wykonawczy układ elektroniczny. Elementem wyjściowym jest przekaźnik elektromagnetyczny bezpośrednio sterujący jednofazowym silnikiem indukcyjnym podajnika. Schemat ideowy regulatora mocy wentylatora nadmuchowego przedstawiono na Rys. 3.11.

3.3.2. Regulator prędkości obrotowej wentylatora

Zarówno wentylatory nadmuchowe, jak i wyciągowe (jeżeli producent przewiduje ich zastosowanie) napędzane są jednofazowymi silnikami indukcyjnymi z kondensatorową fazą pracy. Aby regulować prędkość obrotową silnika z zachowaniem stałego momentu, należałoby zastosować przemiennik częstotliwości. O ile w przypadku silników trójfazowych takie rozwiązania są powszechne, to silniki jednofazowe bardzo rzadko zasilane są za pośrednictwem drogich, trudno dostępnych, jednofazowych przemienników częstotliwości. Dlatego problem regulacji prędkości obrotowej jednofazowych, indukcyjnych silników małej mocy, stosowanych w wentylatorach kotłowych jest rozwiązywany w inny sposób. Sterowniki z tzw. „modulacją” posiadają energoelektroniczny regulator wartości skutecznej napięcia podawanego na zaciski silnika indukcyjnego. O ile taki sposób sterowania pracą klatkowego silnika indukcyjnego nie jest zgodny ze sztuką eksploatacji maszyn elektrycznych, to w przypadku nieskomplikowanych i tanich rozwiązań stosowanych w kotłach daje zadowalające efekty. Idea zmiany prędkości obrotowej wentylatora polega na tym, że przez obniżenie wartości skutecznej napięcia na zaciskach silnika, maleje jego moc i moment napędowy przenoszony na wirnik. Opór powietrza nie jest wtedy kompensowany przez moment napędowy silnika, dlatego moment hamujący działający na łopaty wentylatora powoduje spadek jego prędkości obrotowej. Pole magnetyczne w stojanie silnika będzie pulsować nadal z częstotliwością 50 Hz, jednak wzrośnie poślizg wirnika względem prędkości synchronicznej i jego prędkość obrotowa zmaleje.



Rys. 3.22. Sposób regulacji prędkości obrotowej wentylatora przez zmianę napięcia zasilania.

Zwiększenie prędkości obrotowej wentylatora na charakter dokładnie odwrotny, należy jednak zwrócić uwagę, że kształt, a ściślej rzecz ujmując nachylenie krzywej

dzięki któremu podczas włączenia regulatora do sieci nie występuje na obciążeniu skok napięcia. Dioda *D1* prostuje napięcie zasilające jednopółkowo, natomiast rezystor *R1* ogranicza je do wartości bezpiecznej dla układu scalonego a kondensator *C1* pracuje w układzie filtru. Elementy *R3* i *R5* oraz potencjometr *P1* są dzielnikami napięcia służącymi do zadawania wielkości mocy dostarczonej do obciążenia. Dzięki zastosowaniu rezystora *R2*, bezpośrednio dołączonego do przewodu fazowego, wewnętrzne bloki synchronizacyjne układu scalonego *U1* sterują włączaniem triaka w sposób synchroniczny z przebiegiem napięcia zasilającego. Minimalizuje to w znacznym stopniu zakłócenia radioelektryczne, które powstawałyby podczas impulsowego przełączania dużych indukcyjności, jakimi są uzwojenia silników elektrycznych przy dużych wartościach napięć zasilających. Elementem wykonawczym, regulującym wartość skuteczną napięcia, jest triak *BT138/800* o maksymalnym prądzie 12 A, co daje możliwość sterowania obciążeniem o mocy ok. 2.5 kW. Ponieważ układ regulatora pracuje na potencjale sieci 230 VAC, konieczne jest zastosowanie liniowej separacji galwanicznej, aby zabezpieczyć kartę sygnałową *NI USB-6009*. Układ separatora, który ma za zadanie przenosić sygnał sterujący o wartości 0-5 V, wykonano z wykorzystaniem optoizolatora Texas Instruments *TIL300*. Zawiera on dwie fotodiody przez co zapewnienia liniową charakterystykę przenoszenia. Osiągnięto ją dzięki włączeniu jednej z fotodiod w obwód sprzężenia zwrotnego sterownika diody *LED*, podczas gdy druga służy do sterowania bufora wyjściowego. Zakładając, że obydwie diody są prawie identyczne, sprzężenie zwrotne wyrównuje nieliniowość diody nadawczej i fotodiody. Układ zoptymalizowano dla liniowej charakterystyki przenoszenia.

3.4. Metodyka badań

Serie pomiarowe wykonywane w celu badań nad kotłem peletowym wykonywane były wg określonych założeń, w sposób możliwie zbliżony do wytycznych normy [PNE12]. Paliwo spalane podczas prowadzenia badań pochodziło z jednej partii produkcyjnej i posiadało certyfikat jakości *ENplus* klasy *A1* wg normy PN-EN 14961-2:2011 [PNE11]. Parametry fizykochemiczne reprezentatywnej próbki peletu zostały wyznaczone w Laboratorium Analiz Instrumentalnych w Inżynierii Środowiska i Energetyce (Rozdział 2), a paliwo składowane było w ogrzewanym pomieszczeniu w pobliżu instalacji pomiarowej. Można zatem przyjąć stałe właściwości peletu podczas cyklu badań, których rezultatem jest niniejsza praca. Palnik, komora paleniskowa oraz wymiennik ciepła czyszczono przed każdą serią pomiarową, a mając na uwadze niską zawartość popiołu w paliwie można uznać, że warunki geometryczne przepływu spalin i wymiany ciepła nie były zmienne w czasie prac badawczych. Ciąg kominowy, którego wartość zależy również od warunków zewnętrznych (temperatury, ciśnienia atmosferycznego) był stabilizowany na poziomie 15 Pa za pomocą regulatora ciągu przedstawionego w Podrozdziale 3.2.2. Sterowana elektronicznie pompa obiegowa zapewniała stały przepływ wody grzewczej przez kocioł, a sterownik wraz z zaworem

trójdrożnym utrzymywał stałą wartość temperatury wody na powrocie do kotła. Każdorazowe badanie kotła rozpoczynało przygotowanie sprzętu pomiarowego (analyzer spalin, sonda lambda), którego stabilizacja temperaturowa trwała ok. 60 minut. W tym czasie miało miejsce rozpalanie kotła poprzez zasypanie palnika określoną dawką peletu, załączenie wentylatora nadmuchowego z mocą ok. 20 % i załączenie elektrycznej grzałki wbudowanej w kanał dostarczania powietrza. Po pojawieniu się płomienia, kocioł został wprowadzany w tryb pracy dla mocy znamionowej, podczas którego paliwo było podawane w wyznaczonych ilościach i cyklach. Podczas danej serii pomiarowej prędkość obrotowa wentylatora, a co tym idzie strumień powietrza, była stała dla pomiarów w układzie otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (podczas identyfikacji) lub zmieniana przez regulator podczas testowania algorytmów sterowania. Następowo nagrzewano obieg wodny, aby średnia wartość temperatury wody na wylocie z kotła zawierała się w przedziale od 70 °C do 90 °C według normy [PNE12], przy czym średnia różnica temperatury wody wylotowej i powrotnej powinna zawierać się w przedziale od 10 °C do 25 °C. Jednocześnie pamiętano, aby temperatura wody powrotnej nie była niższa niż 55 °C, gdyż w przeciwnym wypadku może dojść do wystąpienia tzw. punktu rosy, czyli wykroplenia się pary wodnej zawartej w spalinach na ściankach wymiennika ciepła. Nie bez znaczenia jest również temperatura otoczenia panująca w laboratorium, która ma wpływ na stabilność pracy urządzeń pomiarowych (głównie kondycjonera i analizatora spalin), a także jest określona w normie [PNE12]. Stąd spełniony był warunek

$$\frac{T_V + T_R}{2} - T_L \geq 35.0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

gdzie T_V to temperatura wody wylotowej z kotła, T_R jest temperaturą wody powrotnej do kotła, a T_L wartością temperatury otoczenia.

Po osiągnięciu stabilnych warunków pracy instalacji grzewczej rejestrowane były sygnały z określonych punktów pomiarowych (temperatury, ciśnienia, skład chemiczny spalin). Kocioł pracował zasadniczo w dwóch trybach regulacji, wspomnianych powyżej, tzn. w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, gdzie sygnał zadany na układ wentylatora był wyznaczony dla żądanej wartości współczynnika nadmiaru powietrza λ oraz w układzie ze sprzężeniem zwrotnym, gdzie regulator wyliczał sygnał sterujący dla wentylatora. W celu zapewnienia pracy ze stałą mocą cieplną, zbliżoną do mocy znamionowej kotła, strumień paliwa i częstotliwość jego podawania były stałe podczas trwania serii pomiarowej.

3.5. Niepewności pomiarów

Sygnały z czujników wielkości fizycznych, służące do estymacji parametrów modelu kotła, zarejestrowane za pomocą sprzętu pomiarowego jak również metodologia badań wprowadzają niepewność do otrzymanych wyników. Niektóre

składowe układu pomiarowego zostały wykonane przez autora niniejszej pracy na potrzeby eksperymentu, jednak dokonano ich wzorcowania z wykorzystaniem aparatury o dostatecznej dokładności. Stąd określenie niepewności z jakimi mierzone były określone poniżej wielkości fizycznie można jedynie oszacować z uwzględnieniem niedokładności przyrządów pomiarowych. Ponadto, ponieważ sygnały z przetworników były przesyłane do karty pomiarowej z postaci analogowej (napięciowej), to zawierały one pewien poziom szumu.

Na niepewność wprowadzaną przez układy elektroniczne pomiaru temperatury składa się:

- klasa dokładności czujnika termoelektrycznego (termopary)
- dokładność i wzorcowanie przetwornika temperatury
- rozdzielczość karty pomiarowej dla wejścia napięciowego unipolarnego
- liniowość rezystora, na którym powstaje spadek napięcia proporcjonalny do prądowego sygnału pomiarowego (1 %)

Ponadto, wskazania temperatury uzyskiwane za pośrednictwem układu pomiarowego zostały porównane do wartości wskazywanej przez wzorcowany z dokładnością ± 1 °C piec laboratoryjny. Wynik dla temperatury w piecu wzorcowym wynoszącej 600 °C przedstawiono na Rys. 3.17. Błąd wyznaczony w oparciu o eksperyment wynosi 1°C.

Tabela 3.12. Dokładności fabryczne przyrządów pomiarowych.

Przyrząd pomiarowy	Dokładność pomiaru
Ciepłomierz	$E_{Ld} = \pm \left(0.5 + \frac{\Delta T_{min}}{\Delta T} \right) \%$
Przetwornik temperatury	$\leq \pm 1$ °C
Przetwornik ciśnienia	± 3 Pa
Czujnik prędkości obrot. wentylatora	± 1 obr/s
Czujnik prędkości powietrza	± 0.15 m/s
Przetwornik A/C	14.7 mV
Sonda lambda (szacunkowo)	± 0.5 % stężenia O_2 w spalinach w odniesieniu do referencyjnego analizatora
Analizator spalin	
Stężenie CO	4 ppm lub 4 % rel.
Stężenie NO	5 ppm lub 5 % rel.
Stężenie NO ₂	5 ppm lub 5 % rel.
Stężenie SO ₂	5 ppm lub 5 % rel.
Stężenie CO ₂	0.2 % lub 2 % rel.
Stężenie O ₂	0.2 % lub 2 % rel.
Temperatura spalin	2 °C lub 1 % rel.
Temperatura otoczenia	1 °C
Ciąg/podciśnienie	2 Pa lub 5 % rel.
Ciśnienie atmosferyczne	2 Pa lub 5 % rel.

Pomiaru stężenia tlenu resztkowego w spalinach dokonywano za pomocą kalibrowanego gazami wzorcowymi analizatora spalin *PHOTON MADUR* oraz szerokopasmowego czujnika tlenu, tzw. sondy lambda. Wzorcowanie sygnału wyjściowego z sondy oparto o stężenie tlenu w powietrzu atmosferycznym, które wartość przyjęto jako referencyjne 20.95 %. Osiągnięto zgodność pomiaru na poziomie 0.5 % stężenia tlenu w objętości gazów spalinowych w porównaniu do wyników pomiarów dokonanych za pomocą analizatora spalin.

Niepewność wprowadzana przez układ pomiaru podciśnienia statycznego wynosi ± 3 Pa. Przetwornik ciśnienia posiada zaimplementowany układ automatycznego zerowania czujnika, co niweluje wpływ dryftu wartości wyjściowych.

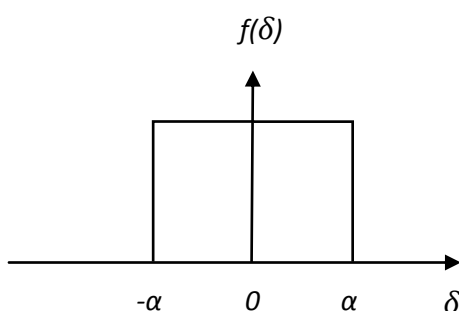
Ponadto karta sygnałowa wyposażona jest w przetworniki analogowo-cyfrowe o określonej rozdzielczości. Wprowadzane są przez to dodatkowe błędy dyskretyzacji sygnału analogowego.

Dokładność przyrządów pomiarowych, deklarowaną przez producentów sprzętu przedstawiono w Tabeli 3.12. Określa ona bezwzględny lub względny (odniesiony do zakresu pomiarowego) błąd, jakim jest obciążony sygnał lub wskazanie przyrządu pomiarowego. Dla elektrycznych mierników wielkości fizycznych zakłada się najbardziej niekorzystny, prostokątny rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia wartości mierzonej w obszarze określonym dokładnością przyrządu [JCG08]. Przebieg funkcji opisany jest równaniem

$$f(\delta) = \begin{cases} \frac{1}{2\alpha}, & \text{dla } -\alpha \leq \delta \leq \alpha \\ 0, & \text{dla pozostałych } \delta \end{cases} \quad (3.6)$$

gdzie α oznacza dokładność przyrządu, zaś δ jest błędem pomiarowym.

Prostokątny rozkład prawdopodobieństwa w funkcji błędu pomiarowego δ przedstawiono na Rys. 3.24.



Rys. 3.24. Rozkład prawdopodobieństwa znalezienia wartości mierzonej w przedziale określonym dokładnością elektronicznego przyrządu pomiarowego.

Wychodząc z powyższej przedstawionego kształtu rozkładu prawdopodobieństwa, można wyznaczyć niepewność pomiaru z wykorzystaniem elektronicznych przyrządów pomiarowych wielkości fizycznych.

Wariancję błędu określa się zależnością

$$\text{var}(\delta) = \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{1}{2\alpha} \delta^2 d\delta = \frac{1}{2\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} \delta^2 d\delta = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} \delta^2 d\delta = \frac{1}{\alpha} \frac{\alpha^3}{3} = \frac{\alpha^2}{3} \quad (3.7)$$

Ponieważ niepewność (odchylenie standardowe) jest wyliczana jako pierwiastek kwadratowy z wariancji, to

$$\text{std}(\delta) = w = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$

Aby właściwie przedstawić wynik pomiaru wielkości fizycznej należy zastosować tzw. niepewność rozszerzoną, wyrażoną równaniem

$$W = kw \quad (3.9)$$

gdzie k - współczynnik, który jeśli nie jest określony dla danego przyrządu, to jego wartość należy przyjąć jako 2.

Jednakże na niepewność pomiaru wielkości fizycznych rejestrowanych w opisanym układzie pomiarowym składają się nie tylko dokładności przyrządów, przetworników i karty pomiarowej, ale również inne niemierzalne zakłócenia i fluktuacje wartości wielkości mierzonej. Dlatego też należy mieć na uwadze, że wynik pomiaru obarczony jest błędami o charakterze przypadkowym, wynikającymi m.in. z przebiegu procesu spalania a więc niestacjonarnością (w pewnym przedziale) zmiennych procesowych, kinematyką gazów spalinowych, zakłóceniami i nieliniowościami w torze pomiarowym. Specyfika zjawiska, jakim jest spalanie paliw stałych, a także możliwości techniczne wykonywania pomiarów wielkości fizycznych opisujących proces w eksploatowanym kotle sprawia, że każda seria pomiarowa, dokonana w umownie ustalonym stanie pracy kotła jest obciążona niepewnością, której źródłem jest zarówno układ pomiarowy jak i charakter procesu. Poniższa tabela zawiera niepewności rozszerzone, wyznaczone na podstawie pięciu serii pomiarowych dla każdego z torów pomiarowych wykorzystywanych na stanowisku badawczym. Każda z serii zawiera kilkaset punktów pomiarowych, rejestrowanych z czasem próbkowania $t=0.2$ sekundy. Obliczeń dokonano w oparciu o tzw. metodę typu „A” wyznaczania niepewności, która pozwala określić przedział, w którym znajduje się wartość rzeczywista wielkości mierzonej. Niepewność pomiaru, będąca odchyleniem standardowym ze zbioru wyników, wyznaczono z równania

$$w = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.10)$$

gdzie n to liczba próbek, \bar{x} - wartość średnia, x_i - kolejna próbka.

Tabela 3.13. Niepewności poszczególnych torów pomiarowych.

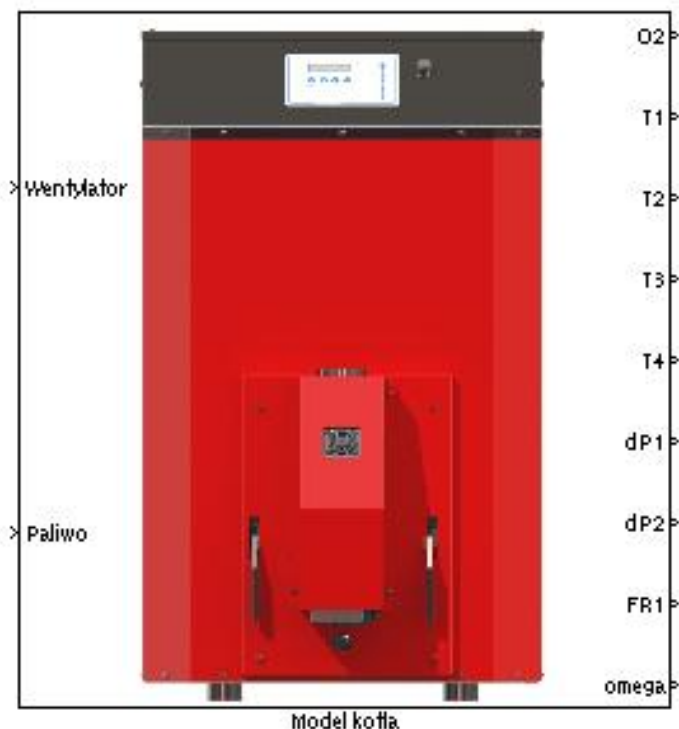
Sygnał	Niepewność pomiaru						Niepewność rozszerzona
	Seria 1	Seria 2	Seria 3	Seria 4	Seria 5	Wartość średnia	
Podciśnienie $dP1$	0.71	0.68	0.42	1.25	1.25	0.86	1.72
Podciśnienie $dP2$	1.76	1.20	1.35	1.63	1.52	1.49	2.98
Temperatura $T1$	16.21	6.83	12.45	12.94	7.18	11.12	22.24
Temperatura $T2$	4.72	6.80	10.26	6.32	5.86	6.97	13.94
Temperatura $T3$	28.75	42.76	45.78	33.27	29.42	35.99	71.98
Temperatura $T4$	8.41	12.20	17.83	12.10	9.37	11.98	23.96
Stężenie tlenu λ	0.63	0.81	1.01	0.84	0.62	0.78	1.56
Natężenie światła $FR1$	0.71	0.68	0.42	1.25	1.25	0.90	1.80

Analizując wyniki niepewności poszczególnych torów pomiarowych przedstawionych w Tabeli 3.13 można stwierdzić, że dane pomiarowe rejestrowane w celach identyfikacji, a później sterowania obiektem obciążone niedużym (względnie) błędem pomiarowym. Istotnym wynikiem jest stałość niepewności pomiarów w różnych seriach pomiarowych, co pozwala określić badania jako powtarzalne.

3.6. Środowisko programistyczne stanowiska badawczego

System pomiarowo-sterujący oprócz sprzętu elektronicznego, składa się również z warstwy programowej, opartej na środowisku Matlab/Simulink w wersji R2011a, pracującej na jednostce obliczeniowej klasy *PC*. Jest to zaawansowany programistycznie pakiet umożliwiający m.in. obliczenia numeryczne, analizę danych, symulację czy rozwijanie algorytmów zarówno w obszarze naukowym jak i inżynierskim. Interfejs wejściowy stanowi karta sygnałowa National Instruments *USB-6009*, która jest w pełni wspierana przez oprogramowanie Matlab/Simulink po zainstalowaniu dedykowanych sterowników. Aplikacja utworzona jako model platformy Simulink umożliwia rejestrację i archiwizację danych pomiarowych oraz wyliczanie na ich podstawie sygnałów sterujących w czasie rzeczywistym. Wyznaczone dane z pamięci komputera zostają zamienione do postaci sygnałów napięciowych za pośrednictwem karty sygnałowej *NI USB-6009* i podawane na wejście elektronicznych układów wykonawczych sterujących pracą kotła.

Tor pomiarowo-sterujący przedstawiony Rys. 3.12. zawiera w swej strukturze urządzenia wykonawcze i pomiarowe, interfejs łączący część sprzętową z programową, oraz aplikację w środowisku obliczeniowym Matlab/Simulink. Układ ten, od strony sprzętowej został opisany w Podrozdziale 3.2. Poniżej przedstawiono ideę archiwizacji danych i obliczania sygnałów sterujących w środowisku programistycznym Matlab/Simulink. Badany obiekt został zaimplementowany na platformie symulacyjnej Simulink jako system z dwoma wejściami i dziewięcioma wyjściami.



Rys. 3.24. Model kotła w środowisku Matlab/Simulink.

Do wejść połączonych z układem podajnika peletu i wentylatorem, doprowadzone są sygnały sterujące strumieniem paliwa i powietrza, natomiast na wyjściach, połączonych z przetwornikami pomiarowymi wielkości fizycznych, dostępne są sygnały informujące o procesie spalania. Na wyjściu wyszczególniono dziewięć mierzonych wielkości fizycznych. Na wyjściach kotła dostępne są wyskalowane oraz próbkowane z okresem 0.2 sekundy sygnały z czujników. Szczegółowy opis sygnałów wyjściowych z kotła przedstawiono w Podrozdziale 3.2.3. Na wejście kotła podawany jest sygnał z regulatora sterujący mocą wentylatora oraz prostokątny przebieg sterujący podajnikiem paliwa (strumień masowy paliwa jest stały w czasie trwania badań). Sposób sterowania elementami wykonawczymi za pośrednictwem sygnałów generowanych w środowisku Matlab/Simulink opisano w Podrozdziale 3.3.

Realizacja pomiarów odbywa się w środowisku Matlab/Simulink. Dane pomiarowe mogą być rejestrowane w przestrzeni roboczej środowiska Matlab i tam poddawane analizie. W ten sposób możliwe jest wykorzystanie ich w procesie modelowania procesu spalania w kotle, w różnych stanach pracy. Zadanie to zostanie przeprowadzone w kolejnym, 4 Rozdziale pracy. W Rozdziale 5 opracowane stanowisko zostanie wykorzystane do sterowania w czasie rzeczywistym pracą kotła na podstawie pomiarów realizowanych *on-line*. Należy zaznaczyć, że sterowanie w pętli zamkniętej będzie się odbywało wyłącznie w układzie podawania powietrza, który jest głównym sygnałem wpływającym na efektywność spalania. Drugi sygnał sterujący to wartość zadana układu podawania paliwa, który jest odpowiedzialny za regulację mocy kotła. Wartość tego sygnału określa współczynnik wypełnienia sygnału prostokątnego regulującego załączenie/wyłączenie układów wykonawczych podających pelet do kotła.

Ponieważ w ramach pracy zakłada się że kocioł pracuje na mocy nominalnej, wartość tego sygnału jest stała.

Ponieważ analogowy sygnał wyjściowy z sondy lambda jest w sposób bezpośredni wykorzystywany w pętli regulacji układu rzeczywistego i cechuje go duża, wysokoczęstotliwościowa składowa stochastyczna, toteż musiał zostać poddany filtrowaniu w zakresie wysokich częstotliwości. Do tego celu zaimplementowano filtr dolnoprzepustowy dostępny w pakiecie Simulink pod nazwą *Lowpass Filter*. Najważniejsze parametry zastosowanego filtra dobrano metodą eksperymentalną:

- a) odpowiedź impulsowa filtru: IIR (nieskończona odpowiedź impulsowa),
- b) częstotliwość przepustowa (znormalizowana): 0.02,
- c) częstotliwość zaporowa (znormalizowana): 0.98,
- d) tłumienie przepustowe [dB]: 1,
- e) tłumienie zaporowe [dB]: 60,
- f) algorytm filtracji: inwersyjny filtr Czebyszewa.

3.7. Podsumowanie

Jak przedstawiono w powyższym rozdziale, stanowisko badawcze łączy w sobie wyspecjalizowany sprzęt pomiarowy wysokiej klasy, jak analizator spalin, licznik energii cieplnej, czujnik tlenu z przetwornikiem, z urządzeniami instalacji grzewczej, kominowej oraz elementami układu wykonanymi przez autora na potrzeby eksperymentu. Całość tworzy kompleksowy i elastyczny układ badawczy, umożliwiający badanie kotłów opalanych również innymi rodzajami biomasy, a nawet paliwami stałymi innego pochodzenia. Rejestrowanie zmiennych procesowych, jak również sterowanie pracą kotła odbywa się centralnie z wykorzystaniem komputera, karty sygnałowej i środowiska Matlab/Simulink. Opisany układ spełniał wymagania stawiane przez proces identyfikacji oraz zapewniał możliwość sterowania w oparciu o sygnały generowane programowo w środowisku programistycznym. Dzięki zastosowanym urządzeniom i budowie instalacji możliwa była praca przy stałej mocy kotła, w warunkach zgodnych z normą PN-EN 303-05:2012. Pozwala to stwierdzić, że wyniki otrzymane w ramach niniejszej pracy są wiarygodne i dobrze opisują rzeczywiste procesy zachodzące w badanym obiekcie.

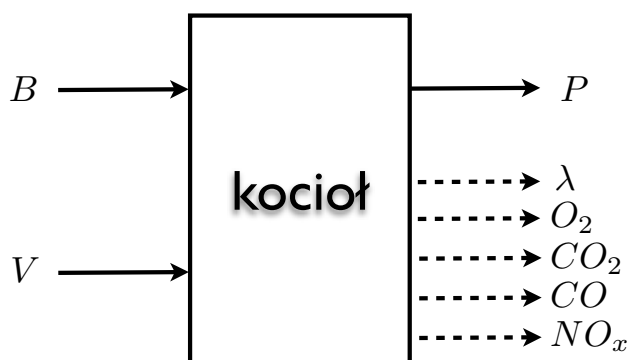
4. Modelowanie procesu spalania w kotle peletowym dla celów sterowania

Podstawowym elementem związanym z projektowaniem nowoczesnych układów sterowania jest budowa matematycznego modelu regulowanego procesu. Należy zaznaczyć, że zasadniczo wszystkie współczesne algorytmy sterowania opierają się na wykorzystaniu modelu zdefiniowanego w dziedzinie czasu, który jest wykorzystywany w zadaniu predykcji przyszłych stanów procesu. Ponadto, omawiany model jest zwykle wykorzystywany *on-line* i dokonuje predykcji przyszłych stanów obiektu w każdym kroku pracy algorytmu sterowania. Dlatego jego złożoność obliczeniowa musi być na tyle niska, aby dawać możliwość wykonania wszystkich czynności związanych z wyznaczeniem wartości sterowania w czasie mniejszym niż czas próbkowania sygnałów.

W ramach niniejszego rozdziału w pierwszej kolejności zostanie wyznaczony matematyczny model procesu spalania peletu w kotle grzewczym, który w przeważającej części będzie oparty na równaniach fizykochemicznych zachodzących w systemie. Model ten będzie się składał z czterech podsystemów opisujących poszczególne elementy kotła. Następnie model ten zostanie sprowadzony do efektywnych w zadaniu sterowania, nieliniowych modeli blokowo-zorientowanych (modeli Hammersteina i Wienera). Ponadto w rozdziale zostaną poddane analizie inne ewentualne metody wyznaczania stężenia tlenu w spalinach, z zastosowaniem alternatywnych sygnałów pomiarowych.

4.1. Spalanie w kotle peletowym jako proces sterowania

Schemat blokowy kotła, wraz z sygnałami wejściowymi i wyjściowymi został przedstawiony na Rys. 4.1.



Rys. 4.1. Sygnały wejściowe i wyjściowe kotła.

Szczegółowy opis kotła wraz z zastosowanymi układami pomiarowymi został szczegółowo przedstawiony w Rozdziale 3. Z punktu widzenia sterowania układ ten umożliwia regulację dwoma sygnałami wejściowymi: 1) strumieniem masowym paliwa

dostarczanego do kotła B oraz 2) strumieniem objętościowym powietrza dostarczanego do komory spalania V . Z drugiej strony kocioł posiada wyjście określające odpowiednio jego moc P oraz całą paletę sygnałów wyjściowych określających efektywność spalania (tj. λ , O_2 , CO_2 , CO , NO_x).

W przypadku strumienia masowego paliwa, regulacja odbywa się poprzez określenie współczynnika wypełnienia włączania/wyłączenia podajnika paliwa do kotła (szczegółowy opis regulacji pracą podajnika został przedstawiony w Rozdziale 3). Wartość ta jest w istocie sterowaniem mocą urządzenia, która ostatecznie rzutować będzie na temperaturę wody wychodzącej z kotła do układu grzewczego. Wartość zadana tej temperatury jest parametrem jakościowym głównego układu regulacji. Duża inercja układów grzewczych, która wynika ze znacznej ilości cieczy w instalacji w połączeniu z wolnozmiennym charakterem zjawisk wymiany ciepła między układem grzewczym a otoczeniem sprawia, że regulacja mocą kotła nie wymaga stosowania zaawansowanych układów sterowania. Zwykle sterowanie temperaturą w obiegu odbywa się w oparciu o regulację dwustanową, która przełącza kocioł między stanem podtrzymania, a stanem mocy nominalnej. Takie rozwiązanie jest zupełnie wystarczające z punktu widzenia stabilizacji temperatury, a dzięki temu należy optymalizować parametry spalania wyłącznie w dwóch stanach pracy. Problem sterowania mocą jest zadaniem rozwiązany we współczesnych, seryjnie produkowanych kotłach małej mocy i dlatego nie ma potrzeby rozpatrywania tego zagadnienia w pracy.

Wyznaczenie objętościowego strumienia powietrza odbywa się na podstawie określenia wartości zadanej napięcia zasilającego silnik wentylatora. Na układ wykonawczy podawana jest wartość względna sygnału (0-5), który określa właściwą wartość napięcia podawaną na silnik (0-230 V). Szczegółowy opis omawianego układu znajduje się w Rozdziale 3. Strumień powietrza jest kluczowym parametrem wpływającym na efektywność procesu spalania. Musi on być nie tylko dostosowany do ilości paliwa dostarczanego do kotła (ilość wynikająca z równań stechiometrycznych procesu – patrz Rozdział 2), ale również musi uwzględniać szereg dodatkowych zakłóceń występujących w układzie tj. zmiany ciągu kominowego, fluktuacje procesu spalania i inne. Utrzymywanie na poziomie optymalnym tego sygnału gwarantuje minimalne wartości emisji szkodliwych składników spalin tj. tlenku węgla CO , tlenku azotu NO_x . Ponadto procesy spalania zachodzące w kotle są relatywnie szybkie i cechują się bardzo silną składową stochastyczną. Dodatkowo w kotłach grzewczych występują istotne utrudnienia z dostępnością sygnałów pomiarowych podyktowane ograniczeniami technologicznymi. Dlatego stabilizacja procesu spalania w pobliżu wartości optymalnych jest bardzo trudna. Z punktu widzenia niniejszej pracy sygnał ten jest kluczowym wejściem rozpatrywanego procesu.

Podstawowym sygnałem wyjściowym z kotła jest jego moc, wyznaczana najczęściej na podstawie różnicy temperatur na zasilaniu i powrocie kotła, przy uwzględnieniu strumienia masowego cieczy. Moc cieplna jest liniową funkcją ilości paliwa dodawanego do kotła i jego wartości opałowej. Wielkość ta jest pozbawiona

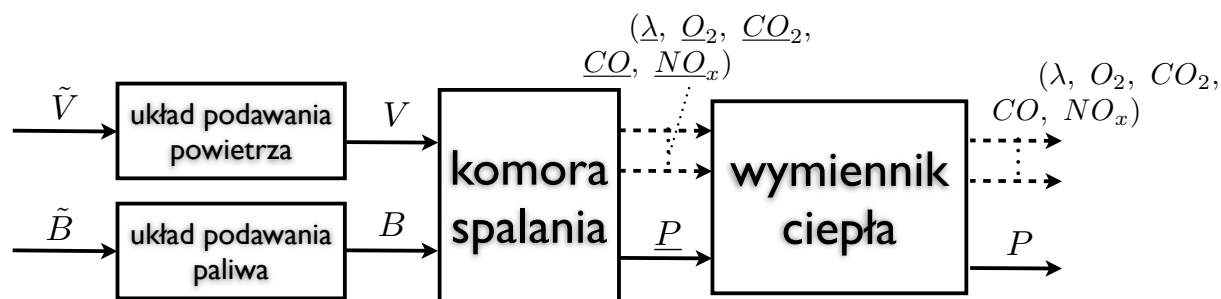
znaczących zakłóceń. Jak zostało to wyżej przedstawione, do jej regulacji wystarczy regulator dwustanowy.

Znacznie trudniej przedstawiać sygnały wyjściowe z kotła określające przebieg procesu spalania. W układzie pomiarowym mierzony jest cały szereg, często powiązanych ze sobą sygnałów określających parametry procesu spalania tj. λ , O_2 , CO_2 , CO , NO_x . W Rozdziale 2 pokazano, że kluczową wielkością opisującą parametry spalania jest współczynnik nadmiaru powietrza λ i związane z nim stężenie tlenu w spalinach O_2 (tzw. tlen nadmiarowy). Jest to wielkość rzutująca na wszystkie produkty spalania, tj. CO_2 , CO , NO_x . Jednakże w niniejszym rozdziale będzie przedstawiona analiza również innych potencjalnych rozwiązań, które pozwalają na pośrednie szacowanie wartości O_2 .

Należy zauważyć, że w kotle można wyszczególnić kilka podstawowych elementów realizujących poszczególne etapy procesu i dlatego może on być rozpatrywany jako system o złożonej strukturze. Takie podejście rozważane będzie w następnym podrozdziale niniejszej pracy.

4.2. Modelowanie kotła jako układu o złożonej strukturze

Szczegółowy opis technologiczny kotła wraz z punktami pomiarowymi został przedstawiony w Rozdziale 3. Schemat blokowy kotła, jako systemu o złożonej strukturze został przedstawiony na Rys. 4.2.



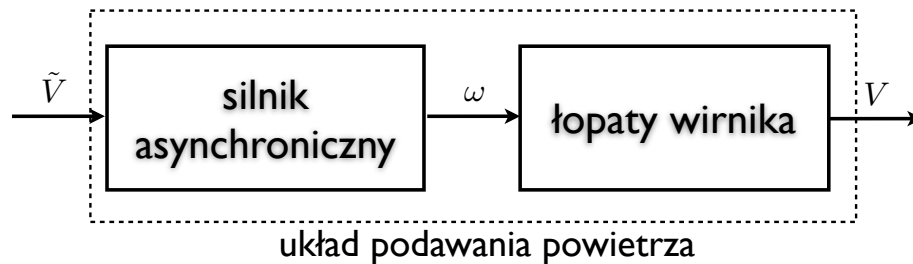
Rys. 4.2. Schemat blokowy kotła, jako systemu o złożonej strukturze.

Na Rys. 4.2 pokazano, że w kotle można wyszczególnić cztery główne podsystemy, którymi są układy przygotowania powietrza i paliwa, komora spalania oraz wymiennik ciepła. Proces modelowania poszczególnych podsystemów zostanie przedstawiony w kolejnych podrozdziałach.

4.2.1. Modelowanie układu podawania powietrza

Układ podawania powietrza stanowi wentylator nadmuchowy napędzany jednofazowym silnikiem klatkowym. Wielkością wejściową układu jest wartość względna napięcia podawanego na silnik (0-5), natomiast jego wyjściem jest przepływ objętościowy powietrza podawanego do kotła. Dynamika oraz nieliniowość tego

systemu mają znaczący wpływ na własności dynamiczne kotła. Układ ten składa się z dwóch połączonych kaskadowo elementów stanowiących silnik asynchroniczny i łopaty wirnika. Zostało to przedstawione na Rys. 4.3.



Rys. 4.3. Schemat blokowy układu podawania powietrza.

Na Rys. 4.3 można zobaczyć, że wejściem układu jest sygnał \tilde{V} , który określa wartość napięcia skutecznego podawanego na silnik U_{sh} . Napięcie to jest proporcjonalne do \tilde{V} i wynosi

$$U_{sh} = k_{sh} \tilde{V} = 46\tilde{V} \quad (4.1)$$

Jak zostało to przedstawione w Rozdziale 3, sterowanie prędkością obrotową silnika wentylatora podającego powietrze realizowane jest zwykle w oparciu o regulację mocy przy stałej częstotliwości. W ramach bieżącej pracy zupełnie wystarczające jest zastosowanie uproszczonego modelu silnika, w którym wartość rzeczywistą momentu napędowego wyznacza się z charakterystyki mechanicznej określanej przez producenta

$$M_n = f(\omega) \quad (4.2)$$

gdzie ω oznacza prędkość obrotową silnika, M_n oznacza moment znamionowy, a $f(\cdot)$ charakterystykę mechaniczną (tzw. charakterystyka momentu). W/w charakterystyka podawana jest zwykle dla wartości znamionowej napięcia silnika. Regulacja prędkością obrotową silnikiem w rozpatrywanym przypadku realizowana jest poprzez zmiany wartości skutecznego podawanego napięcia. Skutkuje to zmianą momentu napędowego i poślizgu, a co za tym idzie – zmianą prędkości obrotowej. Moment napędowy dla napięcia innego niż znamionowe wyznacza się następująco

$$M = k_m U_{sh}^2 M_n = k_m U_{sh}^2 f(\omega) \quad (4.3)$$

gdzie k_m – jest dobieranym eksperymentalnie parametrem silnika. Z drugiej strony należy zauważyć, że moment hamujący wentylatora powstaje na skutek oporów wywołanych przez łopaty wentylatora i łożyska silnika. Łopaty wirnika wentylatora pracują w układzie aerodynamicznym, gdzie opór jest proporcjonalny do kwadratu prędkości obrotowej wirnika, natomiast tarcie wywołane przez łożyska silnika jest

proporcjonalne do prędkości obrotowej. Zatem w uproszczeniu moment hamujący można wyznaczyć z zależności

$$M_h = k_w \sigma \omega^2 + k_l \omega \quad (4.4)$$

gdzie k_w jest stałą łopat, σ jest gęstością powietrza, a k_l jest współczynnikiem oporu łożysk. Ostatecznie równanie silnika wentylatora można przedstawić w następujący sposób

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (k_m k_{sh}^2 \tilde{V}^2 f(\omega) - k_w \sigma \omega^2 - k_l \omega) \quad (4.5)$$

gdzie J jest bezwładnością wału. Należy zaznaczyć, że współczynniki k_w , k_l , k_m , J muszą zostać wyznaczone eksperymentalnie metodą strojenia parametrów. W tym celu przeprowadzono eksperyment symulacyjny, w którym optymalizowano średniokwadratową funkcję strat

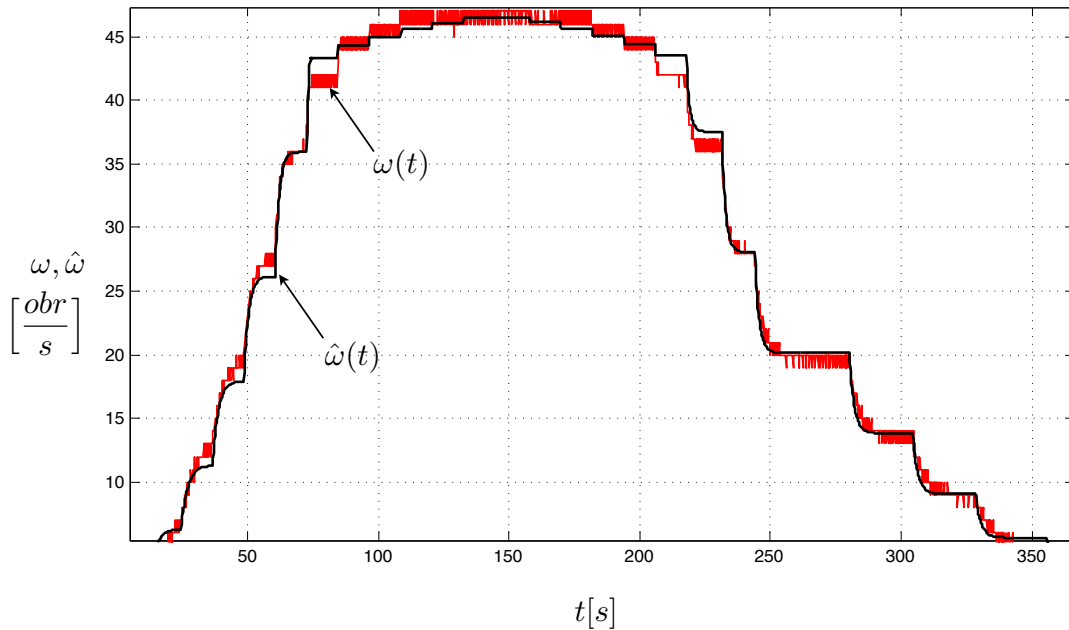
$$[\hat{k}_w, \hat{k}_l, \hat{k}_m, \hat{J}] = \arg \min_{[k_w, k_l, k_m, J]} \left(\frac{1}{Nh} \sum_{k=1}^N (\hat{\omega}(hk) - \omega(hk))^2 \right) \quad (4.6)$$

gdzie \hat{k}_w , \hat{k}_l , \hat{k}_m , \hat{J} są estymatorami parametrów odpowiednio k_w , k_l , k_m , J , wartość N jest liczbą próbek pobraną w trakcie eksperymentu, h oznacza czas próbkowania, a $\hat{\omega}(hk)$ jest wyjściem modelu silnika (estymowana prędkość obrotowa). Metoda odczytu prędkości obrotowej silnika wentylatora została przedstawiona w Rozdziale 3. Mierzony sygnał $\omega(hk)$ został zdefiniowany jako liczba obrotów na sekundę (obr/s). W wyniku optymalizacji otrzymano parametry modelu, które zostały zestawione w Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Parametry modelu silnika wentylatora.

k_w	k_l	k_m	J
8.23103584630	0.384549877672	0.0184080738452	3.65534195831

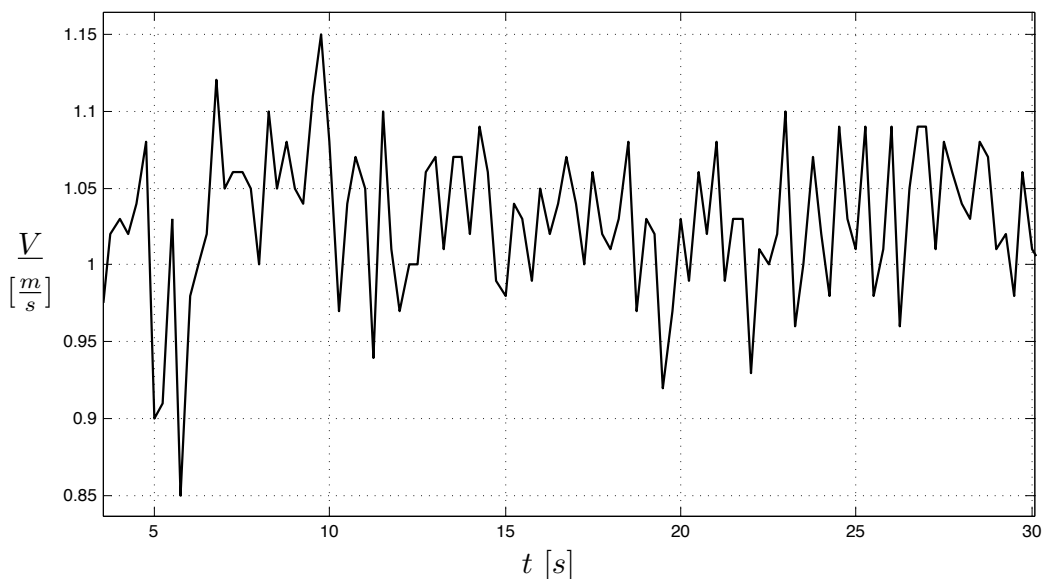
Wybrane przebiegi czasowe modelowanej i rzeczywistej prędkości obrotowej zostały przedstawione na Rys. 4.3.



Rys. 4.3. Modelowane (kolor czarny) i zmierzone (kolor czerwony) przebiegi czasowe prędkości obrotowej wentylatora.

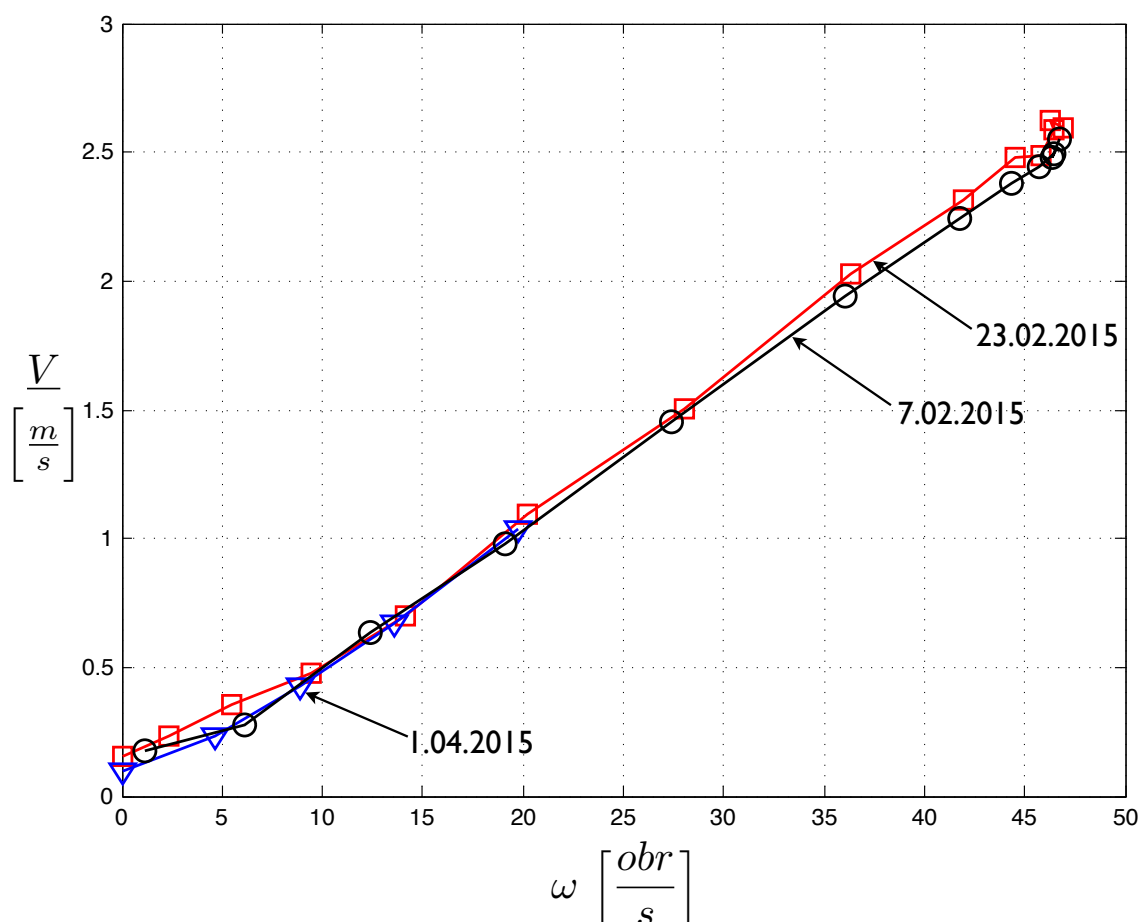
Jak widać z Rys. 4.3 model silnika zasadniczo dobrze opisuje jego prędkość obrotową, zarówno w kontekście wartości ustalonej, jak również własności dynamicznych, które cechują się inną dynamiką przy wzroście i spadku prędkości obrotowej.

Drugim elementem występującym w układzie podawania powietrza są łopaty wentylatora zamieniające obroty wirnika w liniowy ruch powietrza podawanego do kotła. Badania pokazały, że dynamika tego układu jest pomijalna w porównaniu do własności dynamicznych silnika, w związku z czym proces ten można opisać zależnością statyczną. Szczegółowy opis wentylatora wraz z układem pomiarowym przepływu powietrza został zawarty w Rozdziale 3. Fragment przebiegu czasowego prędkości powietrza dla stałej wartości prędkości obrotowej został przedstawiony na Rys. 4.4.



Rys. 4.4. Przebieg czasowy prędkości powietrza w układzie podawania powietrza.

Można zauważyć z Rys. 4.4, że prędkość przepływu \underline{V} posiada silną składową stochastyczną, która powodowana jest zmianami ciśnienia w kotle i innymi niemierzalnymi zakłóceniami. Dlatego w celu poprawnego wyznaczenia funkcji $\hat{V} = \hat{f}(\omega)$ konieczne jest uśrednianie pomiarów prędkości przepływu powietrza z dłuższych okresów czasu. Ostatecznie w wyniku kilku serii pomiarowych wyznaczono charakterystykę, która została przedstawiona na Rys. 4.5.



Rys. 4.5. Charakterystyka prędkości przepływu powietrza w funkcji prędkości obrotowej.

Na Rys. 4.5 przedstawiono charakterystyki zmian prędkości przepływu powietrza w funkcji obrotów wyznaczone na podstawie serii pomiarowych wykonanych w dniach: 7.02.2015, 23.02.2015 i 1.04.2015, które przeprowadzone były podczas różnych warunków atmosferycznych. Niezależnie od tego, na Rys. 4.5 można zauważyć, że otrzymane charakterystyki są bardzo do siebie zbliżone. Dzięki temu można wnioskować, że charakterystyka układu (w odniesieniu do wartości średnich) w nieznacznym stopniu zależy od warunków zewnętrznych. Ponadto, poza niewielkim obszarem w okolicy bardzo niskich prędkości obrotowych, wyznaczona charakterystyka jest liniowa. Biorąc pod uwagę, że w normalnej eksploatacji kotła nie stosuje się

praktycznie obrotów silnika $\omega < 10$ obr/s można tą zależność opisać równaniem liniowym

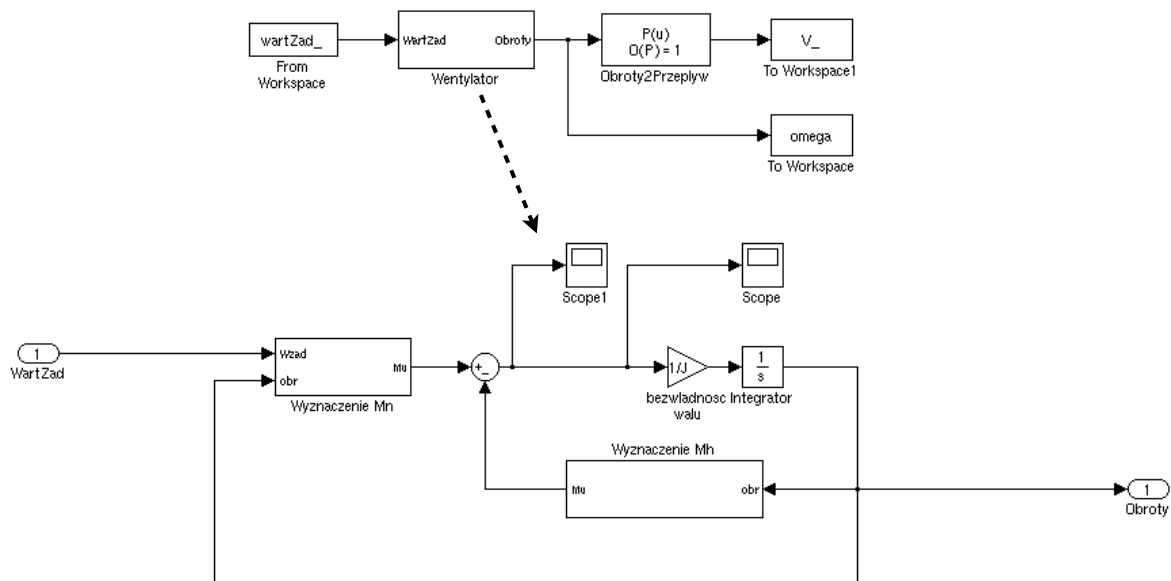
$$\hat{V} = 0.0535428\omega + 0.00385929 \quad (4.7)$$

Należy zaznaczyć, że układ pomiarowy realizuje pomiar prędkości liniowej w przewodzie układu podawania powietrza, zamiast przepływu objętościowego (taką wielkość opisuje charakterystyka prezentowana w równaniu (4.7)). Jednakże, można ją przekształcić na przepływ objętościowy powietrza

$$V = \frac{\pi\phi^2}{4} \underline{V} = 0.0025\pi \underline{V} \quad (4.8)$$

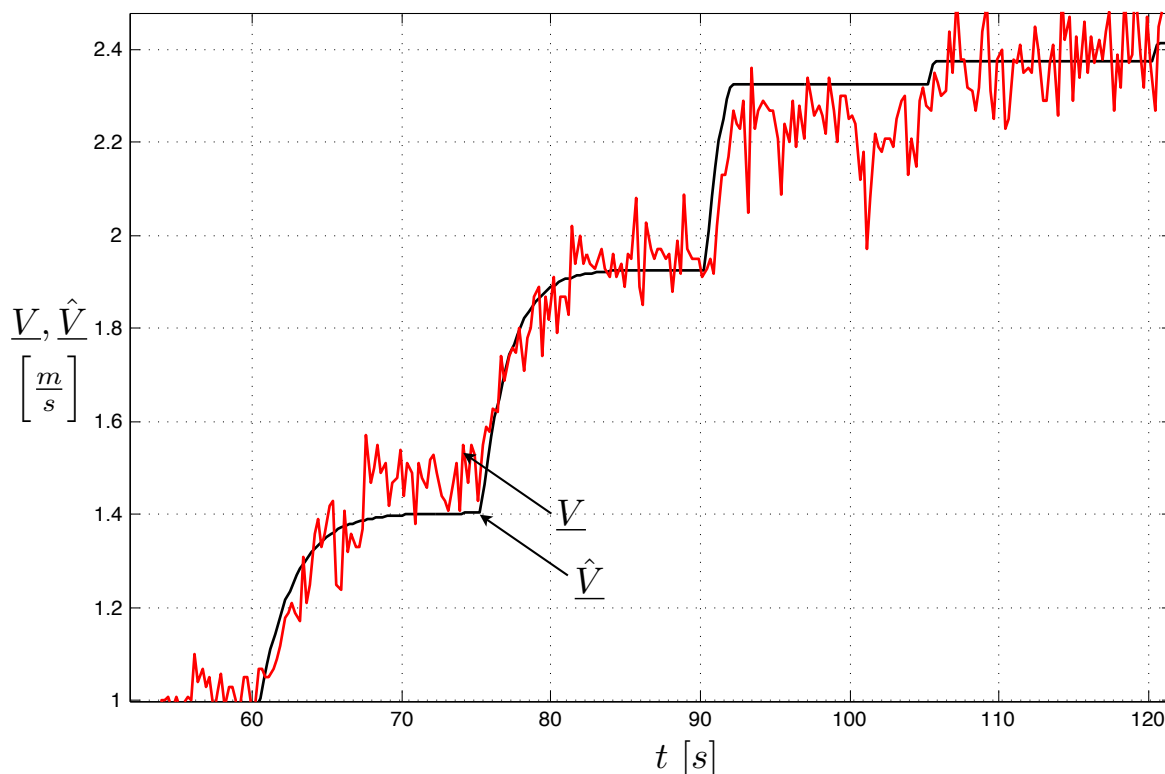
gdzie $\phi=100$ mm oznacza średnicę przewodu.

Model zaimplementowano w środowisku Matlab/Simulink, gdzie układ ten będzie stanowił podsystem pełnego modelu kotła. Zrzut ekranu ze schematem blokowym modelu w środowisku Matlab/Simulink został przedstawiony na Rys. 4.6.



Rys. 4.6. Schemat blokowy układu podawania paliwa w środowisku Matlab/Simulink

Przykładowe fragmenty przebiegów czasowych rzeczywistej prędkości przepływu powietrza \underline{V} oraz modelowanej \hat{V} zestawiono na Rys. 4.7.



Rys. 4.7. Przebiegi czasowe modelowanego i rzeczywistego przepływu powietrza w układzie podawania powietrza.

4.2.2. Modelowanie układu podawania paliwa

Układ podawania paliwa został szczegółowo opisany w Rozdziale 3. Należy przypomnieć, że regulacja podajnikiem odbywa się na zasadzie regulacji dwustanowej z zastosowaniem przebiegu prostokątnego. W Rozdziale 3 pokazano, że dla rozpatrywanego układu podawania paliwa oraz gęstości nasypowej peletu maksymalny strumień paliwa wynosi $B_{max}=3.33$ g/s (12 kg/h). Wyliczenia oparte na zależnościach przedstawionych w Rozdziale 3 pokazują, że strumień masowy paliwa dla nominalnej mocy kotła (16 kW) wynosi $B_n=0.953$ g/s. W związku z powyższym współczynnik wypełnienia prostokątnego sygnału sterującego podajnikiem wynosi

$$\tilde{B}_n = \frac{B_n}{B_{max}} = 0.2859 \quad (4.9)$$

Częstotliwość sygnału sterującego również wpływa na efektywną pracę kotła. Zbyt niska wartość, rzutująca na długie okresy podawania paliwa i przerw, zaburza proces spalania, co negatywnie wpływa na jego sprawność i emisję szkodliwych substancji. Badania doświadczalne realizowane na kotle wskazują, że częstotliwości powyżej $f_p=1/10$ Hz, nie wprowadzają zauważalnych zaburzeń procesu spalania. Dlatego w pracy

założono częstotliwość sterowania układem $f_p=1/7$ Hz. Wówczas dla mocy nominalnej czas załączenia (τ_1) i wyłączenia (τ_0) podajnika wynosi odpowiednio $\tau_1=2$ s i $\tau_0=5$ s.

Zakładając dla uproszczenia, że straty kotła są proporcjonalne do jego mocy można wyznaczyć zarówno współczynnik wypełnienia dla układu podawania paliwa \tilde{B}_n jak również czasy τ_1 i τ_0 dla zadanej mocy kotła

$$\tilde{B} = \frac{B_n}{P_n B_{\max}} P \approx 0.01787P \quad (4.11)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{f_p} \tilde{B} = \frac{B_n}{f_p P_n B_{\max}} P \quad (4.12)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{f_p} - \tau_1 = \frac{1}{f_p} \left(1 - \frac{B_n}{P_n B_{\max}} P \right) \quad (4.13)$$

Należy jednak zaznaczyć, że przedstawione powyżej zależności nie będą wykorzystywane w pracy, ponieważ zgodnie z przyjętym założeniem kocioł pracuje wyłącznie w dwóch trybach pracy, tj. mocy nominalnej i podtrzymania. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że chociaż jest to powszechnie stosowane założenie, można spotkać w literaturze inne, alternatywne rozwiązania. Jednym z nich jest regulacja procesem spalania w kotłach z zastosowaniem zmiennego strumienia paliwa przy stałym strumieniu powietrza podawanego do kotła [Nus99, HKB11]. Jednakże takie podejście wiąże się 1) ze zmienną mocą kotła w czasie oraz 2) z negatywnymi własnościami kotła w kontekście projektowania układu regulacji (ponieważ kocioł dla zmiennego w czasie strumienia podawania paliwa staje się obiektem silnie nieminimalnofazowym).

4.2.3. Modelowanie procesu spalania peletu w komorze spalania

Fizykochemiczne i stechiometryczne równania opisujące proces spalania peletu drzewnego zostały szczegółowo przedstawione w Rozdziale 2. Na podstawie tych równań można wyodrębnić zależności wyznaczające stężenia poszczególnych produktów spalania w kotle. Należy podkreślić, że stałe czasowe procesów spalania są dla peletu drzewnego niewielkie i zawierają się w pojedynczych sekundach [LRL11, SPM13]. W zestawieniu ze stałymi czasowymi pozostałych elementów kotła, tj. wymiennik ciepła i układ podawania powietrza, mogą zostać pominięte. Dlatego proces ten został opisany równaniami statycznymi

$$O_2 = \frac{V'_{O_2}}{V_{sp}} \quad (4.14)$$

gdzie V'_{O_2} i V_{sp} są odpowiednio objętością tlenu resztkowego (w spalinach) i spalin. W warunkach normalnych objętość tlenu w spalinach wyznacza się z zależności

$$V'_{O_2} = V_{O_2} - V_{O_2}^{\min} \quad (4.15)$$

gdzie V_{O_2} oznacza objętość tlenu dostarczanego do komory spalania (patrz równanie (2.7)), natomiast $V_{O_2}^{\min}$ oznacza stechiometryczną objętość tlenu potrzebną do zupełnego spalania (patrz równanie (2.4)). Alternatywnie V'_{O_2} może być wyznaczone na podstawie współczynnika nadmiaru powietrza λ

$$V'_{O_2} = V_{O_2}^{\min} (\lambda - 1) \quad (4.16)$$

Objętość spalin w badanym układzie V_{sp} opisuje równanie (2.10) w Rozdziale 2.

4.2.4. Modelowanie wymiennika ciepła

W wyniku procesu spalania peletu powstaje szereg produktów przemian chemicznych. Następnie produkty spalania przepływają przez wymiennik ciepła i poprzez czopuch kotła wydostają się do układu kominowego. W wymienniku ciepła nie zachodzą już żadne procesy chemiczne, a jedynie następuje wymiana energii cieplnej między gazami wylotowymi a cieczą układu grzewczego. W związku z tym, na wyjściu układu wymiennika i samego kotła znajdują się te same wielkości co w komorze spalania, przefiltrowane jedynie przez dynamikę związaną z przemieszczaniem się gazów poprzez wymiennik. Należy zwrócić uwagę, że zaproponowany model, poza samym wymiennikiem ciepła, obejmuje górną część komory spalania (tam gdzie nie zachodzą już przemiany chemiczne), jak również część wylotową kotła. Rozłożony charakter zjawiska wymiany ciepła sugerowałby, że omawiane zjawisko najdokładniej byłoby opisane poprzez zastosowanie modelu o parametrach rozłożonych, uwzględniającego fizyczny kształt wymiennika. Jednakże tak otrzymany model byłby bardzo złożony obliczeniowo, co praktycznie uniemożliwiłoby jego implementację dla celów sterowania. Zakładając, że gdyby nawet udało się opracować taki model, to i tak w celach implementacyjnych musiałby on zostać sprowadzony do układu o parametrach skupionych. Z w/w powodów do modelowania wymiennika od razu zastosowany zostanie model o parametrach skupionych. Dynamika układu w omawianym torze zawiera dwie główne składowe, tj. składową inercyjną i opóźniającą. Ponadto opóźnienie w układzie może nieznacznie zmieniać się w zależności od zmian przepływu powietrza podawanego do kotła. W literaturze [LRM00] dowodzi się, że efektywnym narzędziem w zadaniu modelowania procesów ze zmiennym opóźnieniem są modele oparte na filtrach Laguerre'a. Zostaną one przedstawione w kolejnym podpunkcie.

Model oparty na ciągłych filtrach Laguerre'a

Układ ciągły o parametrach skupionych opisany transmitancją operatorową $G(s)$ można przedstawić w postaci [HWV05]

$$G(s) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i L_i(s) \quad (4.17)$$

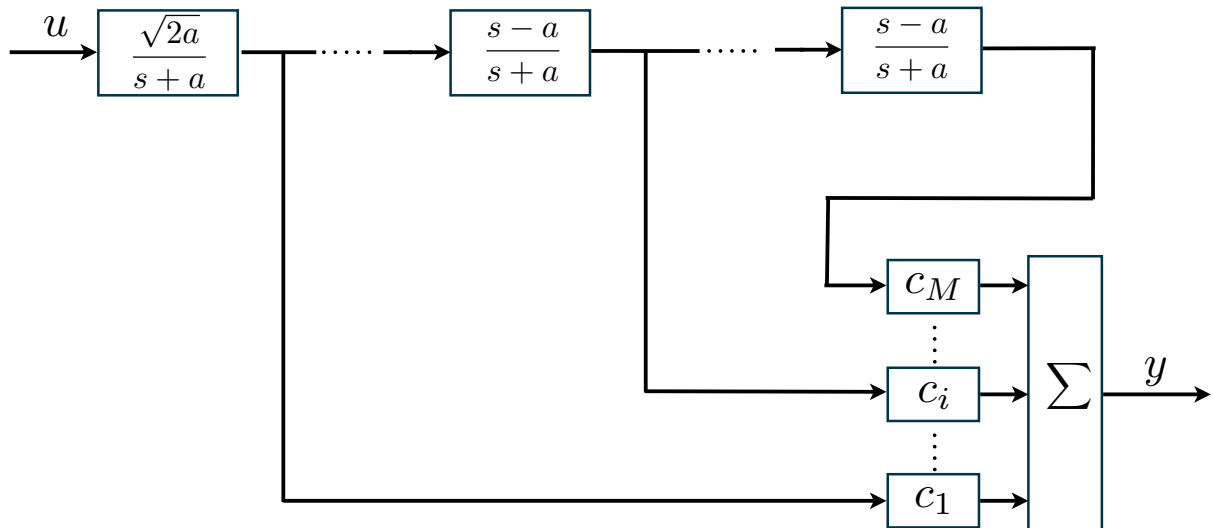
gdzie $c_i, i=1, 2, \dots$, są parametrami modelu, a $L_i(s), i=1,2,\dots$, jest zbiorem ortonormalnych funkcji Laguerre'a zdefiniowanych w przestrzeni operatorowej s

$$L_i(s) = \frac{\sqrt{2a}}{s+a} \left(\frac{s-a}{s+a} \right)^{i-1} \quad (4.18)$$

gdzie a jest dominującym biegunem funkcji Laguerre'a. W przypadku nieskończonym równanie (4.17) jest prawdziwe dla dowolnego bieguna spełniającego kryterium stabilności $a < 0$. Model oparty na równaniu (4.17) polega na zastosowaniu skończonego zbioru filtrów i wówczas model Laguerre'a opisuje się jako skończona suma iloczynów parametrów modelu i funkcji Laguerre'a

$$\hat{G}(s) = \sum_{i=1}^M c_i L_i(s) \quad (4.19)$$

Jakość aproksymacji w równaniu (4.19) zależy zarówno od liczby zastosowanych filtrów Laguerre'a, jak również od wyboru dominującego bieguna Laguerre'a a , który zwykle dobierany jest eksperymentalnie. Jednakże w najnowszej literaturze prezentuje się metody automatycznego strojenia bieguna na podstawie dynamiki modelowanego systemu [BMC06, HVW05, SHL08, StL08]. Parametry $c_i, i=1,2,\dots,M$, modelu mogą być wyznaczane w prosty sposób za pomocą klasycznych metod estymacji parametrów, np. metoda najmniejszych kwadratów, która będzie opisana w kolejnym podpunkcie. Ostatecznie wyjście modelu może być wyznaczane na podstawie schematu blokowego przedstawionego na Rys. 4.11.



Rys. 4.11. Schemat blokowy wyznaczania wartości wyjściowej w modelu Laguerre'a.

Estymacja parametrów

Proces estymacji w modelu Laguerre'a sprowadza się do wyznaczenia wartości wag c_i , $i = 1, \dots, M$, przy znajomości *a priori* wartości dominującego bieguna Laguerre'a. Wówczas równanie modelu (4.19) może zostać przedstawione w postaci regresji liniowej

$$\hat{y}(t) = \theta \varphi(t) \quad (4.20)$$

gdzie $\hat{y}(t)$ jest wyjściem modelu, natomiast θ i $\varphi(t)$ to odpowiednio wektor (nieznanych) parametrów modelu i wektor sygnałów oparty na odpowiedziach filtrów Laguerre'a na sygnał wejściowy

$$\theta = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_M \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\varphi(t) = \ell^{-1} \left(\begin{bmatrix} L_1(s)U(s) & L_2(s)U(s) & \dots & L_M(s)U(s) \end{bmatrix}^T \right)$$

gdzie ℓ^{-1} oznacza odwrotną transformatę Laplace'a.

Uwaga 4.1. Należy podkreślić, że pomimo wyznaczania parametrów ciągłego modelu Laguerre'a, estymacja parametrów odbywa się w czasie dyskretnym. Jest to podyktowane charakterem pomiaru, który jest realizowany ze stałym czasem próbkowania. Z tego powodu w równaniach estymacji parametrów występował będzie znormalizowany czas dyskretny zdefiniowany jako $t=1,2,\dots$

Uwzględniając Uwagę 4.1 liniowe równanie regresji będzie ponownie określała zależność (4.20), jednak t będzie czasem dyskretnym, a wektor sygnałów modelu $\varphi(t)$ wyznaczany będzie przez dyskretne odpowiedniki filtrów Laguerre'a

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} L_1(q)u(t) & L_2(q)u(t) & \dots & L_M(q)u(t) \end{bmatrix}^T \quad (4.22)$$

gdzie $L_i(q)$, $i=1,\dots,M$, są dyskretnymi filtrami Laguerre'a (które przedstawione będą w Punkcie 4.3.1 pracy), a t jest (znormalizowanym) czasem dyskretnym $t=1,2,\dots$

Równanie (4.20) może również zostać przedstawione w formie macierzowej dla całej serii pomiarowej. Wówczas liniowe równanie regresji przyjmuje postać

$$\hat{Y} = \theta\Phi \quad (4.23)$$

gdzie

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(N) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi(1) & \varphi(2) & \dots & \varphi(N) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

W przypadku zastosowania estymacji metodą najmniejszych kwadratów (ang. *Least Squares method*) dobór wag odbywa się poprzez minimalizację średniokwadratowego wskaźnika jakości

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \left(\sum_{t=1}^N (\hat{y}(t) - y(t))^2 \right) \quad (4.26)$$

Jedną z podstawowych zalet metody najmniejszych kwadratów jest fakt, że dla modeli opisanych liniowym równaniem regresji funkcja strat posiada jedno globalne minimum, które można wyznaczyć analitycznie. Wówczas dla równania (3.23) optymalne rozwiązanie wyznacza zależność

$$\theta = Y\Phi^T (\Phi\Phi^T)^{-1} \quad (4.27)$$

W ramach pracy autor wykorzystywał również rekursywną/adaptacyjną metodę najmniejszych kwadratów (ang. *Recursive/Adaptive Least Squares* – RLS/ALS), która bazuje na iteracyjnym wyznaczaniu poprawek wektora nieznanymi parametrów θ na postawie błędów modelu, wówczas

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t) \left[Y^T(t) - \hat{Y}^T(t) \right] \quad (4.28)$$

gdzie

$$\hat{Y}^T(t) = \Phi^T(t-1)\hat{\theta}(t-1) \quad (4.29)$$

$$L(t) = P(t-1)\Phi(t-1) \left[\frac{\lambda_1(t)}{\lambda_2(t)} + \Phi^T(t-1)P(t-1)\Phi(t-1) \right] \quad (4.30)$$

$$P(t) = [I - L(t)\Phi^T(t-1)]P(t-1)/\lambda_1(t) \quad (4.31)$$

przy czym $\lambda_1(t)$ oraz $\lambda_2(t)$ są współczynnikami zapominania wykładniczego, $L(t)$ jest wzmocnieniem Kalmana, $P(t)$ jest macierzą kowariancyjną, a $\hat{\theta}(0)$ i $P(0)$ są wartościami początkowymi algorytmu. Zwykle przyjmuje się $\hat{\theta}(0) = 0$, $P(0) = 10^5 I$.

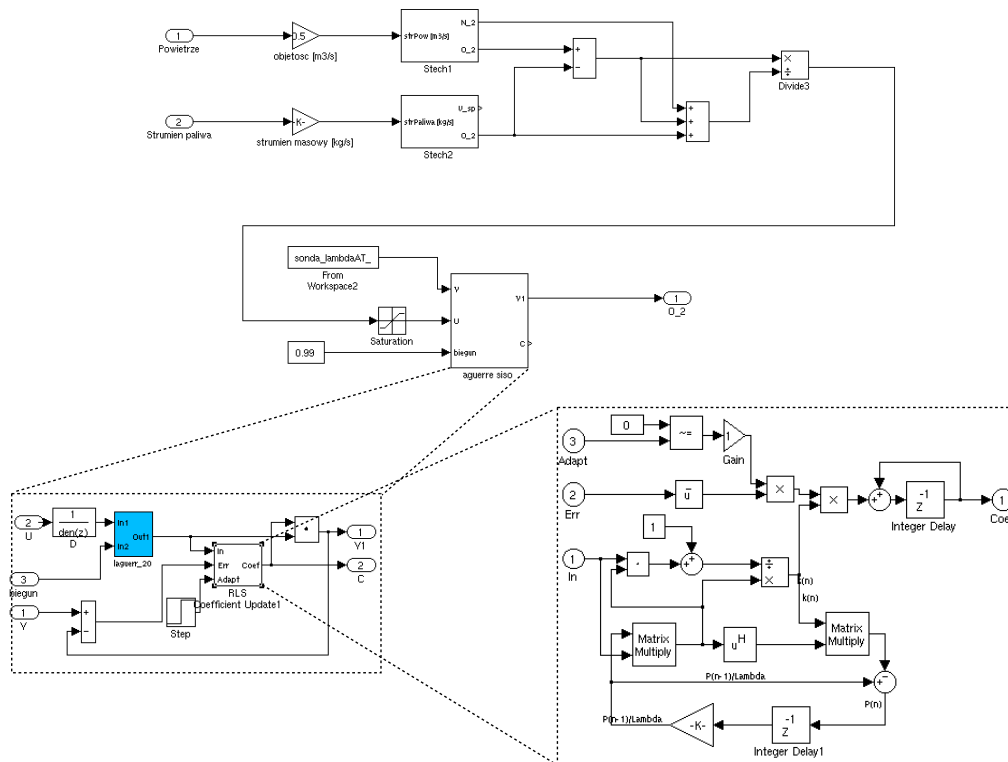
Dla systemów stacjonarnych przyjmuje się $\lambda_1(t) = \lambda_2(t) = 1$, a algorytm (4.28-4.31) nazywany jest algorytmem RLS (metoda rekursywna). Podstawową zaletą algorytmu RLS jest szybka zbieżność. Kiedy w metodzie RLS implementuje się mechanizm zapominania wykładniczego (poprzez założenie $\lambda_1(t), \lambda_2(t) < 1$ i $\lambda_1(t) \neq \lambda_2(t)$), algorytm (4.28-4.31) nazywany jest algorytmem ALS (metoda adaptacyjna). Posiada on własności śledzenia zmian parametrów w systemach niestacjonarnych [Lat99, Lju87, SoS89]. Z drugiej jednak strony estymator ALS nie jest odporny na słabe pobudzenie, co może prowadzić do „wybuchania” macierzy kowariancyjnej [AsW89, Lat99, Lat04]. Konieczny jest zatem w tym przypadku ekspercki nadzór nad macierzą kowariancyjną. W ramach pracy testowano metodę adaptacyjną najmniejszych kwadratów, jednak zasadniczo oparto się na metodzie rekursywnej.

Model układu wymiennika ciepła

W celu wyznaczenia parametrów modelu wymiennika ciepła przeprowadzono serię eksperymentów na rzeczywistym obiekcie. Sygnałem wejściowym modelu była wartość tlenu nadmiarowego wynikająca z równań stechiometrycznych opisanych w modelu komory spalania, natomiast sygnałem wyjściowym było stężenie tlenu w spalinach mierzone w czopuchu kotła za pomocą sondy lambda i (równolegle) przez analizator spalin.

Ze względu na lepsze uwarunkowanie numeryczne, do estymacji parametrów zastosowano rekursywną metodę najmniejszych kwadratów. Ponieważ efektywność modelu istotnie zależała od doboru optymalnego bieguna Laguerre’a a , dokonano optymalizacji tego parametru w oparciu o normę średniokwadratową (równanie (4.26)). Zastosowano w tym celu metodę iteracyjną opartą na sympleksie Nelder-Mead’a, która jest zaimplementowana w środowisku Matlab w funkcji `fminsearch()`. Schemat blokowy procesu estymacji w środowisku Matlab/Simulink przedstawiono na Rys. 4.11.

4. Modelowanie procesu spalania w kotle peletowym dla celów sterowania



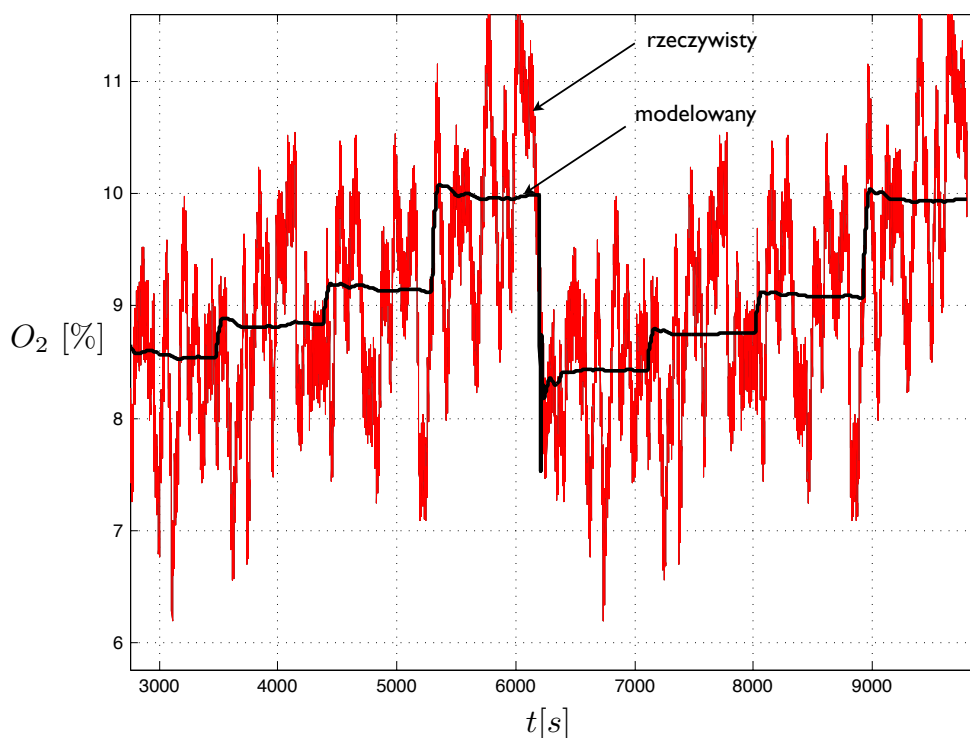
Rys. 4.11. Schemat blokowy modelu wymiennika ciepła.

Zastosowano $M=15$ filtrów Laguerre'a, dla których w wyniku optymalizacji wyznaczono optymalny biegun Laguerre'a $a_{opt}=19.90$. W wyniku estymacji parametrów otrzymano współczynniki c_i , $i=1, \dots, 15$, modelu, które zostały zestawione na w Tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Parametry modelu układu wymiennika.

Parametr	Wartość
c_1	2.692016271732518
c_2	4.393625954348625
c_3	-1.749191633297863
c_4	-1.402352655811145
c_5	2.318050782014828
c_6	-1.942420301031013
c_7	0.463476866054641
c_8	0.442533918690319
c_9	-0.780377157090188
c_{10}	0.854140588649424
c_{11}	-0.670695956934756
c_{12}	0.866341293056827
c_{13}	0.011868322913400
c_{14}	-0.906210558314588
c_{15}	0.365008482860930

Fragment przebiegu czasowego rzeczywistego i modelowanego sygnału tlenu nadmiarowego został przedstawiony na Rys. 4.12.



Rys. 4.12. Przebiegi czasowe rzeczywistej i modelowanej wartości tlenu.

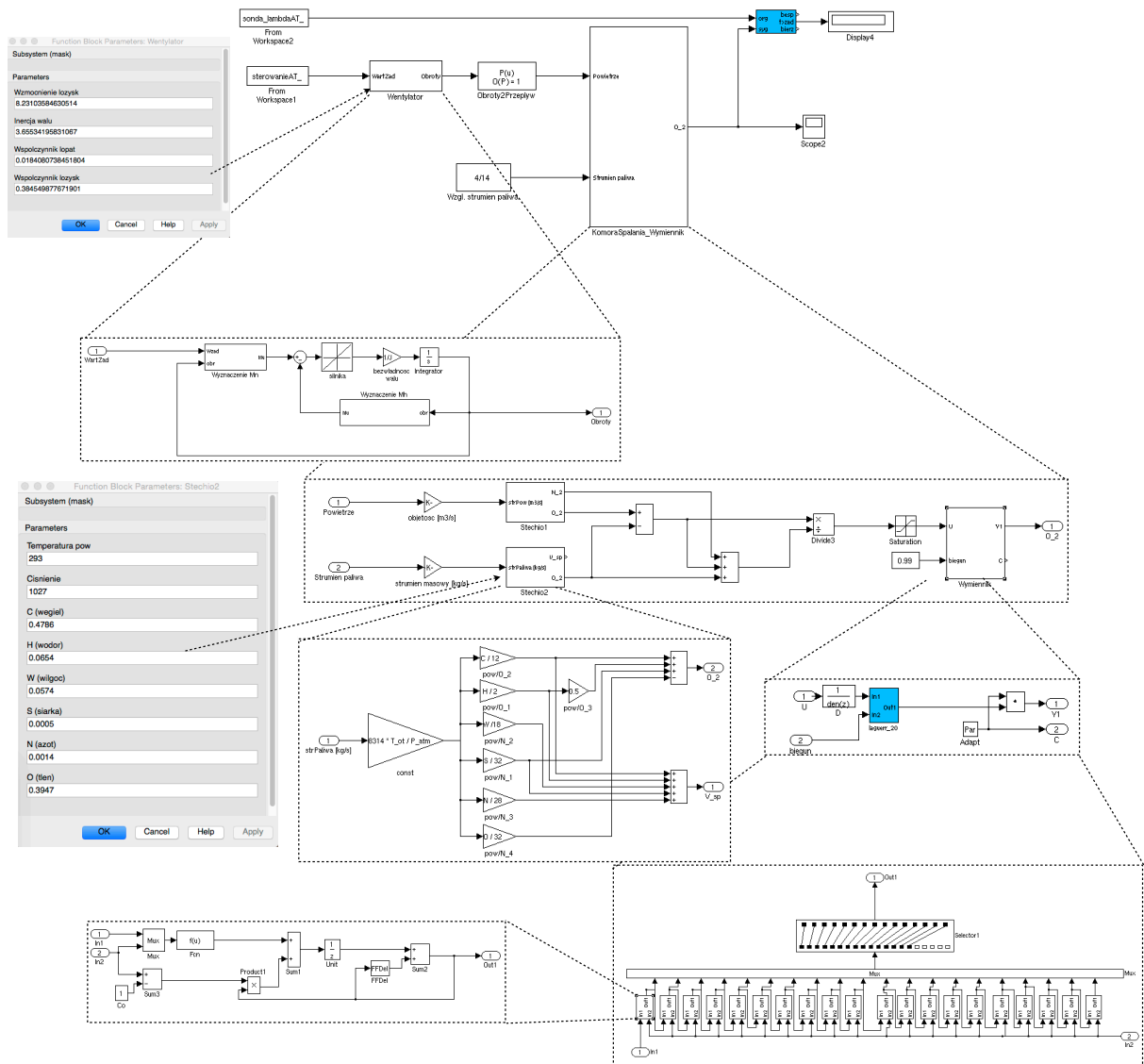
Jak można zauważyć na Rys. 4.12, model dobrze opisuje zmiany wartości tlenu w odniesieniu do wartości średnich. Jednakże rzeczywiste wartości odczytywane przez układ pomiarowy cechują się znaczną składową stochastyczną. Częściowo (w przypadku wysokich częstotliwości zmian tlenu) jest to szum wprowadzany przez układy pomiarowe, jednakże zmiany sygnału o niższych częstotliwościach są generowane przez liczne zakłócenia niemierzalne. W literaturze można znaleźć szereg badań, które wskazują na różne źródła zakłóceń w badanych obiektach, do których zaliczyć można 1) zmiany ciągu kominowego, 2) zmiany mocy kotła, 3) ruch złoża w procesie spalania itp. [HKB11, HSP11, KBL09, Ruu09]. Jednak w odniesieniu do rozpatrywanego w pracy obiektu, badania wykluczają istotny wpływ tych czynników na zmiany wartości wyjściowej. Szczegółowa analiza wpływu sygnałów wewnętrznych na zawartość tlenu w spalinach znajduje się w Podrozdziale 4.4.

4.2.4. Weryfikacja eksperymentalna modelu

W wyniku prac prezentowanych w powyższych podrozdziałach otrzymano model kotła jako układu o złożonej strukturze. Zestawienie odpowiedzi poszczególnych podsystemów wchodzących w skład kotła z sygnałami rzeczywistymi zostało przedstawione w poprzednich podrozdziałach. W ramach bieżącego punktu zostanie

4. Modelowanie procesu spalania w kotle peletowym dla celów sterowania

przedstawiona analiza kotła jako całości. Schemat blokowy modelu w środowisku Matlab/Simulink został przedstawiony na Rys. 4.13.



Rys. 4.13. Implementacja kotła jako układu o złożonej strukturze w środowisku Matlab/Simulink.

Analiza polegała na wyznaczeniu błędu modelu w odniesieniu do sygnałów pomiarowych mierzonych na obiekcie. Seria pomiarowa trwała prawie 3 godz. Sygnały mierzono z częstotliwością 5 Hz. Fragmenty przebiegów czasowych modelu i obiektu przedstawiono już w poprzednim podrozdziale na Rys. 4.12. Jak zostało to przedstawione w poprzednim podrozdziale, podstawowym problemem w omawianym procesie jest występowanie silnej składowej stochastycznej. Dlatego średniokwadratowy błąd predykcji odniesiony do liczby próbek aproksymowanego sygnału zdefiniowany jako

$$MSE = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (\hat{y}(t) - y(t))^2 \quad (4.32)$$

jest znaczny i wynosi

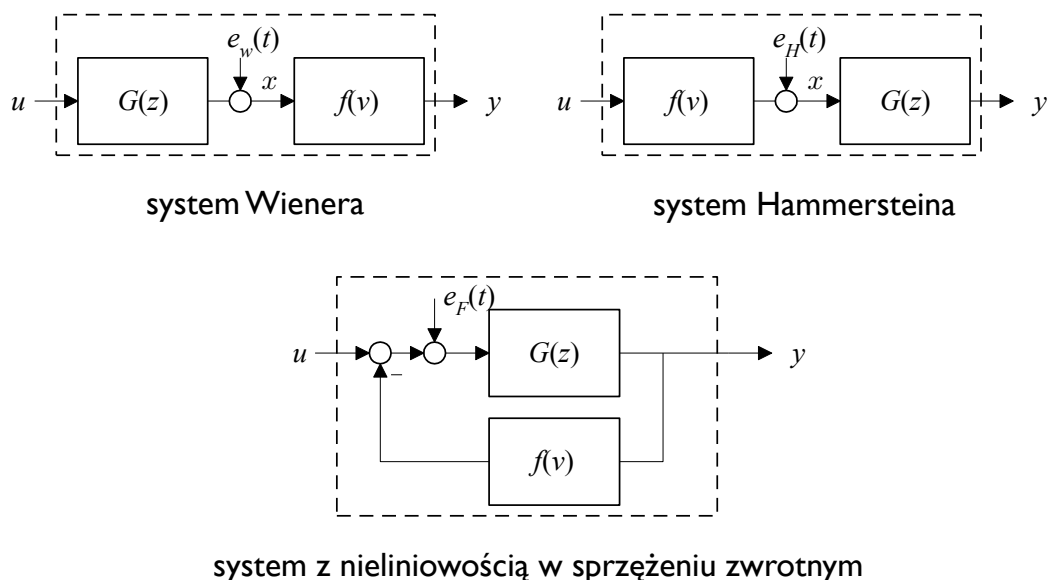
$$MSE = 0.615 \quad (4.33)$$

W ramach weryfikacji poddano analizie również odpowiedzi czasowe modelu na inne sygnały pobudzające. Otrzymane rezultaty potwierdziły wiedzę ekspercką w kontekście własności badanego kotła. Ze względu na ograniczony rozmiar dysertacji, nie pokazano wyników z omawianych badań.

Generalnie można stwierdzić, że prezentowany model dobrze opisuje modelowany proces i może zostać z powodzeniem wykorzystany do predykcji przyszłych stanów procesu. Jednakże jego budowa, zarówno w kontekście struktury, jak również złożoności obliczeniowej nie pozwala na bezpośrednią implementację w procesie sterowania. Z tego powodu w kolejnym podrozdziale zostanie podjęta próba opracowania modelu dedykowanego dla celów sterowania.

4.3. Model kotła jako nieliniowy układ blokowo-zorientowany

Jedną z najbardziej popularnych struktur nieliniowych stosowanych w procesach modelowania dla celów sterowania są nieliniowe modele blokowo-zorientowane. Podstawową koncepcją w tych modelach jest połączenie nieliniowego elementu statycznego z liniowym obiektem dynamicznym. Ze względu na różne możliwe topologie połączeń, istnieje wiele różnych modeli blokowo-zorientowanych. Do najczęściej stosowanych zaliczyć można modele Hammersteina i Wienera, w których nieliniowy element jest połączony kaskadowo z obiektem dynamicznym. Podstawowe struktury nieliniowe blokowo-zorientowane zostały przedstawione na Rys. 4.14.



Rys. 4.14. Wybrane nieliniowe układy blokowo-zorientowane.

Jak pokazano na Rys. 4.14, w modelu Hammersteina układ nieliniowy występuje na wejściu obiektu, a model dynamiczny na jego wyjściu. W przypadku modelu Wienera układ dynamiczny znajduje się w pierwszej kolejności, a na wyjściu układu jest liniowa dynamika. To połączenie jest znacznie bardziej kłopotliwe, gdyż w procesie estymacji wyznaczana jest zwykle odwrotność nieliniowości, co z jednej strony nakłada dodatkowe ograniczenia na nieliniowość występującą w procesie, a z drugiej strony wymaga dodatkowych operacji związanych z jej odwracaniem. Inną, rzadziej stosowaną strukturą, jest układ z nieliniowością w sprzężeniu zwrotnym. Układ ten został przedstawiony na Rys. 4.14. To rozwiązanie stosowane jest zwykle w układach pracujących w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego i nie znajduje zastosowania w rozpatrywanym w pracy obiekcie. W literaturze stosuje się również połączenie modelu Hammersteina i Wienera (model Hammersteina-Wienera). W tym przypadku występują dwie nieliniowości usytuowane zarówno na wejściu, jak i wyjściu układu, jednak wówczas powstaje istotny problem z ich separacją w procesie estymacji. W literaturze stosuje się również wiele innych nieliniowych struktur blokowo-zorientowanych [LMR03, NiG02, PoP00, SHL08, SLH07], jednak nie będą one wykorzystywane w bieżącej pracy.

Podstawową zaletą zastosowania omawianych struktur blokowo-zorientowanych jest sprowadzenie równania opisującego cały system nieliniowy do liniowego równania regresji, co umożliwi łatwą estymację parametrów za pomocą klasycznych, liniowych estymatorów. Z drugiej strony należy podkreślić, że algorytmy sterowania predykcyjnego zwykle opierają się na modelach dyskretnych. Takie też algorytmy będą rozważane w dalszej części niniejszej dysertacji i dlatego modele dynamiczne wchodzące w skład nieliniowych układów blokowo-zorientowanych są zdefiniowane w dziedzinie czasu dyskretnego. Ze względu na dobre własności aproksymacyjne wykorzystane zostaną modele dynamiczne oparte na funkcjach bazy ortonormalnej (ang. *Orthonormal Basis Functions* – OBF), a w szczególności na dyskretnych filtrach Laguerre’a. Modele te zostaną przedstawione w kolejnym podrozdziale.

4.3.1. Modele oparte na funkcjach bazy ortonormalnej

W modelach opartych na filtrach OBF wyjście z modelu jest sumą iloczynów pewnych filtrów ortonormalnych i parametrów systemu, które są opisywane przez następujące równanie

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^M c_i L_i(q) u(t) \quad (4.34)$$

gdzie M jest rzędem modelu, $c_i, i=1, \dots, M$, są nieznanymi (wymagającymi estymacji) parametrami modelu, natomiast $L_i(q), i=1, \dots, M$, jest zbiorem filtrów ortonormalnych.

Najczęściej, szczególnie w przypadku obiektów o charakterze inercyjnym, stosuje się dyskretne filtry Laguerre'a opisane równaniem

$$L_i(z) = \frac{\sqrt{1-p^2}}{z-p} \left(\frac{pz-1}{z-p} \right)^{i-1} \quad (4.35)$$

gdzie p oznacza dominujący biegun Laguerre'a dobierany eksperymentalnie w odniesieniu do własności identyfikowanych systemów. Asymptotyczna stabilność filtrów Laguerre'a wymaga bieguna p w przedziale $p \in (-1,1)$, jednakże w praktyce, ze względu na zapewnienie kompatybilności z układami ciągłymi, stosuje się dodatnie wartości tego bieguna, w związku z tym $p \in [0,1)$. Dla układów ze znaczną stałą czasową i opóźnieniem dominujący biegun p jest bliski 1. Natomiast dla systemów „szybkich” wartość bieguna przybiera wartości znacznie mniejsze. Należy podkreślić, że filtry Laguerre'a są wynikiem zastosowania metody ortogonalizacji Gramma-Smitha w odniesieniu do bazy opartej na kolejnych rozwinięciach układu inercyjnego

$$\tilde{L}_i(z) = \left(\frac{1}{z-p} \right)^i \quad (4.36)$$

Zgodnie z procedurą pierwszy filtr Laguerre'a podlega wyłącznie normalizacji

$$L_1(z) = \frac{\tilde{L}_1(z)}{\|\tilde{L}_1(z)\|} \quad (4.37)$$

gdzie $\|\cdot\|$ oznacza normę euklidesową. Biorąc pod uwagę, że norma może być wyznaczana na podstawie iloczynu skalarnego

$$\|L_i(z)\|^2 = \langle \tilde{L}_i(z), \tilde{L}_i(z) \rangle \quad (4.38)$$

normę $\|L_1(z)\|$ najprościej wyznaczyć analitycznie na podstawie całki Cauchy'ego w dyskretnej przestrzeni Laplace'a

$$\|\tilde{L}_1(z)\|^2 = \langle \tilde{L}_1(z), \tilde{L}_1(z) \rangle = \frac{1}{2\pi} \oint \tilde{L}_1(1/z) \tilde{L}_1(z) \frac{dz}{z} = \frac{1/z}{1/z-p} \Big|_{z=p} = \frac{1}{1-p^2} \quad (4.39)$$

Wartość iloczynu skalarnego można również wyznaczyć w dziedzinie czasu, na podstawie odpowiedzi impulsowych filtrów. Wówczas

$$\langle \tilde{L}_i(z), \tilde{L}_j(z) \rangle = \langle \tilde{L}_i(q), \tilde{L}_j(q) \rangle = \sum_{t=1}^{\infty} g_i(t) g_j(t) \quad (4.40)$$

Gdzie $g_i(t)$ i $g_j(t)$, $t=1,2,\dots$, są odpowiedziami impulsowymi filtrów $\tilde{L}_i(q)$ i $\tilde{L}_j(q)$. Ostatecznie korzystając z zależności (4.37) i (4.39) otrzymuje się pierwszy filtr Laguerre'a

$$L_1(z) = \frac{\sqrt{1-p^2}}{z-p} = \frac{k}{z-p} \quad (4.41)$$

Wyznaczenie kolejnych filtrów Laguerre'a opiera się na procesie ortogonalizacji w której i -te rozwinięcie określa się na podstawie równania

$$\bar{L}_i(z) = \tilde{L}_i - \sum_{j=1}^{i-1} \langle \tilde{L}_i(z), L_j(z) \rangle L_j(z) \quad (4.42)$$

a następnie normalizacji

$$L_i(z) = \frac{\bar{L}_i(z)}{\|\bar{L}_i(z)\|} \quad (4.43)$$

W związku z powyższym do wyznaczenia filtra $L_2(z)$ konieczne jest określenie iloczynu skalarnego

$$\langle \tilde{L}_2(z), L_1(z) \rangle = \frac{1}{2\pi i} \oint \tilde{L}_2(1/z) L_1(z) \frac{dz}{z} = \frac{k}{z(1/z-p)^2} \Big|_{z=p} = \frac{pk}{(1-p^2)^2} \quad (4.44)$$

Następnie filtr ortogonalny do $L_2(z)$ otrzymuje się z zależności (4.42)

$$\bar{L}_2(z) = \frac{1}{(z-p)^2} - \frac{pk^2}{(1-p^2)^2(z-p)} = \frac{-pz+1}{(1-p^2)(z-p)^2} \quad (4.45)$$

Ostatecznie normalizacja (4.43) prowadzi do

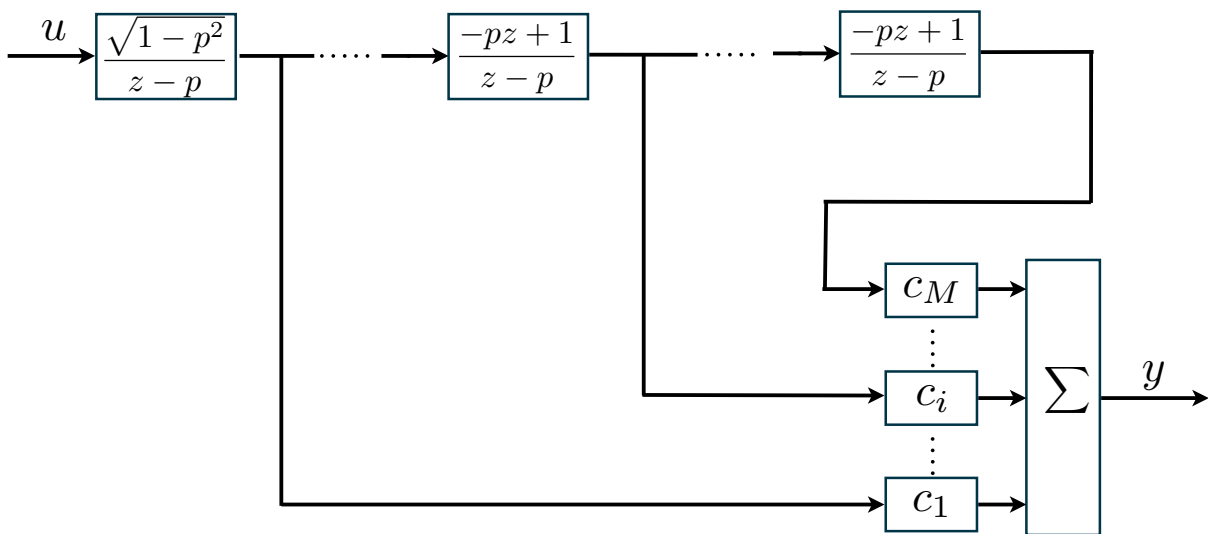
$$L_2(z) = \frac{\bar{L}_2(z)}{\|\bar{L}_2(z)\|} = \frac{k(-pz+1)}{(z-p)^2} \quad (4.46)$$

Analogicznie można wyznaczyć bazę filtrów Laguerre'a dla kolejnych rozwinięć.

Bardzo interesującą właściwością filtrów Laguerre'a jest fakt, że ortonormalizacja skutkuje poprawą własności estymacji parametrów poprzez zapewnienie optymalnego unormowania macierzy kowariancji. Jednakże z punktu

widzenia predykcji przyszłych stanów procesów model Laguerre'a oparty na filtrach $L_2(z)$ jest ekwiwalentny z modelem opartym na inercjach $\tilde{L}_i(z)$ (patrz równanie (4.36)). Fakt ten został opisany w odniesieniu do układów frakcyjnych w pracy [Sta13]. Jak pokazują prace [Lat04, LRM00], modele oparte na filtrach Laguerre'a bardzo dobrze sprawdzają się przy estymacji obiektów opóźnionych, również ze zmiennym opóźnieniem [LRM00]. Dokładnie takim obiektem jest badany system i dlatego zastosowano omawiany aproksymator.

Schemat blokowy wyznaczania wielkości wyjściowej w dyskretnym modelu Laguerre'a został przedstawiony na Rys. 4.8.



Rys. 4.8. Schemat blokowy wyznaczania wartości wyjściowej w dyskretnym modelu Laguerre'a.

Można zauważyć, że filtry Laguerre'a są pewnym uogólnieniem modelu FIR, gdyż dla $p=0$ filtry Laguerre'a sprowadzają się do zbioru opóźnień będących bazą modelu FIR. Wówczas $L_i(q)$ przyjmują postać

$$L_i(z) = z^{-i} \quad (4.47)$$

W pracy zostaną przedstawione i wykorzystane dwie alternatywne metodologie wyznaczenia modelu Hammersiteina i Wienera, oparte na regularnej i inwersyjnej koncepcji modelowania OBF. Metody te zostały zaproponowane w pracach [Lat99, LMS04].

4.3.2. System Wienera

W systemie Wienera element statyczny nieliniowy jest połączony z modelem dynamicznym liniowym. Wówczas wyjście z systemu Wienera opisuje zależność [Lat99, SLG14]

$$y(t) = f[G(q)u(t) + e_w(t)] \quad (4.48)$$

gdzie $f(\cdot)$ jest funkcją nieliniową, $G(z)$ modeluje część dynamiczną liniową, a $e_w(t)$ jest (niemierzalnym) zakłóceniem układu. W przypadku układów Wienera standardowo przyjmuje się dwa podstawowe założenia dla modelowanego systemu, tj. 1) układ jest asymptotycznie stabilny oraz 2) nieliniowość układu jest ciągła i odwracalna [SHL10]. Warunek 1) jest standardowo zakładany w większości prac dotyczących identyfikacji systemów (również nieliniowych blokowo-zorientowanych), jednakże w pracy [LMR03b] wykazano, że przy zastosowaniu metodologii koncepcji inwersyjnego modelowania OBF założenie to nie musi być spełnione.

Biorąc pod uwagę równanie (4.48), wyjście modelu Wienera może być wyznaczane ze wzoru

$$\hat{y}(t) = \hat{f}[\hat{G}(q)u(t)] \quad (4.49)$$

W przypadku, kiedy model części dynamicznej będzie opisany za pomocą modelowania OBF, otrzymuje się

$$\hat{G}(z) = \sum_{i=1}^M c_i L_i(z) \quad (4.50)$$

gdzie $L_i(z)$ są filtrami Laguerre'a przedstawionymi w równaniu (4.35), a c_i , $i = 1, \dots, M$, są parametrami wagowymi opisującymi dynamikę obiektu. Szczegółowe informacje dotyczące modelowania z zastosowaniem OBF zostały przedstawione w punkcie „Modele oparte na Filtrach Bazy Ortonormalnej” w bieżącym rozdziale.

Do opisu części nieliniowej stosować można różne metody aproksymacji funkcji, obejmujących m. in. sieci neuronowe [ScM96], radialne funkcji bazowe (ang. *Radial Basis Functions*) [SHL08, SHL10], funkcje odcinkowo-liniowe [DeW04] i wiele innych. Jednak najbardziej powszechną metodą aproksymacji funkcji nieliniowych w układach blokowo-zorientowanych jest rozwinięcie wielomianowe, zdefiniowane jako

$$\hat{f}(x(t)) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + \dots + a_m x^m(t) \quad (4.51)$$

Koncepcja modelu Wienera oparta na OBF polega na przedstawieniu równania modelu układu (4.49) w postaci

$$\hat{f}^{-1}(\hat{y}(t)) = \hat{G}(q)u(t) \quad (4.52)$$

gdzie $\hat{f}^{-1}(\hat{y}(t))$ jest aproksymacją odwrotności funkcji $f(\cdot)$. Należy zaznaczyć, że przedstawienie równania (4.49) w postaci (4.52) wymaga ciągłości

i różnowartościowości funkcji $f(\cdot)$. W pracy [LMS04] wykazano, że odwrotność funkcji również może być modelowana za pomocą rozwinięcia wielomianowego. Wówczas

$$\hat{f}^{-1}(y(t)) = a_1 y(t) + a_2 y^2(t) + \dots + a_m y^m(t) \quad (4.53)$$

Zakładając, że $a_1=1$, (wówczas rzeczywiste wzmocnienie obiektu zostanie określone przez $G(z)$) można wyznaczyć równanie modelu Wienera

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^M c_i L_i(q^{-1})u(t) - \sum_{j=2}^m \underline{a}_j y^j(t) \quad (4.54)$$

gdzie \underline{a}_i , $i=2, \dots, m$, są zmodyfikowanymi współczynnikami wielomianu $\underline{a}_i = a_i/a_1$. Ostatecznie, równanie modelu Wienera może zostać przedstawione w postaci liniowego równania regresji (4.20), gdzie

$$\theta = [c_1 \dots c_M \underline{a}_2 \dots \underline{a}_m] \quad (4.55)$$

$$\varphi^T(t) = [L_1(q)u(t) \dots L_M(q)u(t) -y^2(t) -y^3(t) \dots -y^m(t)] \quad (4.56)$$

Parametry modelu mogą zostać wyznaczone na podstawie klasycznych metod estymacji parametrów opartych na liniowym równaniu regresji. Wykorzystywane w pracy metody estymacji przedstawiono w punkcie „Estymacja parametrów”. Dużą zaletą prezentowanego modelu jest separowalność części liniowej i nieliniowej, co nie zawsze jest osiągalne w układach nieliniowych blokowo-zorientowanych [LMS04].

4.3.3. System Hammersteina

W systemie Hammersteina nieliniowy element statyczny jest połączony kaskadowo z dynamicznym układem liniowym. Wyjście z układu wyznacza równanie

$$y(t) = G(q)[f(u(t)) + e_H(t)] \quad (4.57)$$

gdzie $e_H(t)$ jest zakłóceniem układu. W związku z powyższym wyjście modelu określa zależność

$$\hat{y}(t) = \hat{G}(q)[\hat{f}(u(t))] \quad (4.58)$$

Zgodnie z koncepcją modelowania inwersyjnego OBF (patrz [Lat99]) w układzie modelowana jest odwrotność dynamiki układu. Wówczas równanie modelu (4.58) opisane jest zależnością

$$\hat{G}^{-1}(q)\hat{y}(t) = \hat{f}(u(t)) \quad (4.59)$$

gdzie $\hat{G}^{-1}(q) = r_0q^d + r_1q^{d-1} + \dots + r_d + r_{d+1}q^{-1} \dots + r_{L-1}q^{-L+d+1}$ jest inwersją modelu dynamiki obiektu $\hat{G}(q)$, a d oznacza opóźnienie układu. Do modelowania $\hat{G}^{-1}(q)$ mogą zostać zastosowane filtry Laguerre'a, wówczas

$$\beta_0 v(t+d) = y(t) + \sum_{i=1}^M c_i L_i(q)y(t) \quad (4.60)$$

gdzie $\beta_0 = 1/r_0$. Modelując część nieliniową rozwinięciem wielomianowym (4.51) otrzymamy ostatecznie równanie obiektu

$$y(t) + \sum_{i=1}^M c_i L_i(q^{-1})y(t) = \beta_0 \sum_{j=1}^m a_j u^j(t-d) + e_1(t) \quad (4.61)$$

gdzie $e_1(t) = \beta_0 e_H(t)$ jest zakłóceniem układu. Równanie (4.61) może być również przedstawione w postaci liniowego równania regresji (4.20), gdzie

$$\theta = [c_1 \dots c_M \ a_1 \dots a_m] \quad (4.62)$$

$$\varphi^T(t) = [-L_1(q)y(t) \dots L_M(q)y(t) \ u(t-d) \ u^2(t-d) \dots u^m(t-d)] \quad (4.63)$$

W związku z powyższym, tak jak w modelu Wienera, model Hammersteina, dzięki zastosowaniu koncepcji modelowania inwersyjnego OBF może zostać przedstawiony w postaci liniowego równania regresji.

4.3.4. Inżynierskie podejście do modelowania układów nieliniowych blokowo-zorientowanych

Podczas identyfikacji nieliniowych obiektów blokowo-zorientowanych w procesie identyfikacji w eksperymencie czynnym istnieje możliwość odrębnego wyznaczenia własności elementu dynamicznego i statycznego. Dotyczy to zarówno modelu Hammersteina, jak i Wienera. Metoda opiera się na dwóch seriach eksperymentów przeprowadzonych odrębnie dla elementu statycznego i dynamicznego.

Zarówno w modelu Hammersteina jak i Wienera można dokonać następującego założenia

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [G(q)1(t)] = 1 \quad (4.64)$$

Wówczas wzmocnienie części dynamicznej zostanie opisane przez część nieliniową statyczną. W tym przypadku zarówno w modelu Hammersteina jak i Wienera można wyznaczyć punkty charakterystyki nieliniowej układu jako

$$\begin{aligned} f(k_i) &= \lim_{t \rightarrow \infty} [f(G(q)k_i \mathbf{1}(t))] \\ f(k_i) &= \lim_{t \rightarrow \infty} [G(q)(f(k_i \mathbf{1}(t)))] \end{aligned} \quad (4.65)$$

gdzie k_i , $i = 1, 2, \dots, n$, są punktami charakterystyki funkcji nieliniowej, a $\mathbf{1}(t)$ oznacza skok jednostkowy. W związku z powyższym możemy wyznaczyć zbiór punktów charakterystyki nieliniowej na podstawie serii eksperymentów w których układ doprowadza się do stanu ustalonego w różnych punktach pracy. Następnie na podstawie otrzymanego zbioru punktów można wyznaczyć charakterystykę nieliniową układu $f(\cdot)$ opisaną za pomocą dowolnego modelu, np. rozwinięcia wielomianowego przedstawionego w równaniu (4.51). W tym przypadku można wyznaczyć własności charakterystyki nieliniowej na podstawie zależności (4.27) gdzie

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_n \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ k_1 & k_2 & \cdots & k_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_1^M & k_2^M & \cdots & k_n^M \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

W przypadku modelu Hammersteina, na podstawie wyznaczonej charakterystyki nieliniowej można obliczać sygnał $x(t)=f(u(t))$. Następnie na podstawie sygnałów $x(t)$ i $y(t)$, w oparciu o klasyczne metody identyfikacji dla systemów liniowych, można wyznaczyć liniowy model dynamiczny układu.

W przypadku układu Wienera procedura wyznaczenia modelu jest nieco bardziej skomplikowana, gdyż wymaga wyznaczenia nie tylko funkcji $f(\cdot)$, ale również jej odwrotności $f^{-1}(\cdot)$. Wyznaczenie funkcji $f^{-1}(\cdot)$ odbywać się może również na podstawie równania (4.27), jednak w tym przypadku odwraca się argumenty z wartościami funkcji

$$Y = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & \cdots & k_n \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_1^M & y_2^M & \cdots & y_n^M \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

Otrzymana funkcja $f^1(\cdot)$ jest wykorzystywana do wyznaczenia sygnału $x(t)=f^1(y(t))$, na podstawie którego wyznaczany jest model elementu dynamicznego.

Zaproponowane w tym rozdziale podejście jest znacznie bardziej czasochłonne i wymaga przeprowadzenia serii eksperymentów czynnych na badanym obiekcie. Jednakże podejście to posiada również pewne zalety, do których należy przede wszystkim struktura błędu wyjściowego równań określających cały system nieliniowy blokowo-zorientowany. W przypadku aproksymacji prezentowanych w Punktach 4.3.1 oraz 4.3.2, sygnał wyjściowy występował po obu stronach równania systemu nieliniowego. To sprawiało, że system miał strukturę błędu równaniowego, co negatywnie wpływało na estymatory parametrów modelu.

Alternatywną metodą opisu funkcji nieliniowej jest zastosowanie modelu odcinkowo-liniowego (ang. *linear spline interpolation*). W tym przypadku opis funkcji sprowadza się do zbioru punktów przecięć pomiędzy którymi charakterystyka opisywana jest liniowo. Szczególnie dużą zaletą tego podejścia jest możliwość natychmiastowego wyznaczenia odwrotności funkcji poprzez zamianę argumentów i wartości funkcji.

W omawianym przypadku nieliniowy model blokowo-zorientowany zastosowany zostanie do opisu wyznaczonego w Podrozdziale 4.2 modelu o złożonej strukturze. Dlatego nie ma zasadniczo problemu z przeprowadzeniem dowolnie wielu eksperymentów symulacyjnych w środowisku obliczeniowym.

4.3.5. Analiza wyników identyfikacji

Prezentowane powyżej metodologie zostały zastosowane do identyfikacji modelu kotła w celu wyznaczenia nieliniowego modelu blokowo-zorientowanego efektywnego w zadaniach sterowania. W bieżącym podrozdziale zostanie przedstawiona analiza porównawcza otrzymanych wyników.

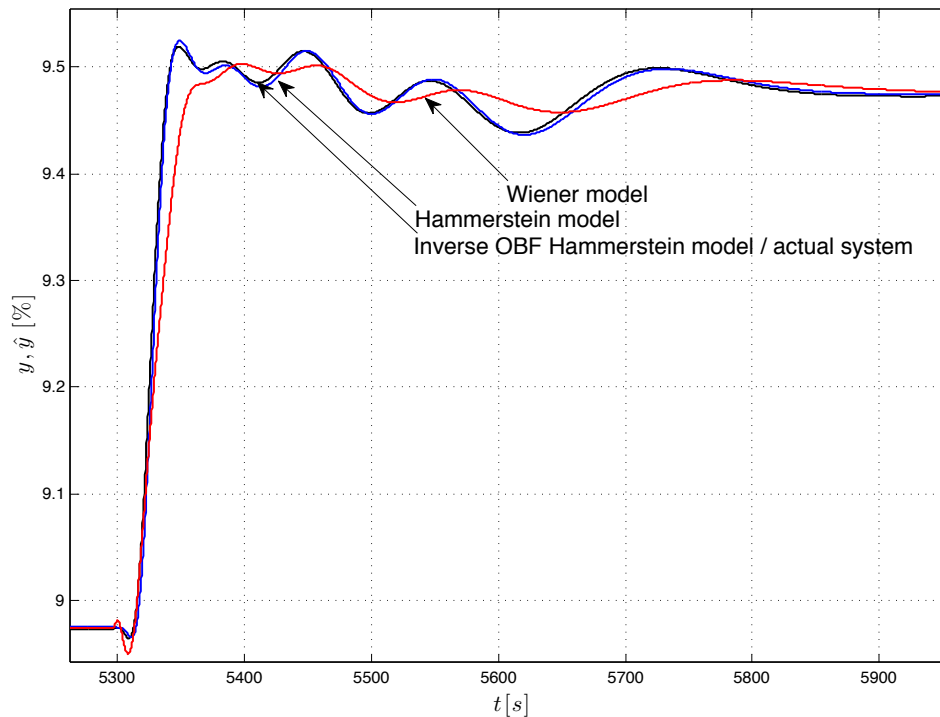
W pierwszej kolejności przeprowadzono eksperyment symulacyjny, w którym porównano błędy predykcji poszczególnych modeli blokowo-zorientowanych w odniesieniu do oryginalnego układu o złożonej strukturze. Wyniki w postaci skumulowanego błędu predykcji dla przykładowego eksperymentu symulacyjnego obejmującego pracę kotła przez 2 godz. 45 min. (seria 50000 próbek pomiarowych) przedstawiono w Tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Skumulowany błąd predykcji dla poszczególnych nieliniowych modeli blokowo-zorientowanych.

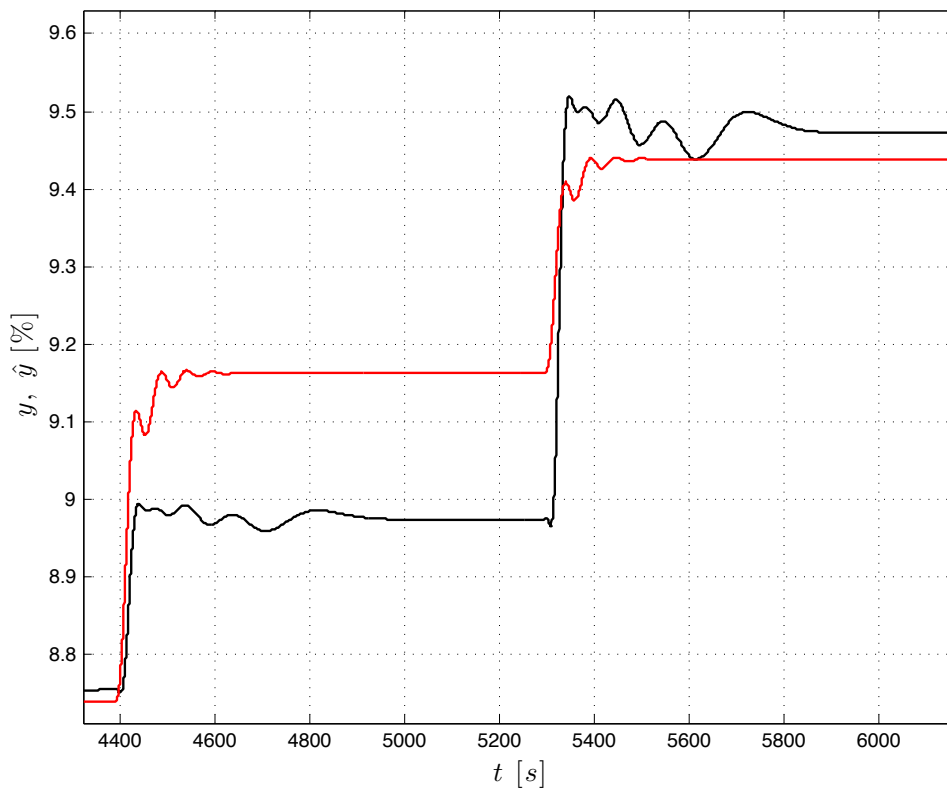
Model	Wartość
<i>Model Hammersteina z modelowaniem odwrotnym OBF (podrozdział 4.3.2)</i>	6.46 e-6
<i>Model Wienera (podrozdział 4.3.1)</i>	37.38
<i>Model Hammersteina (podrozdział 4.3.3)</i>	15.16

Jak można zauważyć w Tabeli 4.3, model oparty na koncepcji inwersyjnego modelowania OBF daje zdecydowanie najlepsze rezultaty w kontekście skumulowanych błędów predykcji. Jest to skutek koncepcji pracy modelu, wg której wyznacza on jednokrokowy predyktor sygnału $y(t+1)$ na podstawie rzeczywistych stanów obiektu $y(t), y(t-1), \dots$. Tak wysoka efektywność nie gwarantuje najlepszych rezultatów w kontekście określenia cech obiektu, takich jak np. własności częstotliwościowe, odpowiedzi skokowe/impulsowe (przy rozłączeniu modelu od obiektu). Model Hammersteina wyznaczony metodą inżynierską również daje zadowalające rezultaty. Co więcej, należy zaznaczyć, że jest to model o strukturze błędu wyjściowego, który pracuje niezależnie od opisywanego systemu i po procesie estymacji nie wykorzystuje sygnału wyjściowego z modelowanego procesu. Zgodnie z przewidywaniami model Wienera osiąga najgorsze rezultaty, co jest powodowane właściwościami systemu zbliżonymi do struktury Hammersteina. Przykładowe przebiegi czasowe sygnału wyjściowego układu o złożonej strukturze, jak również modeli nieliniowych blokowo-zorientowanych przedstawiono na Rys. 4.15.

Przykładowe odpowiedzi czasowe modelu Hammersteina opartego na koncepcji inwersyjnego modelowania OBF przy braku dostępności sygnału pomiarowego z modelowanego procesu zostały przedstawione na Rys. 4.16.

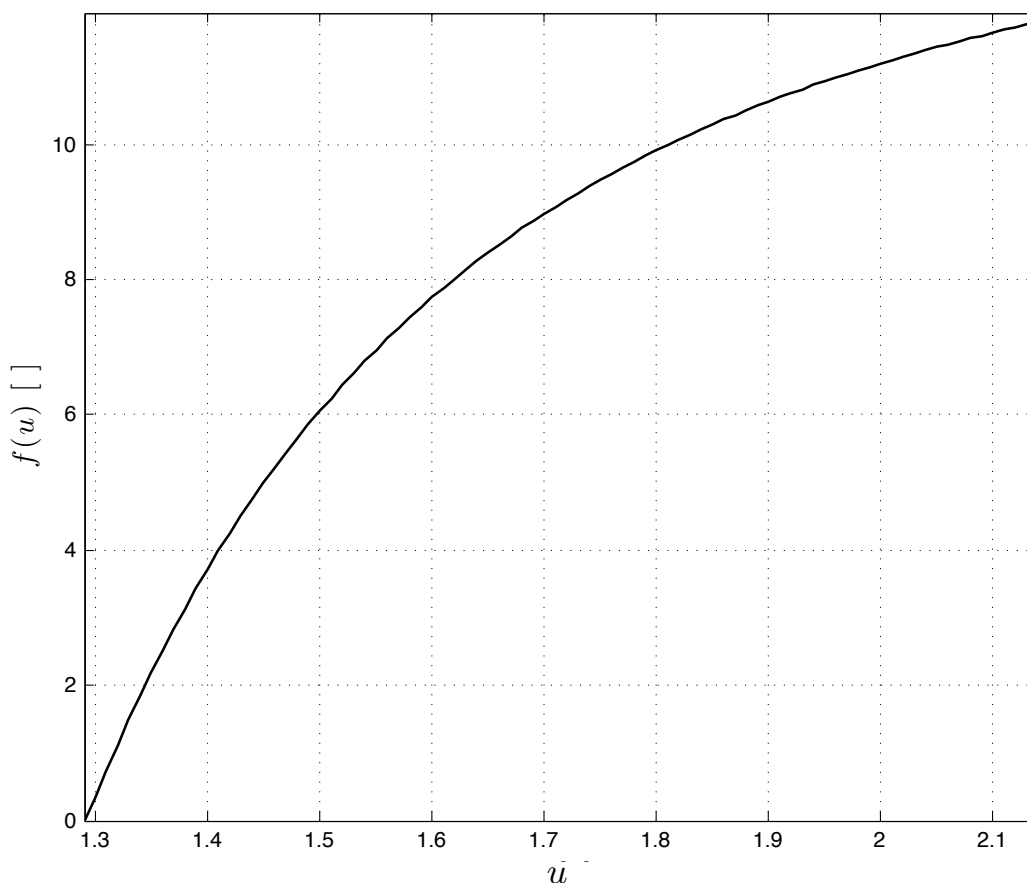


Rys. 4.15. Przebiegi czasowe poszczególnych nieliniowych modeli blokowo-zorientowanych.



Rys. 4.16. Charakterystyka czasowa inwersyjnego modelu Hammersteina (czerwony) i rzeczywistego obiektu (czarny).

Jak można zauważyć na Rys. 4.15, modelowanie inwersyjne OBF jest bardzo efektywne w zadaniach predykcji jedno/kilkukrokowej przy dostępności bieżących sygnałów pomiarowych z modelowanego obiektu. Przy braku dostępności tych sygnałów model ten znacznie ustępuje „klasycznemu” układowi Hammersteina (zostało to przedstawione na Rys. 4.16). Ponadto należy podkreślić, że modele o strukturze błędu równaniowego nie są odporne na silne zakłócenia modelowanego procesu, jak ma to miejsce w przypadku analizowanego systemu. Jego zaletą jest z kolei możliwość pracy *on-line* z estymatorem adaptacyjnym, stosowanym dla układów niestacjonarnych. W omawianym przypadku estymatory adaptacyjne nie będą konieczne, ze względu na stacjonarny charakter obiektu. W związku z powyższym, do dalszych prac zastosowano klasyczny model Hammersteina, w którym część dynamiczna jest opisana dyskretnym modelem Laguerre’a, natomiast część nieliniowa – funkcją odcinkowo-liniową. Na Rys. 4.17 przedstawiono charakterystykę nieliniową wyznaczonego modelu.



Rys. 4.17. Charakterystyka nieliniowa modelu Hammersteina.

Dobrano rząd modelu $M=15$ oraz dominujący biegun Laguerre’a $p=0.99$. W Tabeli 4.4 przedstawiono parametry wyznaczonego modelu.

Tabela 4.4. Parametry części dynamicznej modelu Hammersteina.

Parametr	Wartość
c_1	0.032411
c_2	0.064588
c_3	-0.013113
c_4	-0.03183
c_5	0.035843
c_6	-0.0195
c_7	-0.0068094
c_8	0.017732
c_9	-0.017878
c_{10}	0.013325
c_{11}	-0.0066533
c_{12}	0.0058186
c_{13}	0.0093445
c_{14}	-0.018073
c_{15}	0.0060531

4.4. Szacowanie wartości tlenu nadmiarowego w oparciu o sygnały pośrednie

Jak pokazują badania prezentowane we wcześniejszych rozdziałach pracy, najbardziej efektywne sterowanie powinno być oparte na stabilizacji stężenia tlenu nadmiarowego O_2 lub ściśle z nim skorelowanego stężenia CO_2 . Jak zostało to przedstawione w rozdziale opisującym budowę systemu pomiarowego (Rozdział 3), pomiaru stężenia tlenu w warunkach przemysłowych dokonuje się w oparciu o sondę lambda pracującą z dedykowanym przetwornikiem pomiarowym. Takie rozwiązanie jest optymalne z punktu widzenia jakości pomiaru tlenu, jednakże istotnie podnosi koszty instalacji (sonda lambda z przetwornikiem pomiarowym to koszt sięgający 1500-2000 PLN). Ponadto uwarunkowania technologiczne wiążą się z koniecznością instalacji elementu pomiarowego na wylocie kotła (w tzw. czopuchu), co wprowadza dodatkowe opóźnienie sygnałów pomiarowych. Pomiar stężenia tlenu nadmiarowego w samej komorze spalania istotnie zmniejszałby stałą czasową układu, a przez to poprawiał jakość regulacji, jednakże nie było to możliwe z przyczyn technologicznych. Dlatego w praktycznych aplikacjach interesujące wydaje się być zagadnienie szacowania stężenia tlenu na podstawie innych sygnałów pomiarowych rejestrowanych w systemie. W literaturze można znaleźć zasadniczo dwie główne metody, w których regulacja procesem spalania lub szacowanie stężenia tlenu nadmiarowego opiera się na innych sygnałach pośrednich:

- W pracach [HrS11, HSu11, KBL09, Nus99, VTB02] autorzy wykazują, że istnieje możliwość efektywnego szacowania wartości tlenu w oparciu o pomiar temperatury w górnej części kotła. Wybór umiejscowienia czujnika w tym obszarze jest uzasadniony tym, że pomiar odbywa się w pobliżu procesu spalania, więc opóźnienie jest znikome. Jednocześnie pewna odległość od płomienia ogranicza jego bezpośredni wpływ na wartość mierzonej temperatury. W ramach bieżącej pracy czujniki temperatury zostały umieszczone również w najwyższej części komory i przy wejściu spalin do wymiennika, a także bezpośrednio w płomieniu.
- W pracach [PiM12, Nus99] autorzy opierają układ sterowania na pomiarze ciśnienia w komorze spalania. Celem stosowania takiego układu regulacji jest utrzymywanie stałej wartości podciśnienia w komorze spalania. W bieżącej pracy podczas wykonywania serii pomiarowych dokonano rejestracji podciśnienia w czopuchu oraz komorze spalania (względem ciśnienia atmosferycznego), a także ciśnień różnicowych między poszczególnymi obszarami komory spalania. W dalszej części pracy poddano analizie wyniki pomiarów celem wyznaczenia zależności między wartością podciśnienia a stężeniem tlenu reszkowego w spalinach.

4.4.1. Określanie stężenia tlenu nadmiarowego na podstawie temperatury w różnych punktach kotła

Jak zostało przedstawione w Rozdziale 3, układ pomiarowy umożliwia pomiar temperatury w czterech punktach kotła:

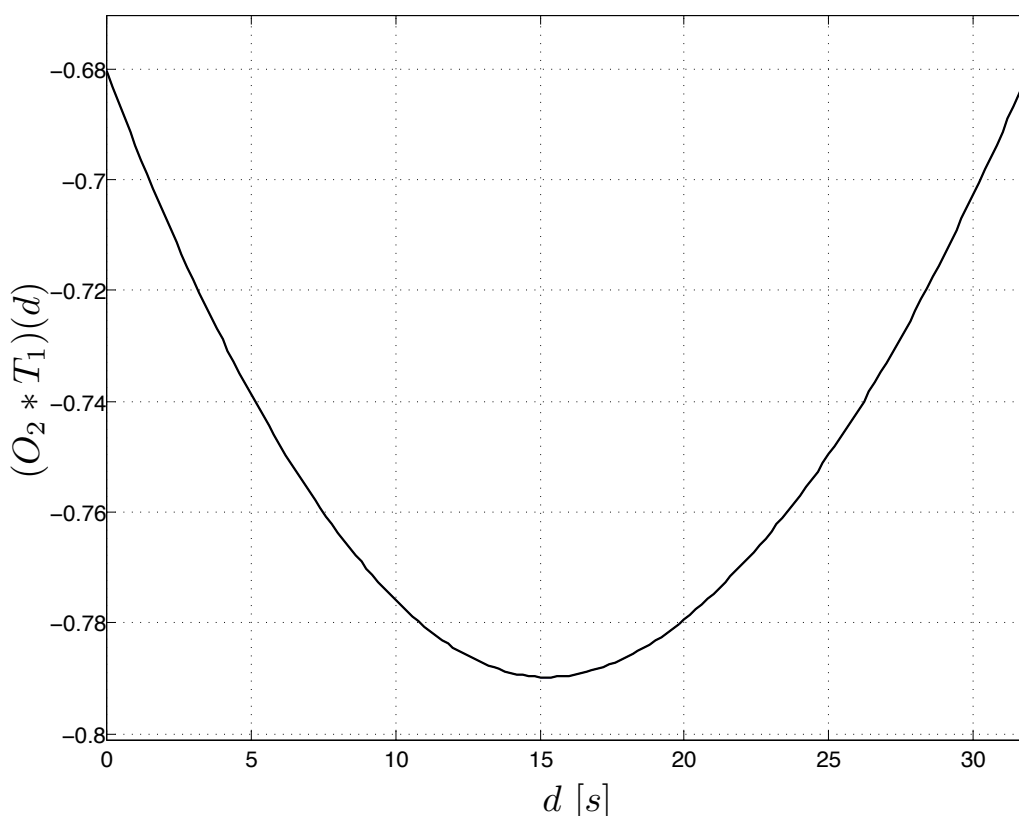
- w koszyku, w którym mierzona jest temperatura w dolnej części strefy płomienia,
- ok. 30 cm nad koszykiem, tj. w połowie wysokości komory spalania, czyli bezpośrednio nad płomieniem,
- w górnej części komory spalania,
- na wejściu spalin do wymiennika ciepła.

W pracy poddano badaniom zależności między wartościami temperatury dla wszystkich punktów pomiarowych a stężeniem tlenu. Ze względu na fakt, że wnioski z analizy dla wszystkich punktów pomiarowych są podobne, w ramach pracy przedstawiono wyłącznie przykładowe rezultaty dla temperatury mierzonej w koszyku. Wyniki te mogą zostać łatwo interpolowane na pozostałe punkty pomiarowe.

Na Rys. 4.18 przedstawiono funkcję korelacji wzajemnej między wskazaniem temperatury nad koszykiem $T_1(t)$ a stężeniem $O_2(t)$ zdefiniowanej jako

$$(O_2(t) * T_1(t))(d) = \int_{i=0}^{\infty} O_2(t) T_1(t+d) dt \quad (4.70)$$

gdzie d oznacza opóźnienie sygnału T_1 w stosunku do O_2 .



Rys. 4.18. Funkcja korelacji wzajemnej między O_2 a T_1 .

Na Rys. 4.18 można zobaczyć, że wartość temperatury jest silnie skorelowana ze stężeniem tlenu w spalinach. Zależność ta ma charakter statyczny, ale ekstremum funkcji korelacji wskazuje na przesunięcie czasowe między pomiarami temperatury a O_2 . Ponieważ pomiar temperatury dokonywany jest w komorze spalania, a pomiar tlenu realizowany jest znacznie później, za wymiennikiem ciepła, to pomiar O_2 powinien być opóźniony względem temperatury, a jest odwrotnie. Jest to podyktowane dużymi stałymi czasowymi termoelementów (przedstawionych w Podrozdziale 3.2.3). Ostatecznie zależność $O_2=f(T_1)$ opisano rozwinięciem wielomianowym z uwzględnieniem przesunięcia czasowego

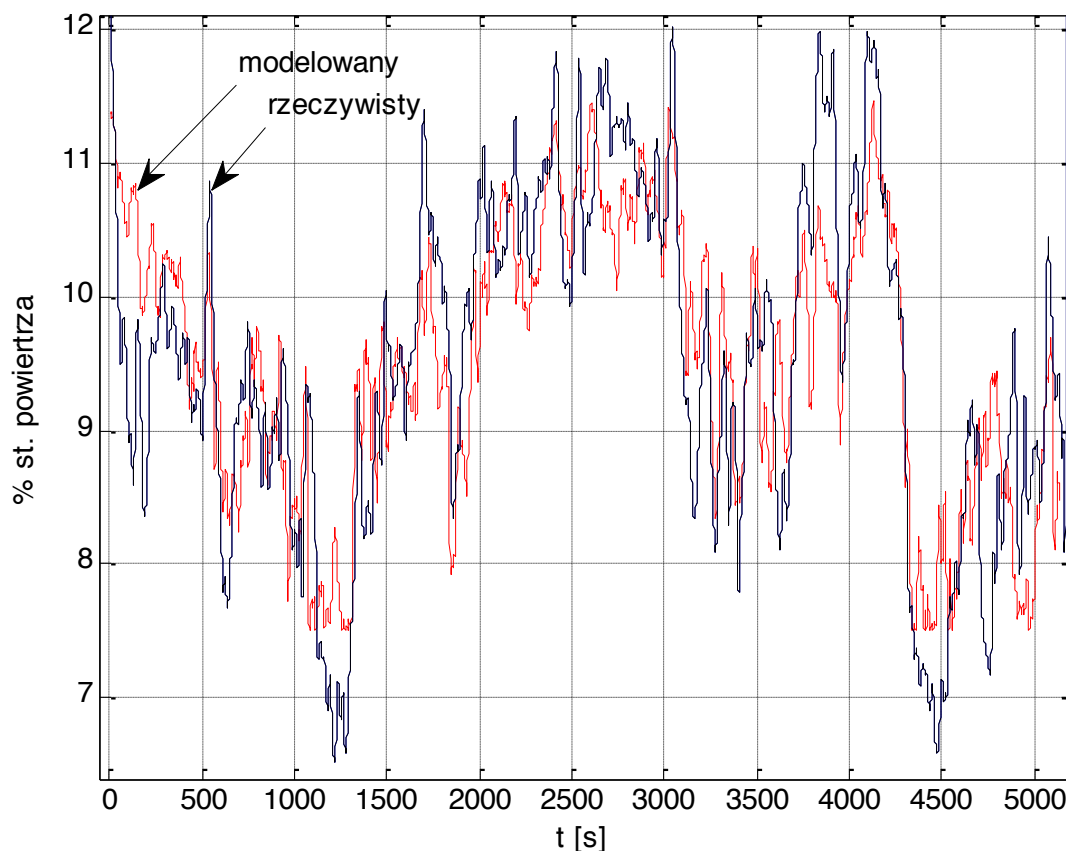
$$\hat{O}_2(t) = w_k T_1^k(t-d) + w_{k-1} T_1^{k-1}(t-d) + \dots + w_1 T_1(t-d) + w_0 \quad (4.71)$$

gdzie d jest opóźnieniem a k rzędem użytego wielomianu. W pracy eksperymentalnie dobrano rząd rozwinięcia wielomianowego na $k = 3$, natomiast opóźnienie $d = -15$ jest wartością ekstremum funkcji korelacji wzajemnej. W procesie estymacji otrzymano parametry przedstawione w Tabeli 4.5.

Tabela 4.5. Parametry wielomianu wyznaczającego $O_2=f(T_1)$.

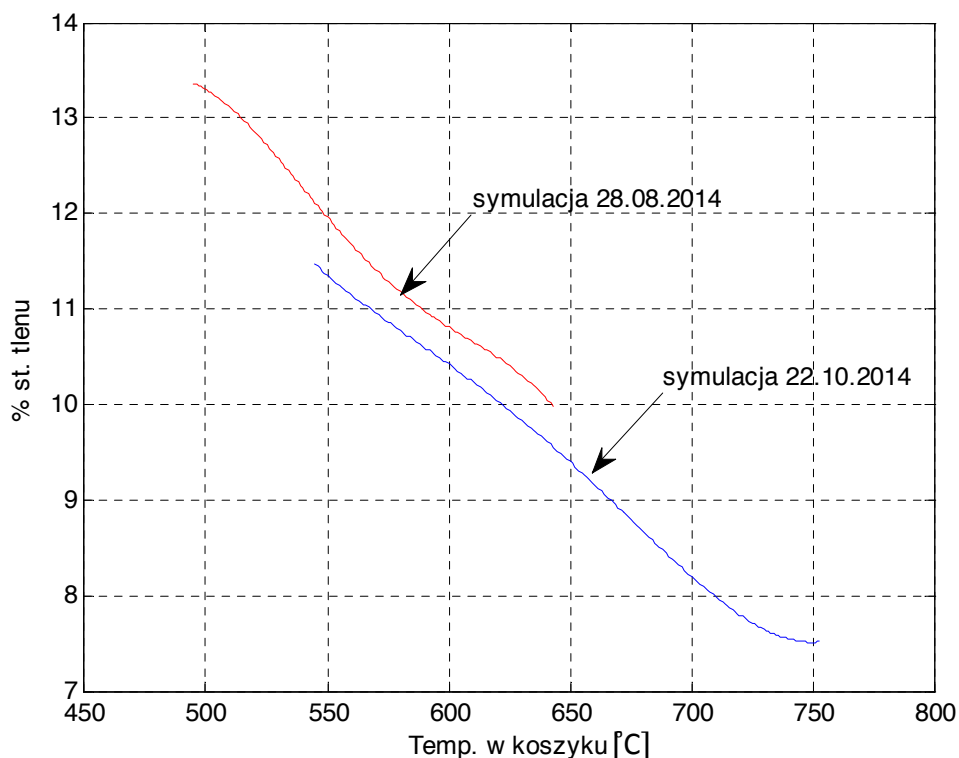
w_3	w_2	w_1	w_0
1.4031e-6	-2.8787e-3	1.9422	-418.67

Fragment rzeczywistego przebiegu tlenu i modelowanego z zastosowaniem modelu przedstawionego w Tabeli 4.5 przedstawiono na Rys. 4.19.



Rys. 4.19. Rzeczywisty i modelowany przebieg czasowy stężenia tlenu.

Jak można zauważyć na Rys. 4.19, model dobrze odzwierciedla rzeczywisty proces w ramach badanej serii pomiarowej, dlatego wyniki mogą wskazywać, że pomiar temperatury mógłby z powodzeniem zastępować pomiar O_2 . Jednak badania wykonane w późniejszych seriach pomiarowych wykazały, że zależność opisująca O_2 w funkcji temperatury T_1 jest zmienna w czasie. Zostało to przedstawione na Rys. 4.20, który przedstawia optymalne modele wielomianowe omawianej zależności dla różnych serii pomiarowych.



Rys. 4.20. Charakterystyki modeli wielomianowych stężenia powietrza w funkcji temperatury w koszyku.

Rys. 4.20 pokazuje, że w badanym układzie zależność między stężeniem tlenu w spalinach a temperaturą w koszyku jest zmienna w czasie. Przedstawione wyniki zostały potwierdzone w wielu badaniach, w których zauważono, że zmianie podlega zarówno przesunięcie, jak również nachylenie funkcji. Dlatego wykorzystanie tego sygnału w celu szacowania stężenia tlenu wymagałoby opracowania algorytmu adaptacji modelu do zmian parametrów. Z drugiej strony należy podkreślić, że omawianą zależność w warunkach pracy można opisać funkcją liniową, co ułatwiłoby mechanizm adaptacji.

Należy zauważyć, że pomimo umiejscowienia pomiaru temperatury w komorze spalania daje on sygnał opóźniony o ok. 15 s w stosunku do pomiarów O_2 . Jest to podyktowane dużą stałą czasową zastosowanych termopar (do pomiaru tej wielkości stosowano termoparę o średnicy 5 mm). W przypadku termopar o średnicy 3 mm opóźnienie pomiarów temperatury spada do ok. 12 s, jednakże w dalszym ciągu taka wartość negatywnie wpływałaby na ewentualny proces regulacji. Dlatego w celu zastosowania pomiarów temperatury konieczne jest użycie czujników temperaturowych o bardzo niskich stałych czasowych.

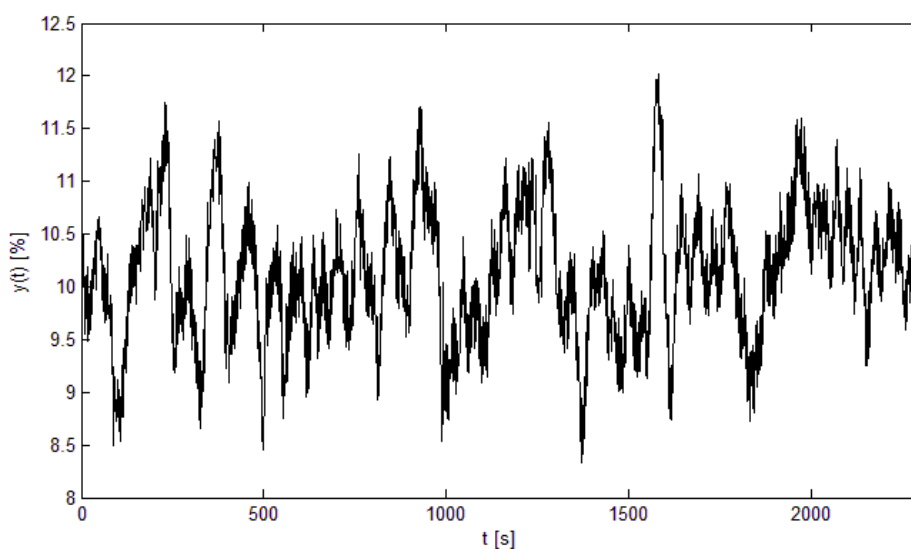
Podsumowując, wykorzystanie temperatur w procesie szacowania wartości tlenu nadmiarowego wymaga modyfikacji zarówno algorytmicznych (mechanizm adaptacji zmian) jak również technologicznych (zmiana czujników temperaturowych). Mimo tego zagadnienie to wydaje się być perspektywiczne i warte dalszych prac, które będą realizowane w przyszłości.

4.4.2. Analiza wykorzystania pomiarów ciśnienia w różnych punktach kotła

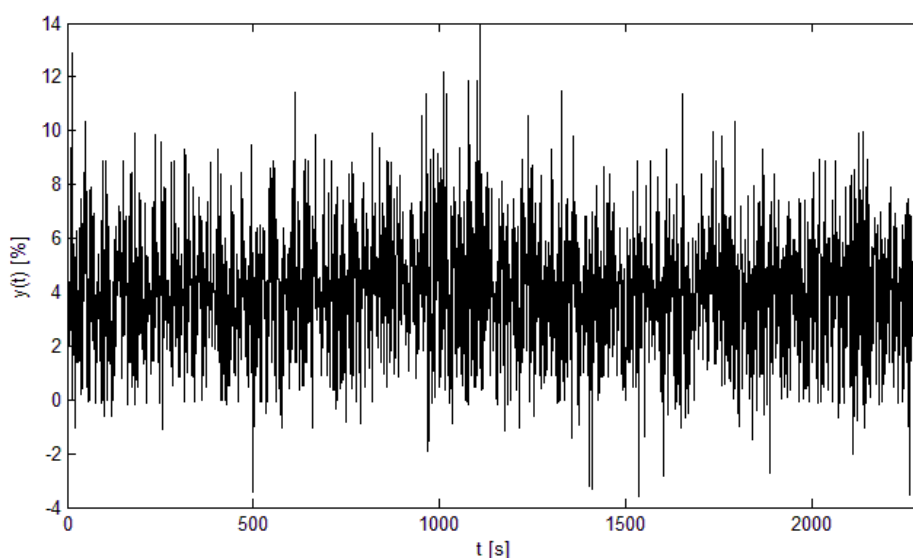
Autor w ramach pracy przeprowadził badania, których celem była analiza możliwości wykorzystania ciśnienia w różnych punktach kotła. Obejmowały one następujące sygnały

- podciśnienie w czopuchu kominowym,
- podciśnienie w komorze spalania,
- ciśnienie różnicowe między komorą spalania a wyjściem wentylatora,
- ciśnienie różnicowe między komorą spalania a czopuchem kominowym.

Przebiegi czasowe stężenia tlenu w spalinach oraz ciśnienia różnicowego między komorą spalania a czopuchem kominowym zostały przedstawione na Rys. 4.21 i 4.22.



Rys. 4.21. Przebieg czasowy stężenia tlenu w spalinach.



Rys. 4.22. Przebieg czasowy ciśnienia różnicowego między komorą spalania i czopuchem kominowym.

Na Rys. 4.22 można zobaczyć, że przebieg ciśnienia jest obarczony dużą składową stochastyczną. Korelacja między pomiarem stężenia tlenu i ciśnieniem różnicowym wynosi 0.012, przez co można wnioskować, że nie występuje żadna zależność między tymi sygnałami. W ramach badań sygnał poddano filtracji w celu redukcji silnych zakłóceń. W tym celu zastosowano filtr adaptacyjny 1 rzędu, w postaci

$$y(t) = \lambda_f y(t-1) + (1 - \lambda_f) u(t-1) \quad (4.72)$$

gdzie $y(t)$ i $u(t)$, $t=1,2,\dots$, oznaczają odpowiednio wejście i wyjście z filtra, natomiast λ_f określa dobierany eksperymentalnie współczynnik zapominania wykładniczego. W analizowanym przykładzie dobrano $\lambda_f=0.95$, dla którego korelacja ciśnienia różnicowego i stężenia tlenu wyniosła maksymalnie 0.15, co również wskazuje na brak istotnych zależności deterministycznych między tymi sygnałami. Ponadto w ramach pracy próbowano wyznaczać dynamiczną zależność między stężeniem tlenu a w/w ciśnieniem metodami identyfikacyjnymi z zastosowaniem modeli autoregresyjnych, jednakże również w tym przypadku nie otrzymano satysfakcjonujących wyników.

W pracy przeprowadzono również badania dla pozostałych sygnałów ciśnienia, jednakże dla nich także otrzymano podobne wyniki.

Podsumowując, w wyniku przeprowadzonych badań, których fragment został przedstawiony powyżej, można stwierdzić, że w przypadku analizowanego kotła pomiar ciśnienia w czopuchu nie może być efektywnie wykorzystany w zadaniu szacowania zawartości tlenu w spalinach. Podstawowym powodem jest wysoki poziom składowej stochastycznej, której filtracja 1) wprowadza dodatkowe opóźnienie mające negatywny wpływ na jakość sterowania oraz 2) usuwa część informacji dotyczącej składowej deterministycznej sygnału. Należy zaznaczyć, że w pracach [PiM12, Nus99] wykazywano efektywne zastosowanie ciśnienia w procesie sterowania, w przeciwieństwie do wniosków z w/w badań. Tak różne wnioski wynikać mogą z istotnych różnic w budowie między badanymi kotłami.

4.4.3. Analiza wykorzystania innych sygnałów pomiarowych

W ramach pracy poddano analizie zagadnienie szacowania zawartości tlenu w spalinach na podstawie innych sygnałów dostępnych pomiarowo w kotle. Poza wymienionymi w punktach 4.4.1 i 4.4.2 temperaturami i ciśnieniami, w pracy poddano analizie wpływ innych wielkości pomiarowych na stężenie tlenu resztkowego:

- ilości powietrza podawanego do kotła,
- jasności płomienia w procesie spalania.

W przypadku badania wpływu ilości powietrza podawanego do kotła na zawartość tlenu w spalinach, nie zauważono powiązań na tyle istotnych, aby pozwalały na szacowanie zawartości tlenu w spalinach.

Wstępne badania możliwości zastosowania jasności płomienia w szacowaniu stężenia tlenu w spalinach wykazały, że istnieje znaczące powiązanie między tymi wielkościami. Sygnał, który był otrzymywany z elementu światłoczułego posiada znaczą składową stochastyczną, która jednak w pewnych warunkach może zostać skutecznie filtrowana. Zaletą wykorzystania zaproponowanego sygnału jest bezpośredni pomiar intensywności przebiegu procesu spalania, który bez opóźnienia pozwoliłby na predykowanie przyszłych stanów stężenia tlenu nadmiarowego. Podstawowym problemem, jaki występował w omawianych pomiarach, była niewielka dokładność czujnika natężenia światła, związana z punktowym pomiarem jasności płomienia. Do bardziej wiarygodnych pomiarów konieczne jest zastosowanie czujnika (bądź układu czujników) obejmujących zasięgiem całą komorę spalania. Jest to zagadnienie, które z pewnością będzie rozpatrywane w dalszych pracach prowadzonych przez autora.

4.5. Podsumowanie

W bieżącym rozdziale przedstawiono szereg wyników związanych z modelowaniem kotła grzewczego małej mocy. W pierwszej kolejności opracowano model kotła jako systemu o złożonej strukturze, który zasadniczo był oparty na zależnościach fizykalnych występujących w procesie (Podrozdział 4.2). Następnie w Podrozdziale 4.3 model ten został zredukowany do modeli nieliniowych blokowo-zorientowanych, tj. układów Hammersteina i Wienera. Ostatecznie do dalszych prac nad projektowaniem układu sterowania zarekomendowano model Hammersteina, gdzie część liniowa jest oparta na dyskretnym modelu implementującym filtry Laguerre'a, natomiast nieliniowość jest modelowana funkcją odcinkowo-liniową. W ramach Podrozdziału 4.4 przeanalizowano możliwości zastosowania innych sygnałów pomiarowych jako alternatywnych metod szacowania stężenia tlenu w spalinach. Poddano w tym celu analizie temperatury i ciśnienia w różnych miejscach kotła. Najbardziej perspektywicznymi w tym zakresie sygnałami wydają się być pomiary temperatury w komorze spalania. Jednak wykorzystanie tego sygnału wymaga dalszych prac nad modyfikacjami zarówno algorytmicznymi, jak również technologicznymi.

5. Implementacja układu sterowania kotłem

Celem bieżącego rozdziału jest implementacja modelu zaproponowanego w Rozdziale 4 w zadaniu sterowania kotłem *Orligno* 400. W tym celu opracowany zostanie algorytm sterowania predykcyjnego z wydłużonym horyzontem predykcji (ang. *Extended Horizon Predictive Control* – EHPC), który będzie bazował na modelu Hammersteina z modelem dynamicznym opartym na dyskretnych filtrach Laguerre’a. Zastosowany model został szczegółowo przedstawiony w Podrozdziale 4.3. W bieżącym rozdziale w pierwszej kolejności zostanie opracowany predyktor przyszłych stanów modelu pracujący w oparciu o w/w model sprowadzony do przestrzeni stanu (Podrozdział 5.1), który następnie zostanie zaimplementowany w algorytmie EHPC w Podrozdziale 5.2. Do wyznaczania wartości sterowań układu konieczna będzie znajomość wektora stanu modelu, dlatego w Podrozdziale 5.3 przedstawiono implementację obserwatora stanu. Opracowany w 3 pierwszych podrozdziałach układ sterowania zaimplementowano do sterowania w pierwszej kolejności modelem procesu, a następnie rzeczywistym obiektem (Podrozdział 5.4). Podsumowanie z badań zostało krótko zestawione w Podrozdziale 5.5.

5.1. Predyktor

Wartość wyjścia modelu rozpatrywanego w Podrozdziale 4.3 modelu wyznacza następujące równanie

$$y(t) = \sum_{j=1}^M c_j L_j(q)x(t) = \sum_{j=1}^M c_j v_j(t) \quad (5.1)$$

gdzie $L_i(q)$ są filtrami Laguerre’a, c_i , $i = 1, \dots, M$ są parametrami modelu, $x(t) = f(u(t))$ jest wewnętrznym sygnałem modelu Hammersteina, natomiast $v_j(t) = L_j(q)x(t)$ są wyjściami filtrów Laguerre’a w czasie t . Predyktor wyjścia z układu w czasie $t + h$ wyznacza zależność

$$y(t + h) = \sum_{j=1}^M c_j v_j(t + h) \quad (5.2)$$

gdzie $v_j(t + h)$, $j = 1, \dots, M$, są wartościami wyjść filtrów Laguerre’a w czasach $t + h$. W związku z powyższym określenie predyktora h -krokowego sprowadza się do wyznaczenia predyktorów poszczególnych wyjść filtrów Laguerre’a. Wyznaczenie wartości $v_1(t + h)$ jest najprostsze i sprowadza się do wyznaczenia h -krokowego predyktora dla układu pierwszego rzędu (patrz (4.41))

$$v_1(t + h) = p v_1(t + h - 1) + k x(t + h - 1) \quad (5.3)$$

Implementując równanie (5.3) dla kroków $t, t + 1, \dots, t + h$ otrzymuje się zależność

$$v_1(t + h) = \sum_{i=1}^h k p^{i-1} x(t + h - i) + p^h v_1(t) \quad (5.4)$$

Wyznaczenie predyktorów dla wyjść filtrów $v_i(t + h)$, $i = 2, \dots, M$, jest bardziej skomplikowane z powodu kaskadowej budowy modelu Laguerre’a. Dzięki wykorzystaniu faktoryzacji filtrów

Laguerre'a prezentowanej w pracach [Sta12, Sta13] wartość predyktora $v_{i+1}(t+h)$ wyznaczyć można na podstawie predyktora wyjścia poprzedniego filtra $v_i(t+h)$

$$v_{i+1}(t+h) = \frac{kq^{-1}}{1-pq^{-1}} \left(\frac{-p+q^{-1}}{1-pq^{-1}} \right)^i x(t+h) \quad (5.5)$$

$$= \frac{-p+q^{-1}}{1-pq^{-1}} v_i(t+h) \quad (5.6)$$

$$= \left(-p + \frac{k^2}{1-pq^{-1}} \right) v_i(t+h) \quad (5.7)$$

Biorąc pod uwagę równanie (5.7) predyktor dla filtra $v_i(t+h)$ można wyznaczyć na podstawie zależności

$$v_{i+1}(t+h) = \sum_{i=1}^h k^2 p^{i-1} v_i(t+h-i) + p^h v_{i+1}(t) \quad (5.8)$$

Należy zwrócić uwagę w równaniu (5.8), że w celu wyznaczenia predyktora $v_{i+1}(t+h)$ wykorzystywany jest bank predyktorów wyjścia filtra v_i dla czasów $t+1, t+2, \dots, t+h$, tj. sygnałów $[v_i(t+h) v_i(t+h-1) \dots v_i(t+1)]$. W związku z powyższym wyznaczenie h -krokowego predyktora wyjścia całego modelu Laguerre'a $y(t+h)$ na podstawie równania (5.2) wymaga rekursywnego wyznaczenia odpowiedzi filtrów $v_i(t+j)$ dla $i = 1, 2, \dots, M$ w całym rozpatrywanym horyzoncie predykcji $j = 1, 2, \dots, h$. Konieczność stosowania metod rekursywnych utrudnia analityczne wyznaczenie sterowania w regulacji predykcyjnej.

Alternatywnie, wyjście z modelu Laguerre'a może również zostać przedstawione za pomocą równania macierzowego [HVW05, Sta13]

$$V(t+1) = \tilde{\Omega}V(t) + \underline{B}x(t) \quad (5.9)$$

$$y(t) = \underline{C}V(t) \quad (5.10)$$

gdzie

$$V(t+1) = [v_1(t+1) \ v_2(t+1) \ \dots \ v_M(t+1)]^T \quad (5.11)$$

$$\tilde{\Omega} = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 & \dots & 0 \\ k^2 & p & 0 & \dots & 0 \\ (-p)k^2 & k^2 & p & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-p)^{M-2}k^2 & (-p)^{M-3}k^2 & (-p)^{M-4}k^2 & \dots & p \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$\underline{B} = [k \ (-p)k \ (-p)^2k \ \dots \ (-p)^{M-1}k]^T \quad (5.13)$$

$$\underline{C} = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_M] \quad (5.14)$$

gdzie $k = \sqrt{1-p^2}$. Równania (5.9) i (5.10) reprezentują model Laguerre'a w przestrzeni stanu. W tym przypadku bardzo łatwo wyznaczyć predyktor wyjścia $y(t+h)$

$$y(t+h) = \underline{C}V(t+h) \quad (5.15)$$

gdzie $V(t+h) = [v_1(t+h) \ v_2(t+h) \ \dots \ v_M(t+h)]^T$ jest wektorem gromadzącym h -krokowe predyktory wyjść z wszystkich filtrów Laguerre'a, wówczas

$$V(t+h) = \tilde{\Omega}V(t+h-1) + \underline{B}x(t+h-1) \quad (5.16)$$

Implementacja równania (5.16) dla czasów $t+h-1, t+h-2, \dots, t+1$ prowadzi do następującej zależności

$$V(t+h) = \tilde{\Omega}^h V(t) + \sum_{i=1}^h \underline{B} \tilde{\Omega}^{i-1} x(t+h-i) \quad (5.17)$$

Ostatecznie uwzględniając równanie wyjścia modelu (5.10) w zależności (5.17) otrzymuje się

$$y(t+h) = \underline{C} \tilde{\Omega}^h V(t) + \sum_{i=1}^h \underline{C} \tilde{\Omega}^{i-1} \underline{B} x(t+h-i) \quad (5.18)$$

Należy zaznaczyć, że wejściem predyktora jest sygnał $x(t+h-i)$, $i = 1, \dots, h$, wyznaczany przez model części nieliniowej systemu Hammersteina, dlatego z sygnałem wejściowym do systemu $u(t+h-i)$, $i = 1, \dots, h$, wiąże go zależność

$$x(t+h-i) = \hat{f}(u(t+h-i)), \quad i = 1, \dots, h \quad (5.19)$$

Równanie (5.19) wyznaczać może dowolny model części nieliniowej. W Podrozdziale 4.3 analizowano dwa modele nieliniowości w postaci rozwinięcia wielomianowego i funkcji odcinkowo-liniowej, przy czym ostatecznie (ze względu na łatwą odwracalność) zdecydowano się na funkcję odcinkowo-liniową. W związku z powyższym ostateczne równanie (5.18) można przedstawić w postaci

$$y(t+h) = \underline{C} \tilde{\Omega}^h V(t) + \sum_{i=1}^h \underline{C} \tilde{\Omega}^{i-1} \underline{B} \hat{f}(u(t+h-i)) \quad (5.20)$$

gdzie $\hat{f}(\cdot)$ reprezentuje model w postaci funkcji odcinkowo-liniowej.

5.2. Sterowanie EHPC

Sterowanie predykcyjne z rozszerzonym horyzontem (ang. *Extended Horizon Predictive Control* – EHPC) jest najprostszym i najbardziej efektywnym obliczeniowo algorytmem sterowania predykcyjnego [KoK94, Lat99, YdK85]. W przeciwieństwie do bardziej ogólnych algorytmów sterowania predykcyjnego, jak np. GPC (ang. *Generalized Predictive Control*) [CaB99, KwH05], wartość sterowania nie jest wyznaczana w oparciu o minimalizację wagowej funkcji strat, obejmującej energię sterowania i uchyb regulacji, lecz w oparciu o proste kryterium jakości sterowania

$$\min_{u(k)} [y_{ref}(t+h) - y(t+h)] \quad (5.21)$$

przy założeniu

$$u(t) = u(t+1) = \dots = u(t+h-1) = u \quad (5.22)$$

gdzie $u = u(t)$ jest wartością wejściową do obiektu sterowania. Zaletą algorytmu sterowania EHPC jest jego prostota obliczeniowa, przy możliwości sterowania obiektami nieminimalnofazowymi (z samowyrównaniem).

Biorąc pod uwagę, że zależność między wartością $u(t)$ i $x(t)$ w modelu Hammersteina jest opisana statyczną zależnością nieliniową, wówczas

$$x(t) = f(u(t)) = x(t+1) = \dots = x(t+h-1) = x \quad (5.23)$$

Uwzględniając zależność (5.23) w równaniu predykcji (5.18) otrzymamy

$$y(t+h) = \underline{C}\tilde{\Omega}^h V(t) + \sum_{i=1}^h \underline{C}\tilde{\Omega}^{i-1} \underline{B}x \quad (5.24)$$

W sterowaniu predykcyjnym określamy wartość referencyjną wyjścia, którą system ma osiągnąć w czasie równym horyzontowi predykcji $y_{ref} = y(t+h)$. Wówczas równanie (5.24) przyjmuje postać

$$y_{ref} = \underline{C}\tilde{\Omega}^h V(t) + \sum_{i=1}^h \underline{C}\tilde{\Omega}^{i-1} \underline{B}x \quad (5.25)$$

gdzie $x = x(t)$ jest poszukiwaną wartością wejściową do liniowego modelu dynamicznego. Wyznaczanie sterowania x wymaga przeprowadzenia elementarnych przekształceń macierzowych i ostatecznie prowadzi do rezultatu

$$x = \left(y_{ref} - \underline{C}\tilde{\Omega}^h V(t) \right) \left(\sum_{i=1}^h \underline{C}\tilde{\Omega}^{i-1} \underline{B} \right)^{-1} \quad (5.26)$$

Biorąc pod uwagę, że równanie (5.26) wyznacza wejście części liniowej oraz uwzględniając równanie (5.19) można przedstawić zależność (5.26) w formie

$$\hat{f}(u) = \left(y_{ref} - \underline{C}\tilde{\Omega}^h V(t) \right) \left(\sum_{i=1}^h \underline{C}\tilde{\Omega}^{i-1} \underline{B} \right)^{-1} \quad (5.27)$$

i ostatecznie równanie wyznaczające wartość sterowania jest następujące

$$u = \hat{f}^{-1} \left[\left(y_{ref} - \underline{C}\tilde{\Omega}^h V(t) \right) \left(\sum_{i=1}^h \underline{C}\tilde{\Omega}^{i-1} \underline{B} \right)^{-1} \right] \quad (5.28)$$

gdzie $\hat{f}^{-1}(\cdot)$ jest odwrotnością aproksymacji części nieliniowej obiektu Hammersteina.

W omawianym układzie występują zasadniczo dwa problemy:

- 1) Konieczność wyznaczania odwrotności aproksymacji funkcji nieliniowej $\hat{f}^{-1}(\cdot)$, która nakłada dodatkowe wymagania na charakterystykę nieliniową obiektu, tj. funkcja nieliniowa musi być odwracalna i monotoniczna w rozpatrywanym zakresie. Można zobaczyć w Podrozdziale 4.3, że rozpatrywana charakterystyka spełnia wszystkie powyższe wymagania. Ponadto aproksymacja części nieliniowej została opisana za pomocą modelu odcinkowo-liniowego, co skutkuje możliwością natychmiastowego wyznaczenia odwrotności funkcji.
- 2) W równaniu (5.28) (co jest skutkiem równania (5.26)) do wyznaczania wartości sygnału sterującego $u(t)$ wykorzystywny jest wektor stanu regulowanego modelu $V(t)$. W omawianym układzie jest to wielkość niemierzalna. Co więcej heurystyczna struktura modelu skutkuje brakiem zależności między stanami modelu a fizycznymi wielkościami występującymi w rzeczywistym procesie. Dlatego konieczne jest odwzorowywanie stanu modelu $\hat{V}(t)$ na podstawie sygnałów wejściowo-wyjściowych procesu $u(t)$, $y(t)$. Problem ten zostanie rozwiązany z zastosowaniem obserwatora stanu przedstawionego w następnym punkcie.

5.3. Obserwator stanu

Zagadnienie odwzorowywania niemierzalnych stanów procesu jest dobrze opisane w literaturze zajmującej się zagadnieniami regulacji. Jest to skutek faktu, że w wielu klasycznych metodach regulacji opartych na modelu układu, stan obiektu jest jedną z podstawowych wielkości wejściowych algorytmów wyznaczających wartości sterowań. Najbardziej popularnymi obserwatorami stanu są obserwatory Luenbergera [Lue71] oraz ich rozwinięcia w postaci filtrów Kalmana [ZaE00]. Ponadto w literaturze stosuje się również metody stosujące sekwencyjną metodę Monte-Carlo [Che03] i wiele innych [CJN13, HiD09].

W pracy wykorzystany zostanie obserwator stanu Luenbergera i filtr Kalmana.

5.3.1. Obserwator Luenbergera

Przyjmując założenie, że regulowany model (5.9), (5.10) jest obserwowalny, metodę Luenbergera pełnego rzędu opisuje zależność

$$\hat{V}(t+1) = \tilde{\Omega}\hat{V}(t) + L(y(t) - \underline{C}\hat{V}(t)) + \underline{B}x(t) \quad (5.29)$$

gdzie L oznacza macierz wzmocnień obserwatora stanu. Uwzględniając nieliniowość występującą na wyjściu modelu (model Hammersteina) otrzymamy równanie

$$\hat{V}(t+1) = \tilde{\Omega}\hat{V}(t) + L(y(t) - \underline{C}\hat{V}(t)) + \underline{B}\hat{f}(u(t)) \quad (5.30)$$

$$\hat{V}(t+1) = (\tilde{\Omega} - L\underline{C})\hat{V}(t) + Ly(t) + \underline{B}\hat{f}(u(t)) \quad (5.31)$$

Wartość macierzy wzmocnień L jest dobierana eksperymentalnie. Jej wartość ma kluczowe znaczenie w zadaniu rekonstrukcji stanu procesu. Warunkiem koniecznym, który musi spełnić L jest stabilność obserwatora, wg. którego wszystkie wartości własne równania charakterystycznego

$$\det(Iz - (\tilde{\Omega} - L\underline{C})) = 0 \quad (5.32)$$

muszą się znajdować wewnątrz koła jednostkowego. Spełnienie tego warunku gwarantuje, że błąd odwzorowania stanu obiektu $e(t) = V(t) - \hat{V}(t)$ jest zbieżny do zera. Wysokie 'stabilne' wartości wzmocnień L prowadzą do szybkiej zbieżności odwzorowania $\hat{V}(t)$ do wartości rzeczywistych $V(t)$, jednakże jest to okupione dużymi błędami w początkowych krokach pracy algorytmu. Niskie wartości L prowadzą do niższych błędów w pierwszej fazie pracy, ale w zamian cechują się wolniejszą zbieżnością algorytmu. Konieczność eksperymentalnego doboru optymalnej wartości wzmocnień L jest istotną wadą, która sprawia, że obecnie znacznie częściej jako obserwator stanu stosuje się filtry Kalmana.

5.3.2. Filtr Kalmana

Rozwinięciem obserwatora Luenbergera jest zastosowanie teorii filtru Kalmana. Metoda ta opiera się na stochastycznej wersji równania modelu (5.9), (5.10) wyznaczanego przez zależność [ZaE00]

$$V(t+1) = \tilde{\Omega}V(t) + \underline{B}x(t) + \Gamma w(t) \quad (5.33)$$

$$y(t) = \underline{C}V(t) + \gamma(t) \quad (5.34)$$

gdzie $w(t)$ i $\gamma(t)$ oznaczają odpowiednio zakłócenia procesu i wyjścia układu. Zakładając, że zakłócenia $w(t)$ i $\gamma(t)$ są nieskorelowanymi zakłóceniami o rozkładach normalnych i zerowej średniej, wówczas wartości kowariancji tych sygnałów określa zależność

$$E\{w(k)w(i)\} = \begin{cases} R_w & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad (5.35)$$

$$E\{\gamma(k)\gamma(i)\} = \begin{cases} R_v & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad (5.36)$$

W tym przypadku obserwator stanu, tak jak w obserwatorze Luenbergera, wyznacza równanie (5.31), jednak do określania macierzy wzmocnień $L = L(t)$ zastosowany został filtr Kalmana. Użycie filtru Kalmana prowadzi do optymalnego wyznaczania macierzy wzmocnień układu, a przez to do optymalnego procesu określania stanu układu $\hat{V}(t)$. Wartości wzmocnień układu są zmienne w czasie i są wyznaczone rekursywnie dla każdego kroku pracy algorytmu

$$M(t+1) = \tilde{\Omega}P(k)\Omega^T + \underline{B}R_w\underline{B}^T \quad (5.37)$$

$$P(t+1) = M(t+1) - M(t+1)\underline{C}^T(\underline{C}M(t+1)\underline{C}^T + R_v)^{-1}\underline{C}M(t+1) \quad (5.38)$$

$$L(t+1) = P(t+1)\underline{C}^T R_v^{-1} \quad (5.39)$$

Ostatecznie procedura obserwacji stanu realizowana jest rekursywnie *on-line* od wartości początkowych $\hat{V}(0)$ oraz $P(0)$. Należy podkreślić, że obserwator oparty na filtrze Kalmana jest optymalny dla rozkładów normalnych sygnałów stochastycznych o zerowych średnich.

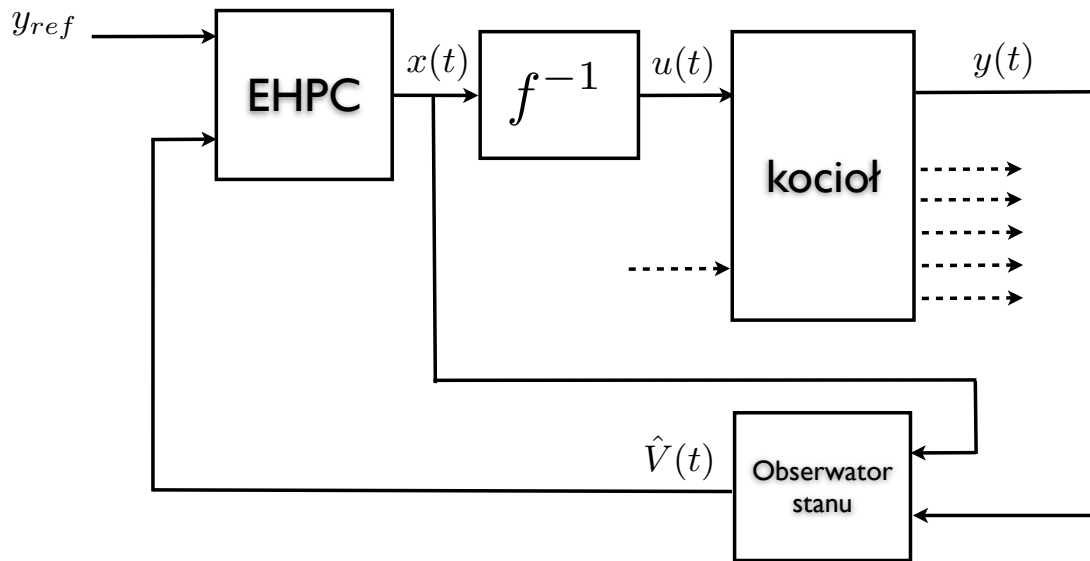
Alternatywną metodą sterowania predykcyjnego jest oparcie się na modelu procesu sprowadzonego do postaci transmitancyjnej. Wówczas sterowanie predykcyjne może opierać się na transmitancji modelu w postaci

$$G_M(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \underline{C}(zI - \tilde{\Omega})^{-1}\underline{B} \quad (5.40)$$

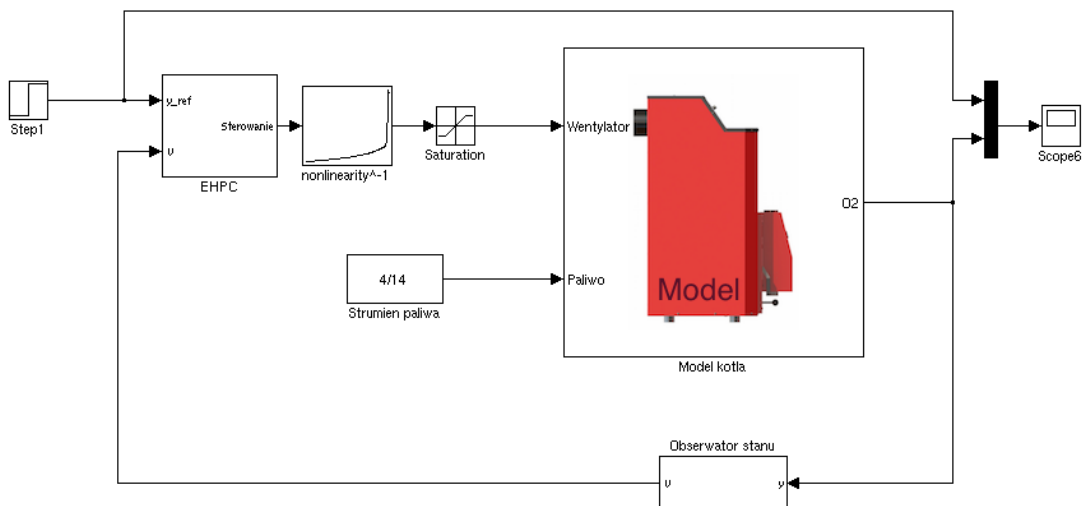
gdzie $G_M(z)$ jest modelem (5.9), (5.10) przedstawionym w postaci transmitancji dyskretnej. Prezentowane rozwiązanie posiada zarówno pewne zalety, jak i wady. Podstawową jego zaletą jest wejściowo/wyjściowy opis układu, przez co nie jest konieczne stosowanie obserwatora stanu, gdyż predyktor wyznaczany jest na podstawie sygnałów wejściowych i wyjściowych z systemu. Jednakże z drugiej strony sprowadzenie modelu wysokiego rzędu, jakim jest rozpatrywany w pracy model Laguerre'a, do postaci transmitancyjnej może wiązać się z szeregiem problemów numerycznych. Dlatego w pracy sterowanie oparto na modelu w przestrzeni stanu.

5.4. Implementacja układu sterowania

Schemat blokowy układu regulacji kotłem został przedstawiony na Rys. 5.1. Implementacja przedstawionego na Rys. 5.1 układu sterowania w pierwszej kolejności zostanie przeprowadzona na modelu procesu opracowanym w Rozdziale 4. Pozwoli ona na ocenę, czy zaproponowane algorytmy sterowania działają poprawnie. Eksperyment ten zostanie przeprowadzony zarówno w warunkach deterministycznych jak również stochastycznych. Pozytywny wynik eksperymentu uzyskany dla regulacji modelem procesu pozwoli na implementację układu regulacji na rzeczywistym obiekcie. Wnioski z badań zostaną przedstawione w odrębnych punktach.



Rys. 5.1. Schemat blokowy algorytmu sterowania.



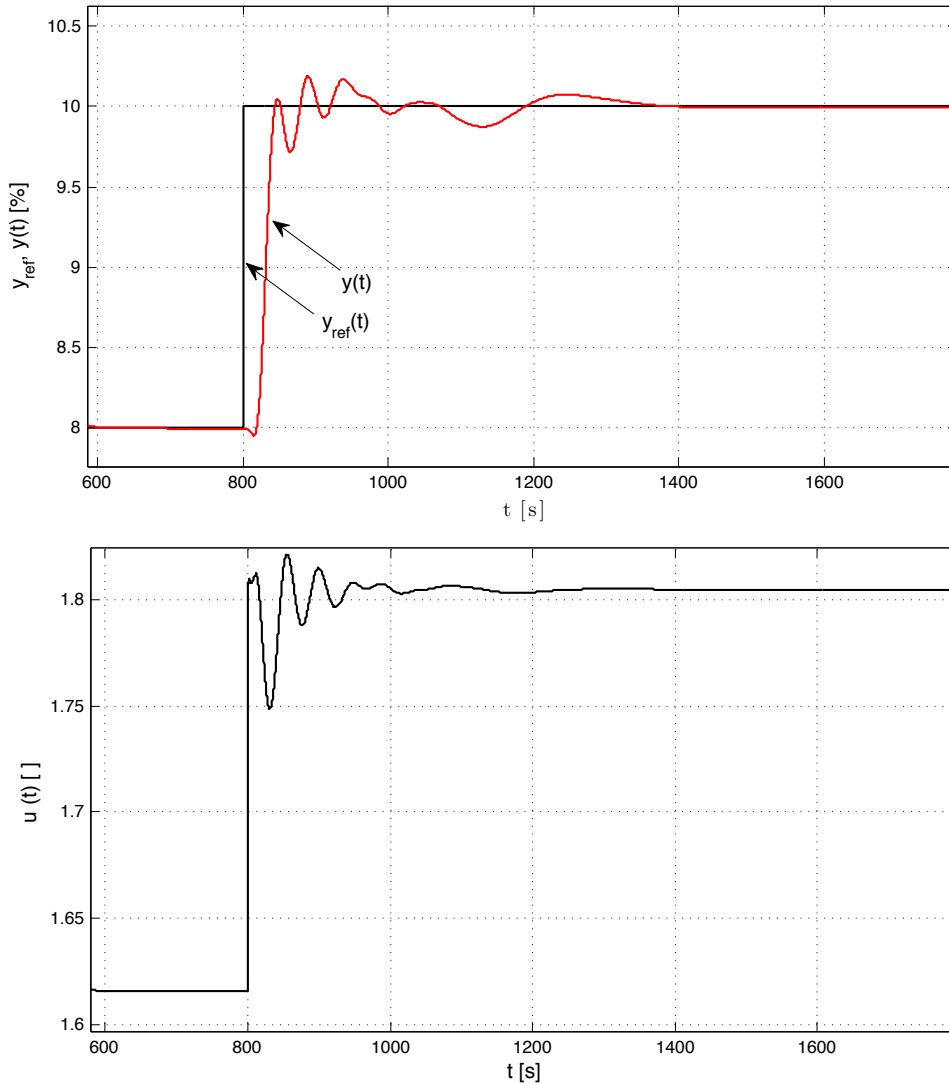
Rys. 5.2. Schemat blokowy układu sterowania w środowisku Matlab/Simulink.

5.4.1. Implementacja układu sterowania na modelu obiektu

Eksperyment symulacyjny został przeprowadzony w środowisku Matlab/Simulink. Zrzut ekranowy modelu z implementacją sterowania EHPC został przedstawiony na Rys. 5.2. Horyzont predykcji algorytmu sterowania nastawiono na $h = 200$ kroków, co uwzględniając czas próbkowania 0.2 s przekłada się na okres 40 s. Na wykresach zostały przedstawione przebiegi czasowe sygnałów wyjściowych oraz sterujących przy skokowej zmianie wartości wartości zadanej (stężenie O_2 na wyjściu kotła) z 8% na 10%.

Przebiegi pokazane na Rys. 5.3 pokazują, że algorytm sterowania predykcyjnego działa poprawnie. Skumulowany uchyb regulacji zdefiniowany jako suma kwadratów uchybu procesu regulacji wynosi

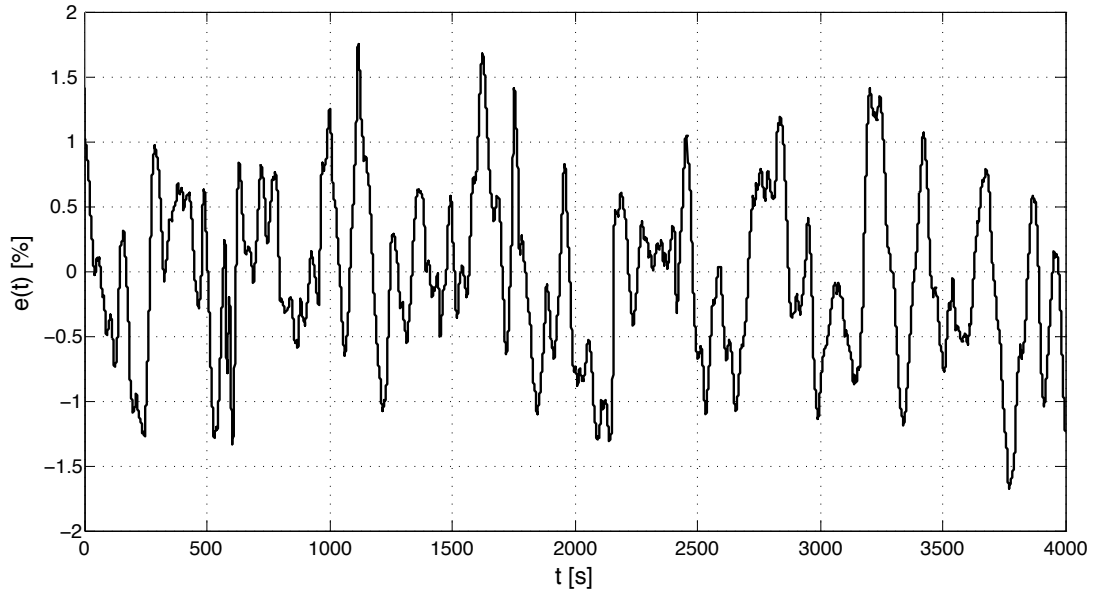
$$MSPE = \sum_{i=800}^{2800} (y(t) - y_{ref}(t))^2 = 566 \quad (5.41)$$



Rys. 5.3. Przebiegi czasowe sygnałów wejściowych i wyjściowych z modelu.

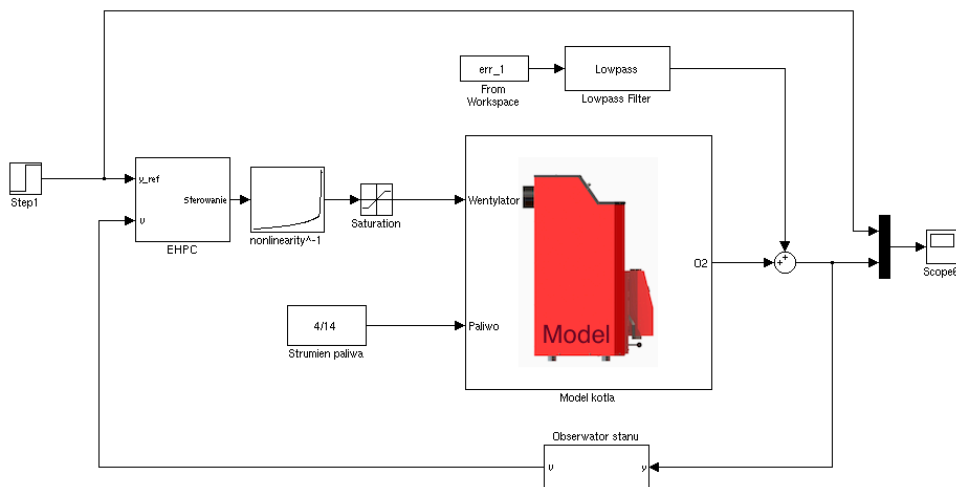
Należy podkreślić, że omawiany system jest układem nieminimalnofazowym i jak pokazały badania symulacyjne niskie wartości horyzontów predykcji $h < 170$ prowadzą do niestabilności procesu regulacji. Szczegółowo to zjawisko zostało opisane w pracy [Lat99]. Z drugiej strony zwiększanie horyzontu predykcji powyżej wartości $h > 200$ prowadzi do wolniejszego procesu ustalania się wartości wyjściowej na wartości zadanej, a przez to do nieznacznego pogorszenia wskaźnika określającego jakość regulacji.

W kolejnym eksperymencie badany układ został uzupełniony o addytywny sygnał stochastyczny generowany na wyjściu obiektu. Aby zbliżyć warunki pracy układu do warunków rzeczywistych sygnał stochastyczny zdefiniowany jako $e(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ został pobrany w odrębnej serii pomiarowej, przeprowadzonej na rzeczywistym obiekcie w stanie ustalonym (obiekt i model działały w pętli otwartej). Tak jak zostało to zaznaczone w Rozdziale 3, rzeczywisty sygnał jest mierzony sondą lambda. Jest to układ pomiarowy, który cechuje się dużą szybkością ale również znacznym zaszumieniem sygnału pomiarowego, dlatego konieczna jest jego filtracja. Szczegółowy opis pomiaru został przedstawiony w Podrozdziale 3.2.4. Fragment przebiegu czasowego sygnału $e(t)$ został przedstawiony na Rys. 5.4.



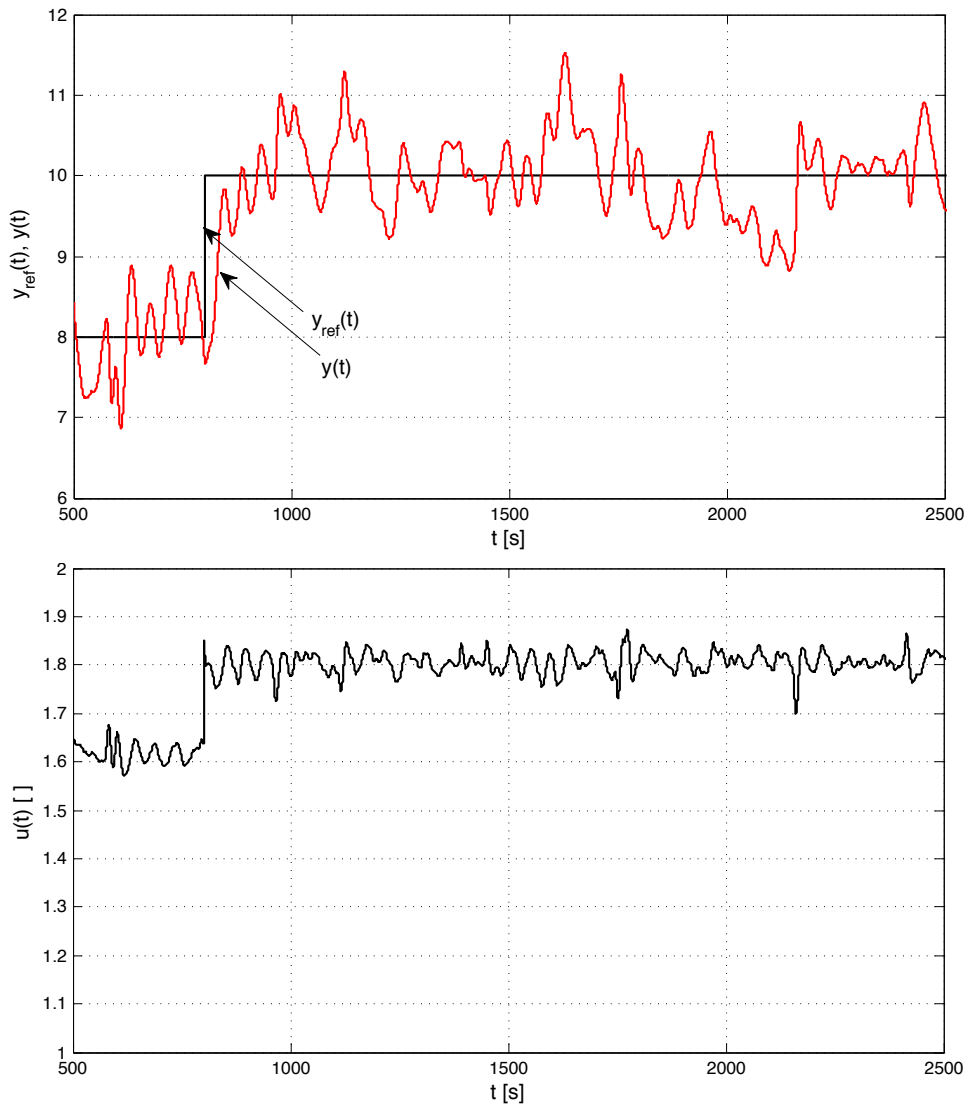
Rys. 5.4. Fragment przebiegu czasowego sygnału $e(t)$.

Schemat blokowy układu symulacyjnego w środowisku Matlab/Simulink został przedstawiony na Rys. 5.5, natomiast fragmenty przebiegów czasowych sygnału wyjściowego oraz sterującego na Rys. 5.6.



Rys. 5.5. Schemat blokowy układu symulacyjnego w środowisku Matlab/Simulink.

Eksperyment symulacyjny pokazuje, że składowa stochastyczna wpływa na parametry pracy układu regulacji, jednakże nie destabilizuje pracy regulatora. Regulator poprawnie wyznacza wartości wejściowe sterowań z uwzględnieniem występujących w układzie zakłóceń. Pozytywny wynik tego eksperymentu pozwala na powtórzenie prac na rzeczywistym kotle. Wyniki przeprowadzonych badań zostaną przedstawione w kolejnym podpunkcie.

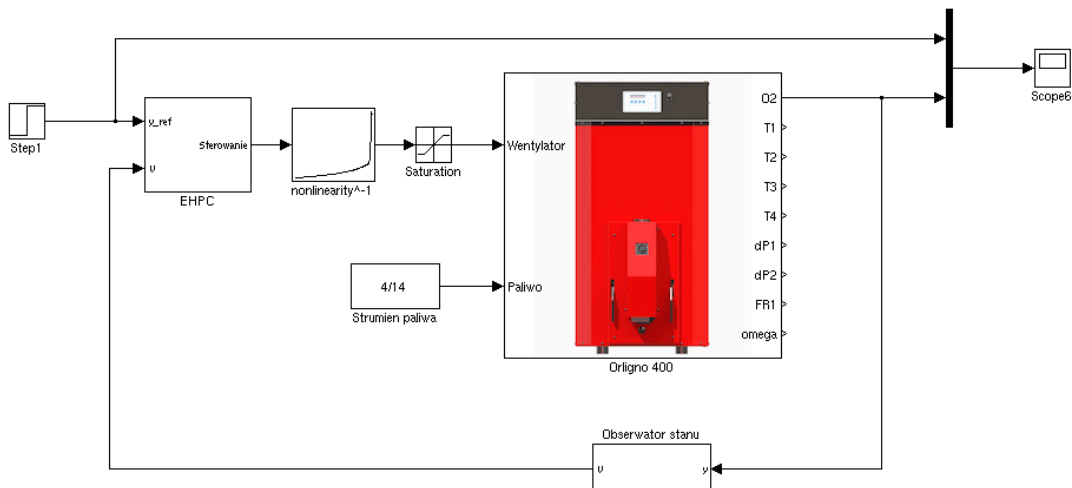


Rys. 5.6. Fragment przebiegu czasowego sygnałów wejściowych i wyjściowych modelu.

5.4.2. Implementacja układu sterowania na rzeczywistym obiekcie

Sygnąły wejściowe i wyjściowe procesu są połączone z układami pomiarowymi i wykonawczymi za pośrednictwem stanowiska prezentowanego w Rozdziale 3. Jak zostało to przedstawione w Rozdziale 3, z punktu widzenia programowego system reprezentowany jest w środowisku Matlab/Simulink jako system z dwoma sygnałami wejściowymi i dziewięcioma sygnałami wyjściowymi. Sygnąły wejściowe reprezentują wartości zadane dla układów podawania powietrza i paliwa. Wartości wyjściowe określają wszystkie sygnały pomiarowe mierzone w obiekcie obejmujące temperatury w różnych punktach kotła, wartości podciśnień, obroty wentylatora oraz najważniejszy z punktu widzenia zainteresowań niniejszej pracy, pomiar stężenia tlenu w spalinach. Schemat układu sterowania kotłem w środowisku Matlab/Simulink został przedstawiony na Rys. 5.7.

Należy podkreślić, że parametry pracy kotłów są silnie zależne od zewnętrznych warunków pogodowych. Podstawowymi zakłóceniami procesu jest wiatr, szczególnie o zmiennym kierunku i natężeniu oraz zmiany ciśnienia atmosferycznego. Również istotnym zakłóceniem



Rys. 5.7. Schemat blokowy układu symulacyjnego w środowisku Matlab/Simulink.

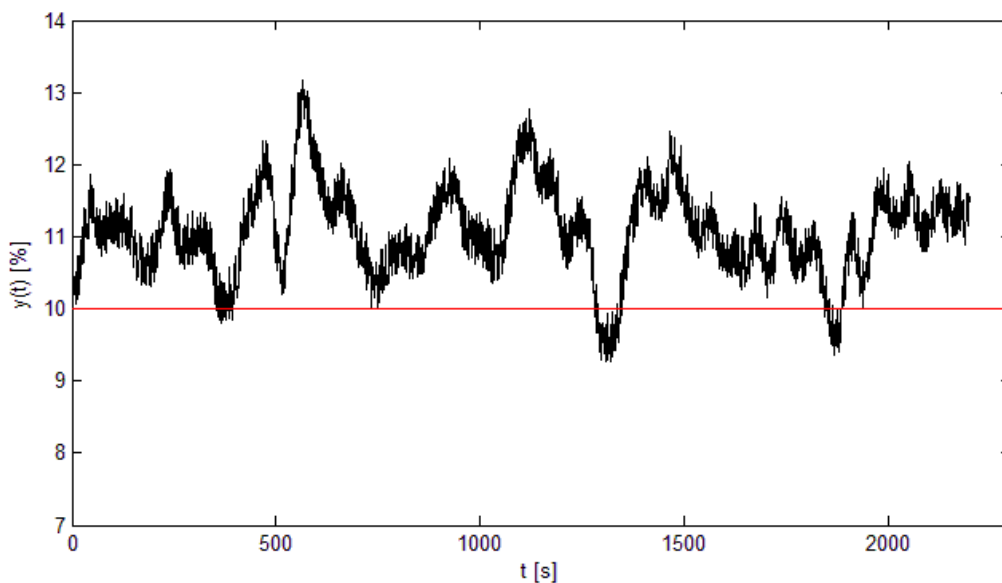
procesu są zmiany ciśnień w kotłowni powodowane otwieraniem/zamykaniem drzwi i okien itp. Jednakże zakłócenia te można łatwo wyeliminować i w ramach przeprowadzonych pomiarów zapewniono stałe warunki pracy w tym kontekście. W celu oceny efektywności układów regulacji oraz ich wpływu na parametry spalania kotła wykonano szereg eksperymentów weryfikacyjnych, które były przeprowadzone w różnych warunkach atmosferycznych. W ramach pracy wybrano trzy przykładowe serie pomiarowe, które (zdaniem autora) są reprezentatywne dla wszystkich dokonanych badań.

Seria 1

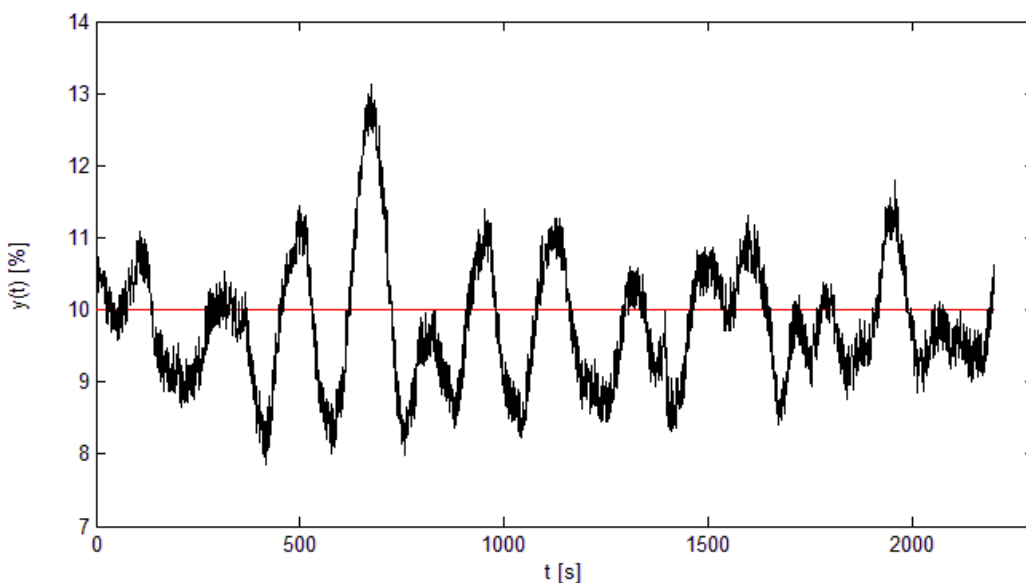
Seria pomiarowa została przeprowadzona 2 maja 2015 roku. Czas trwania serii wynosił ok. 40 min. Zestawienia przebiegów czasowych stężenia tlenu, tlenku węgla i tlenków azotu zestawiono na Rys. 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 i 5.13.

Na Rys. 5.8 i 5.9 przedstawiono przebiegi czasowe tlenu dla regulatora fabrycznego i predykcyjnego. Należy zauważyć, że regulator fabryczny generuje duży statyczny uchyb regulacji w stosunku do optymalnego stężenia tlenu. Błąd ten jest wynikiem faktu, że regulator fabryczny w ogóle nie uwzględnia wartości tlenu w spalinach. Statyczny uchyb regulacji jest zmienny i zależy od warunków atmosferycznych. Ponadto należy zauważyć, że duża wartość nadmiarowości tlenu jest znacznie mniej szkodliwa, niż zbyt mała jej wartość. Spadek wartości tlenu poniżej 8%, skutkować może 'eksplozją' stężenia CO w spalinach. Dlatego producenci wolą zabezpieczać się przed tym ryzykiem zwiększając margines dopuszczalnych ujemnych fluktuacji O_2 . Przebieg czasowy zmian wartości O_2 pokazuje, że regulator nie generuje istotnego statycznego uchybu regulacji, jednakże występują znaczne fluktuacje sygnału wokół wartości zadanej. Jest to skutek stochastycznego charakteru oraz znacznego opóźnienia procesu. Zmiana wielkości wejściowej jest zauważalna w sygnale wyjściowym dopiero po ok. 40 sekundach.

Rys. 5.10, 5.11 przedstawiają zestawienie przebiegów czasowych CO dla regulatora fabrycznego oraz regulatora predykcyjnego. W tym przypadku można zobaczyć, że wprowadzenie regulacji predykcyjnej istotnie zredukowało emisję CO z (średnio w całej serii pomiarowej)

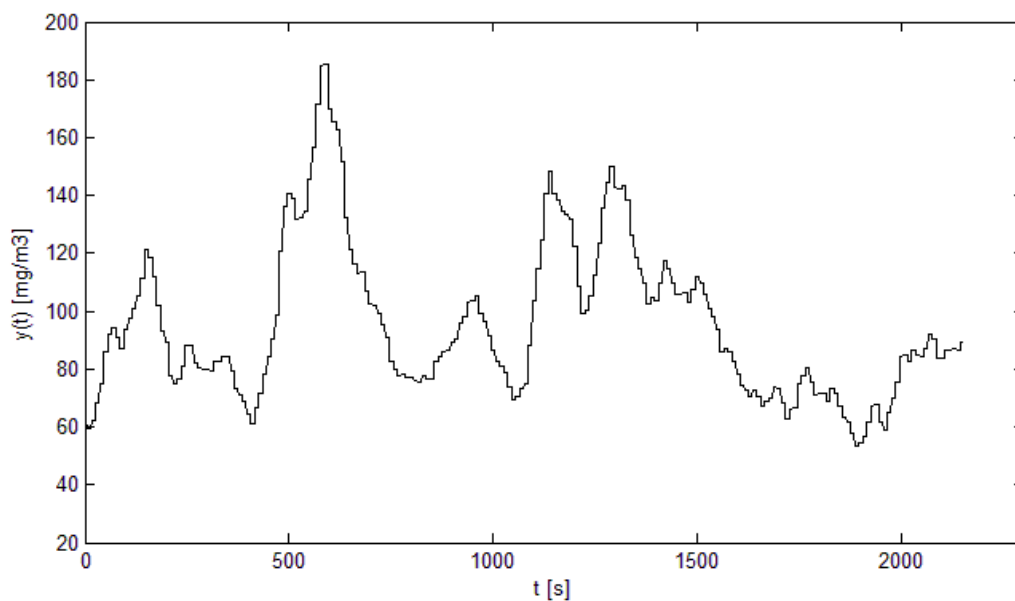


Rys. 5.8. Przebieg czasowy O_2 przy pracy z fabrycznym regulatorem $O_{2ref} = 10\%$.

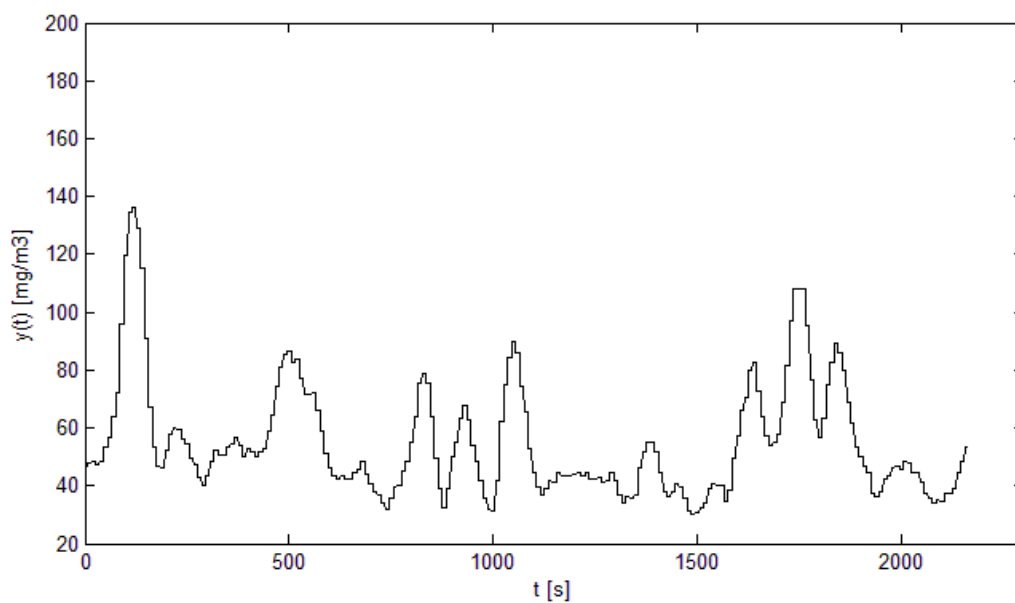


Rys. 5.9. Przebieg czasowy O_2 przy pracy z regulatorem predykcyjnym $O_{2ref} = 10\%$.

95.10 do 54.94 mg/m³. W przypadku tej serii pomiarowej również można zauważyć wyraźną poprawę emisji NO_x (Rys. 5.12 i 5.13). Wartości średnie emisji NO_x wynoszą odpowiednio 105.85 mg/m³ dla regulatora fabrycznego i 67.73 mg/m³ dla regulatora predykcyjnego. Należy jednak podkreślić, że wartość średnia tej wielkości ma charakter wolnozmienny. Można zauważyć, że w przypadku regulatora fabrycznego wartość średnia emisji NO_x rośnie w całym czasie trwania eksperymentu, natomiast dla regulatora predykcyjnego spada. Można na tej podstawie wnioskować, że przy dłuższych seriach pomiarowych, różnica wartości średnich emisji NO_x byłyby większa.

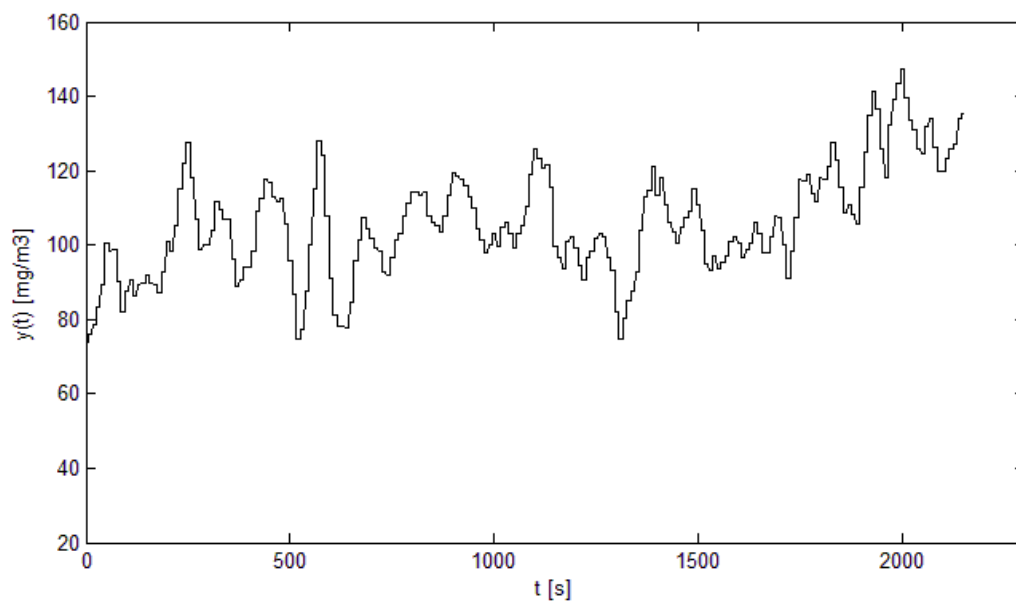


Rys. 5.10. Przebieg czasowy CO przy pracy z fabrycznym regulatorem.

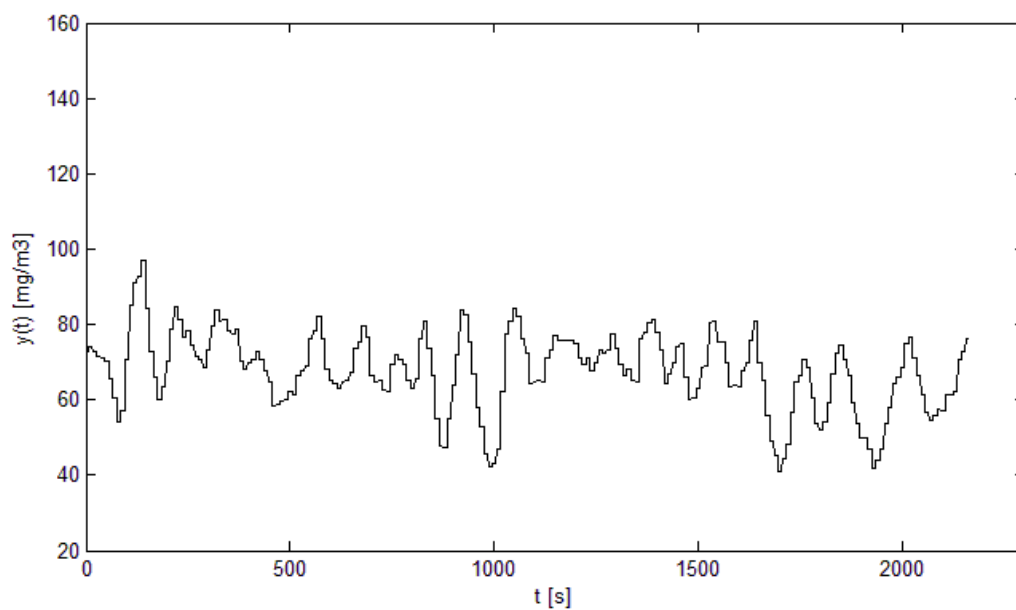


Rys. 5.11. Przebieg czasowy CO przy pracy z regulatorem predykcyjnym.

5. Implementacja układu sterowania kotłem



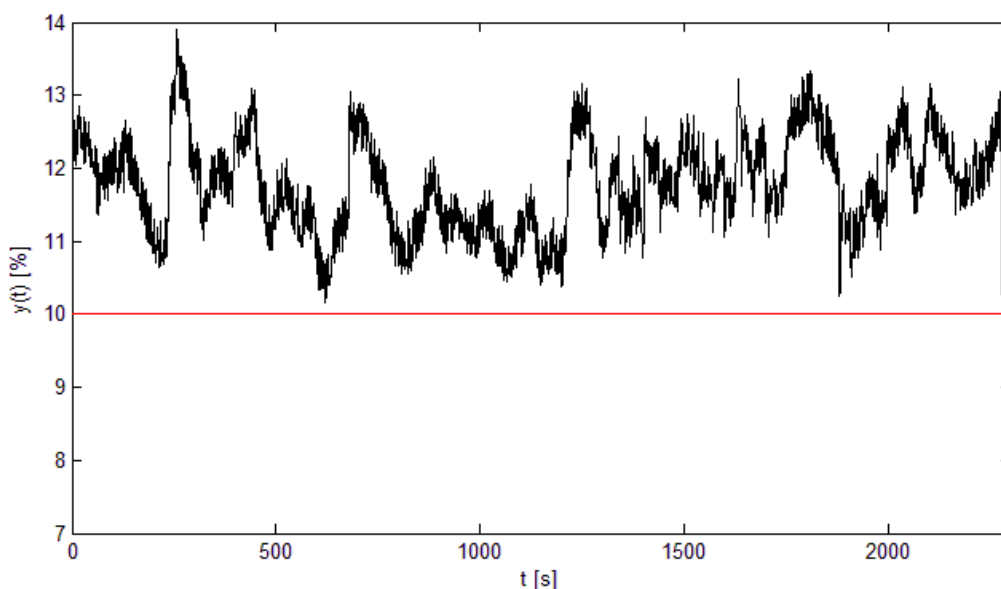
Rys. 5.12. Przebieg czasowy NO_x przy pracy z fabrycznym regulatorem.



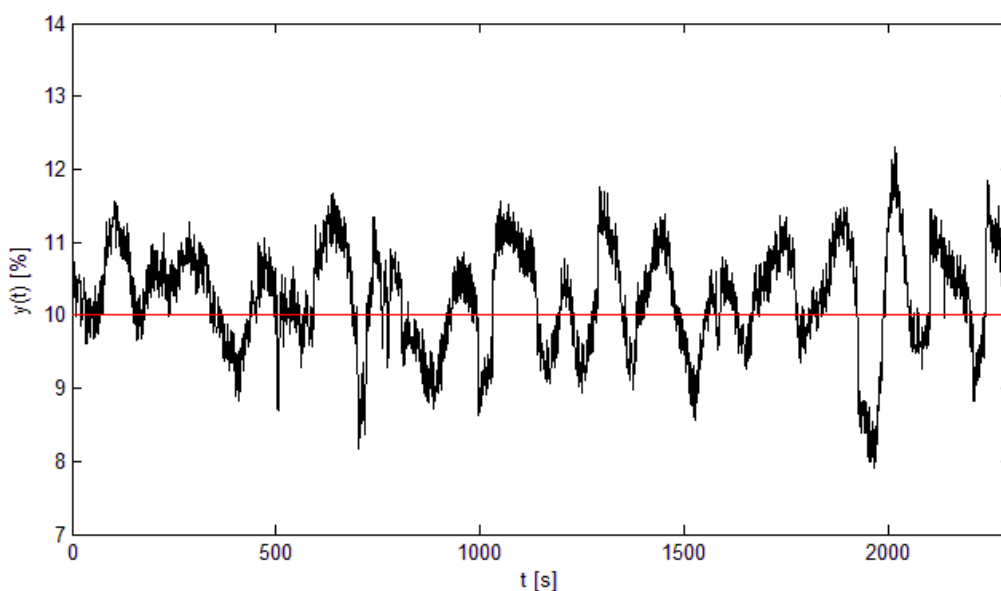
Rys. 5.13. Przebieg czasowy NO_x przy pracy z regulatorem predykcyjnym.

Seria 2

Seria pomiarowa została przeprowadzona 22 maja 2015 roku. Czas trwania serii wynosił ok. 40 min. Zestawienia przebiegów czasowych stężenia tlenu, tlenku węgla i tlenków azotu zestawiono na Rys. 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 i 5.19.

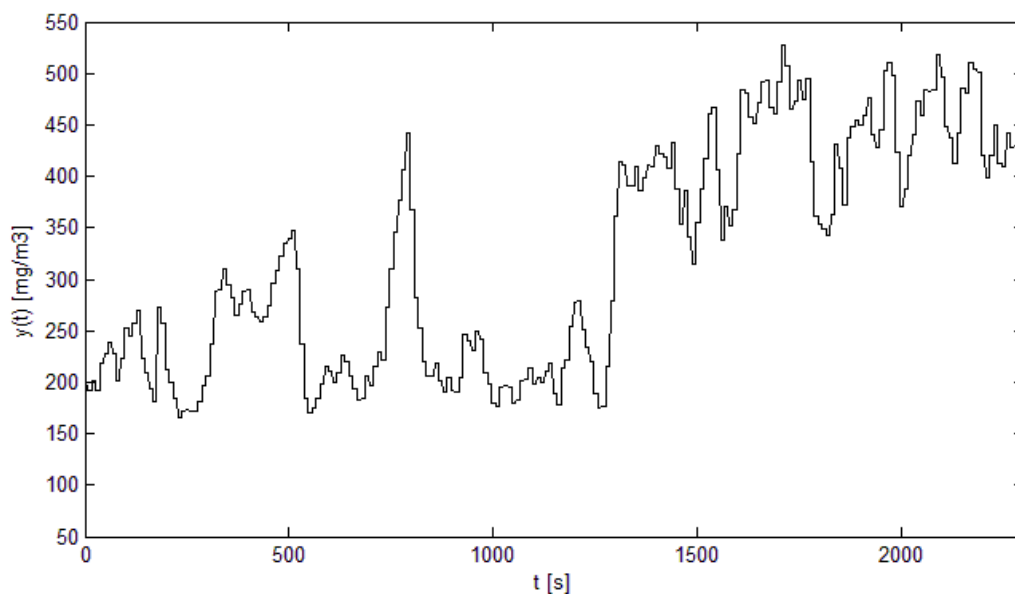


Rys. 5.14. Przebieg czasowy O_2 przy pracy z fabrycznym regulatorem $O_{2ref} = 10\%$.

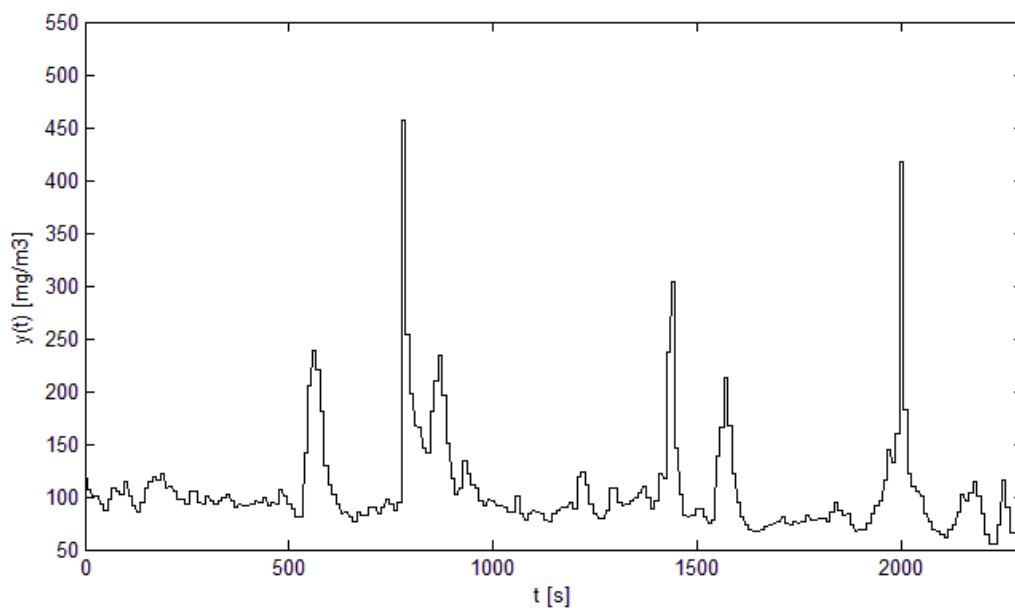


Rys. 5.15. Przebieg czasowy O_2 przy pracy z regulatorem predykcyjnym $O_{2ref} = 10\%$.

Na Rys. 5.14 i 5.15 przedstawiono przebiegi czasowe tlenu. Zasadniczo wnioski są podobne jak w przypadku serii pierwszej. W tym przypadku dla regulatora fabrycznego wartość O_2 jest dużo większa od wartości optymalnej. Wartości rejestrowanego tlenku węgla dla tego przypadku (Rys. 5.16) są bardzo wysokie. Średnia wartość CO w spalinach w czasie se-

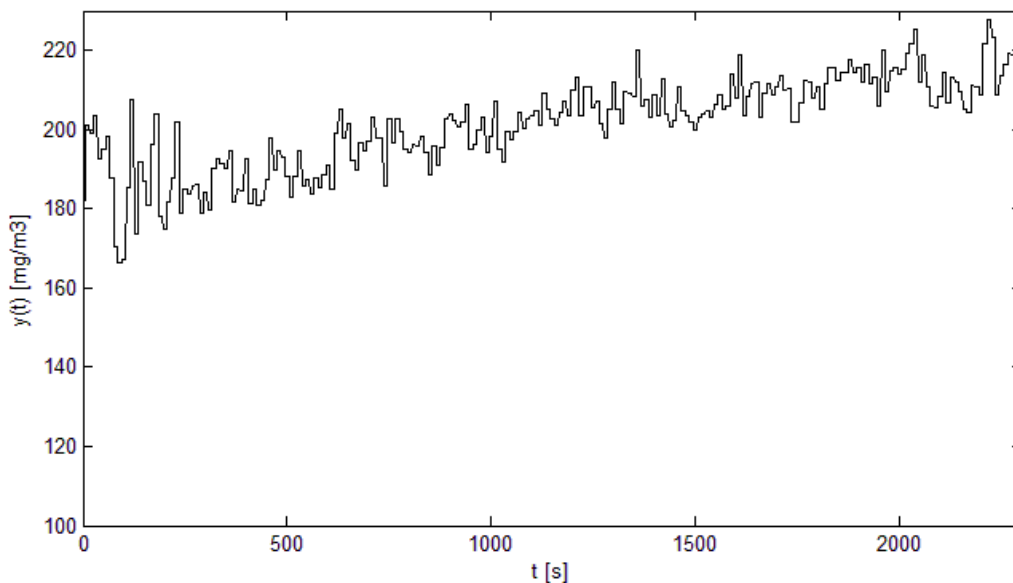


Rys. 5.16. Przebieg czasowy CO przy pracy z fabrycznym regulatorem.

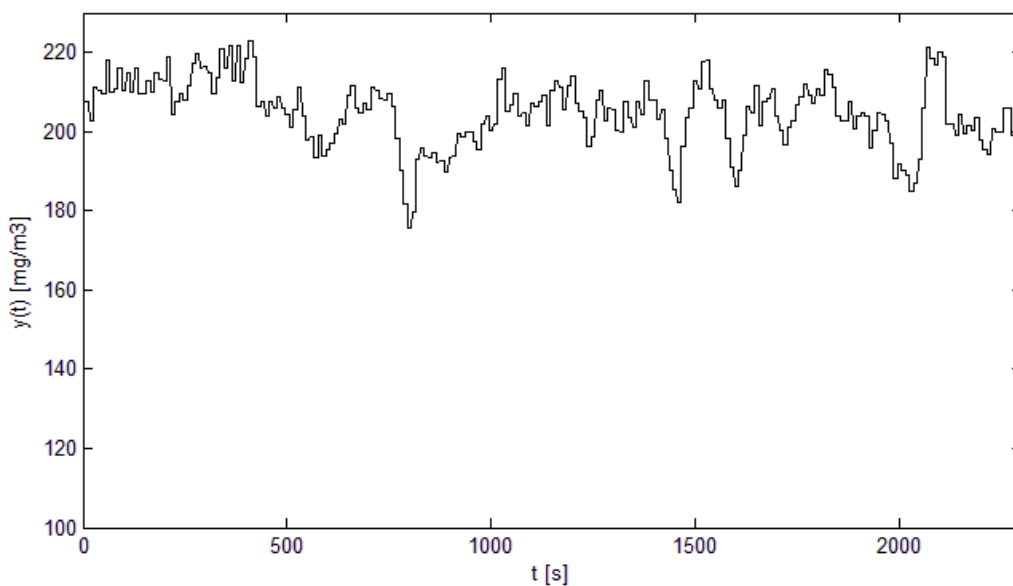


Rys. 5.17. Przebieg czasowy CO przy pracy z regulatorem predykcyjnym.

rii pomiarowej wynosiła aż 316.26 mg/m^3 . Zmiana na regulator predykcyjny obniżyła emisję CO do wartości 104.56 mg/m^3 (Rys. 5.17). Wysokie wartości tego parametru w tej serii są prawdopodobnie skutkiem silnego, porywistego wiatru, który występował w trakcie realizacji pomiarów. Impulsowe skoki emisji w przypadku sterowania EHPC są skutkiem spadków stężenia procentowego tlenu w okolicie wartości 8%. Prawdopodobnie bardziej optymalną wartością zadaną tlenu w tych warunkach byłaby wartość większa od 10%. Trudne warunki pracy układu potwierdzają również pomiary emisji NO_x przedstawione na Rys 5.18 i 5.19.



Rys. 5.18. Przebieg czasowy NO_x przy pracy z fabrycznym regulatorem.

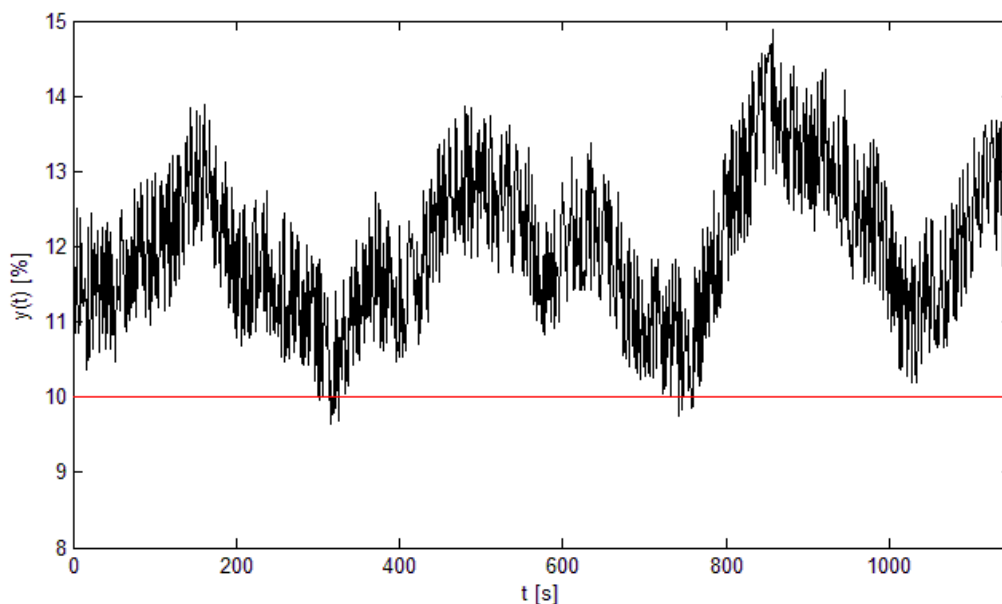


Rys. 5.19. Przebieg czasowy NO_x przy pracy z regulatorem predykcyjnym.

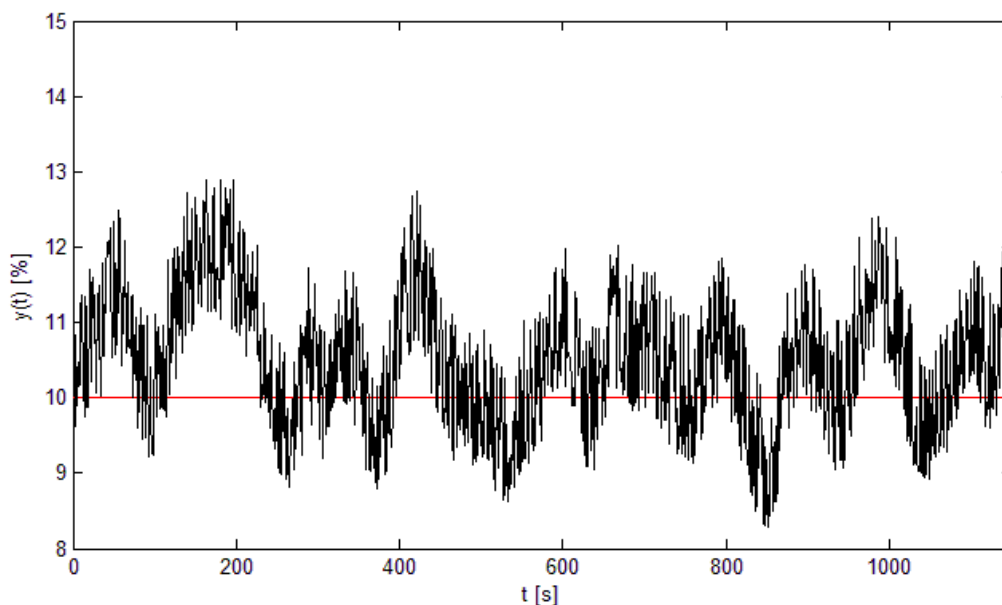
W tym przypadku wartości średnie tych emisji są podobne w obu przypadkach i wynoszą odpowiednio 202.43 mg/m^3 dla układu z regulatorem fabrycznym i 204.69 mg/m^3 z regulatorem predykcyjnym. Jednak jak można zobaczyć na Rys. 5.19, podobnie jak w przypadku Serii 1 następuje powolny spadek emisji NO_x w trakcie pracy regulatora predykcyjnego.

Seria 3

Seria pomiarowa została przeprowadzona 21 grudnia 2015 roku. Czas trwania serii wynosił ok. 20 min. Zestawienia przebiegów czasowych stężenia tlenu, tlenku węgla i tlenków azotu zestawiono na Rys. 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 i 5.25.

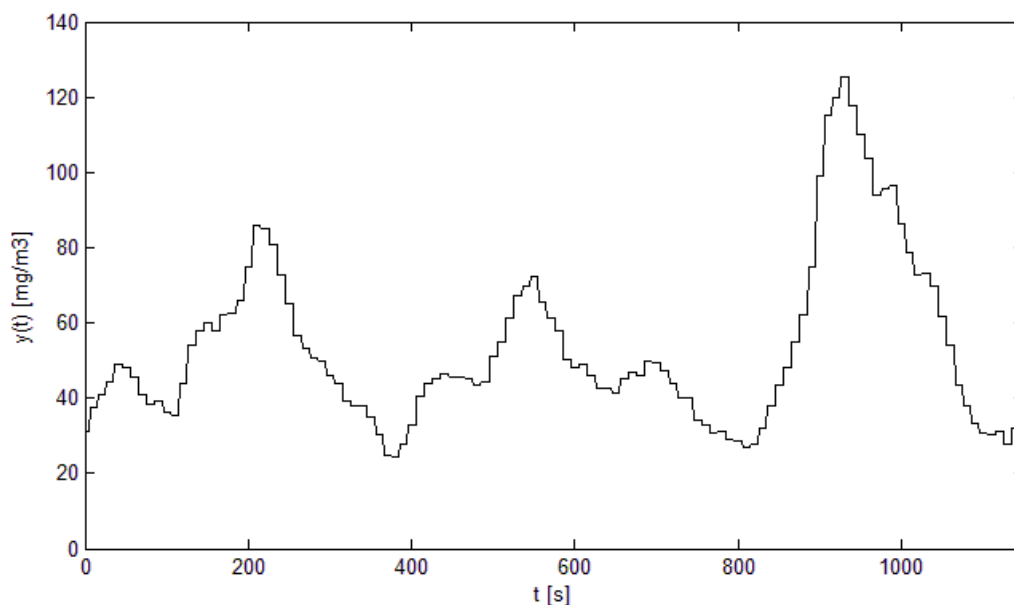


Rys. 5.20. Przebieg czasowy O_2 przy pracy z fabrycznym regulatorem $O_{2ref} = 10\%$.

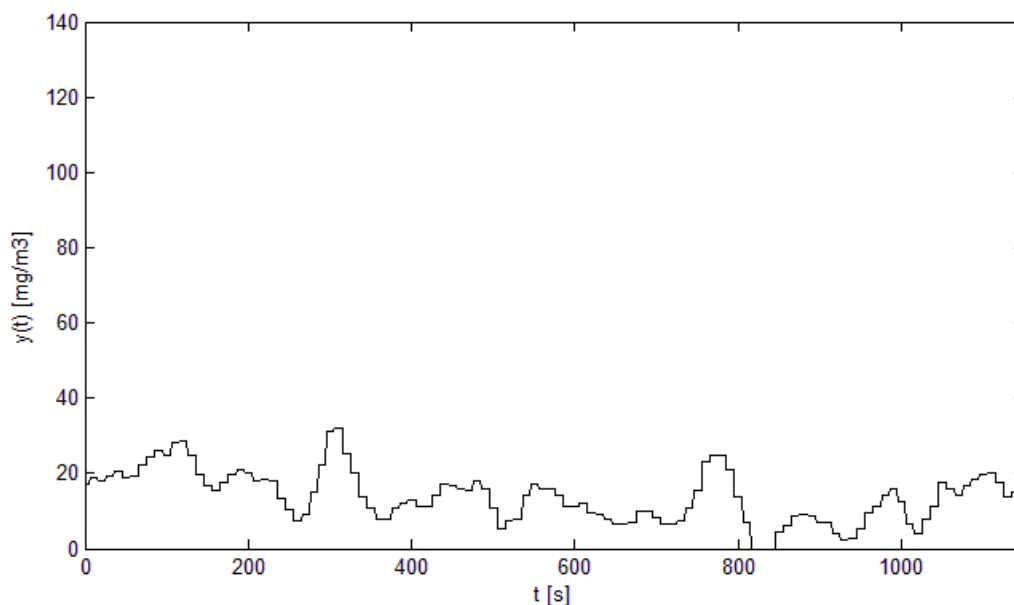


Rys. 5.21. Przebieg czasowy O_2 przy pracy z regulatorem predykcyjnym $O_{2ref} = 10\%$.

Przebiegi czasowe tlenu przedstawione na Rys. 5.20 i 5.21 pokazują, że ponownie układ regulacji predykcyjnej poprawnie stabilizuje wartość tlenu nadmiarowego w okolicach wartości optymalnej. Należy zaznaczyć, że większa wartość zaszumienia pomiaru O_2 jest skutkiem



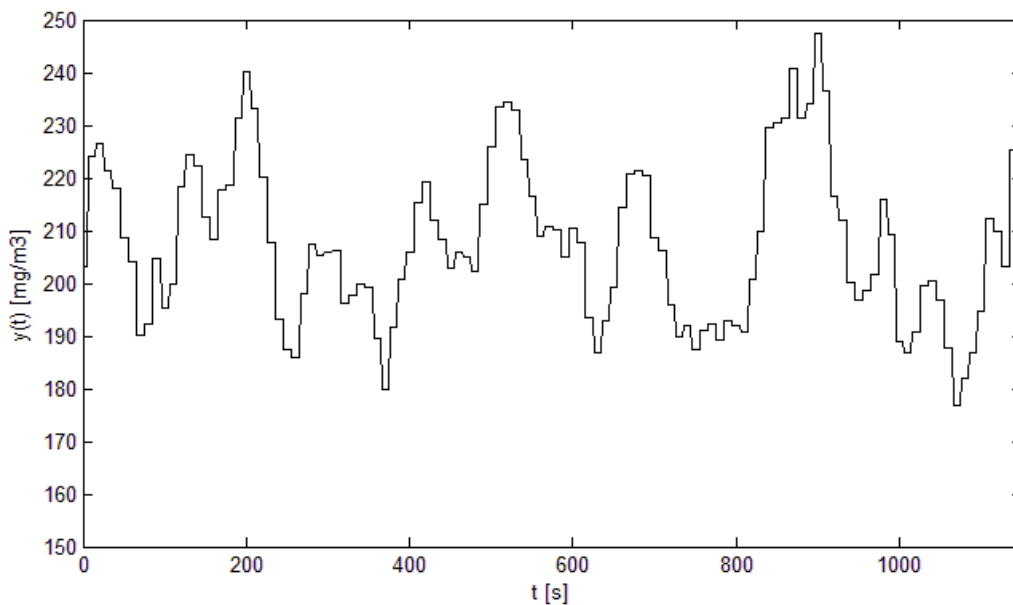
Rys. 5.22. Przebieg czasowy CO przy pracy z fabrycznym regulatorem.



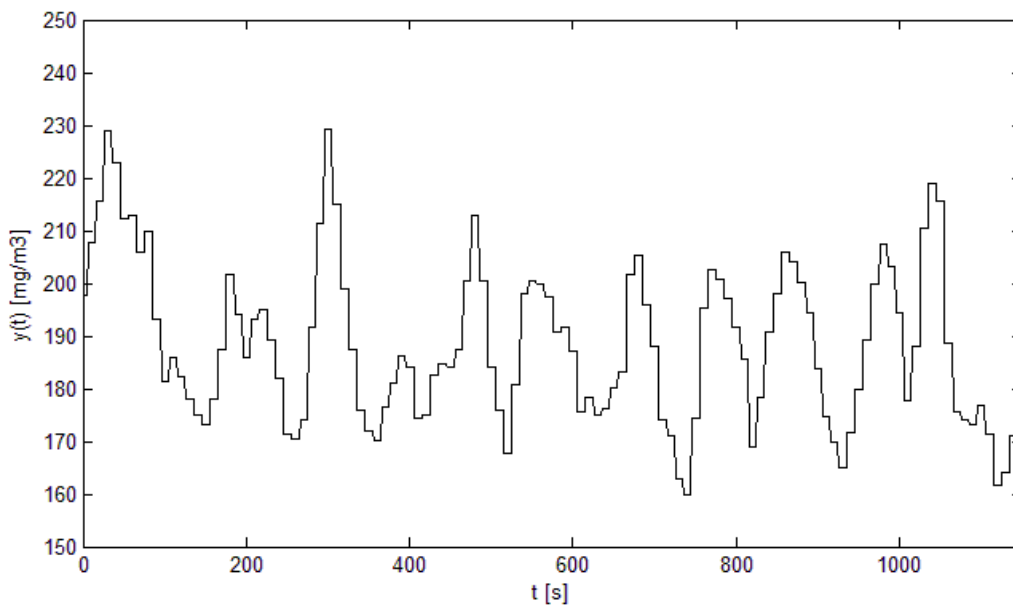
Rys. 5.23. Przebieg czasowy CO przy pracy z regulatorem predykcyjnym.

modyfikacji elektronicznego układu pomiarowego tej wielkości (spowodowanej awarią). Jednakże szum ten nie wpływa istotnie na układ sterowania, ponieważ wielkość ta jest poddawana filtracji (zostało to przedstawione w Rozdziale 3).

Przedstawione na Rys. 5.22 i 5.23 przebiegi czasowe emisji CO pokazują, że w wyniku zmiany układu regulacji emisja CO spadła ponad dwukrotnie z 48.48 mg/m^3 na 17.40 mg/m^3 , co potwierdza wyniki z pozostałych serii pomiarowych. Również prezentowane na Rys. 5.24 i 5.25 przebiegi czasowe emisji NO_x potwierdzają, że wprowadzenie układu regulacji pre-



Rys. 5.24. Przebieg czasowy NO_x przy pracy z fabrycznym regulatorem.



Rys. 5.25. Przebieg czasowy NO_x przy pracy z regulatorem predykcyjnym.

dykcyjnej poprawiło parametry emisyjne. Zaobserwowano spadek wartości średniej stężenia tlenków azotu z 206.27 na 187.87 mg/m^3 .

Podsumowanie wyników serii pomiarowych 1,2 i 3

Zestawienie wyników ze wszystkich prezentowanych powyżej pomiarów zostało przedstawione w Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Zestawienie wyników z przeprowadzonych pomiarów.

Serie pomiarowe	Rodzaj reg.	uchyb reg. O_2 [%]	CO [mg/m^3]	NO_x [mg/m^3]
Seria 1	Fabr.	1.076	95.10	105.85
	EHPC	0.289	54.08	95.10
Seria 2	Fabr.	1.790	316.26	202.43
	EHPC	0.212	104.56	204.69
Seria 3	Fabr.	2.019	48.48	206.27
	EHPC	0.420	17.40	187.87

Jak wynika z Tabeli 5.1 wprowadzenie regulacji predykcyjnej istotnie poprawiło parametry emisyjne we wszystkich seriach pomiarowych. W przypadku emisji CO w zależności od serii pomiarowej redukcja emisji wyniosła od niespełna 2 do ponad 3 razy. Należy podkreślić, że szczególnie w trudnych warunkach, wprowadzenie sterowania predykcyjnego poprawia parametry emisyjne CO . Zdecydowanie mniejszy wpływ układów sterowania można zaobserwować na redukcję NO_x . W tym przypadku redukcja wynosi ok. 10%. Wyjątkiem jest w tym przypadku Seria 2, w której wartość średnia emisji NO_x jest wyższa w przypadku regulacji EHPC. Jednak w przypadku tej serii można obserwować powolny spadek emisji NO_x w trakcie regulacji, co prawdopodobnie doprowadziłoby w dłuższym horyzoncie czasu do redukcji emisji.

5.5. Podsumowanie

W bieżącym rozdziale zaproponowano algorytm sterowania, który następnie zaimplementowano do regulacji kotłem peletowym *Orligno 400*. Wybrano prosty algorytm sterowania predykcyjnego EHPC oparty na modelu Hammersteina, w którym część dynamiczna opisana jest modelem Laguerre'a sprowadzonym do przestrzeni stanu. Wyznaczenie wartości wejściowej do obiektu w algorytmie regulacji opiera się na wektorze stanu modelu, dlatego w ramach jego implementacji konieczne było wykorzystanie obserwatora stanu. Ostatecznie algorytm sterowania został w pierwszej kolejności zastosowany do modelu procesu, gdzie przeprowadzony został eksperyment symulacyjny zarówno w warunkach deterministycznych, jak również stochastycznych. Poprawne wyniki w/w eksperymencie pozwoliły na implementację algorytmu na rzeczywistym obiekcie, tj. kotle peletowym *Orligno 400*. Wyniki analizy efektywności pokazują, że we wszystkich seriach pomiarowych zaproponowany algorytm sterowania okazał się bardziej efektywny od metod proponowanych przez producentów kotłów. Skutkowało to częściową redukcją fluktuacji sygnału wyjściowego procesu, jakim jest procentowe stężenie tlenu w spalinach kotła. Poprawa parametrów regulacji poskutkowała istotną poprawą kluczowych z ekologicznego punktu widzenia parametrów spalania kotła. Procentowe stężenie emisji tlenków węgla (CO) na skutek działania układów regulacji zmniejszył się o ok. 50-65%, natomiast

5. Implementacja układu sterowania kotłem

zawartość tlenków azotu NO_x o ok. 10%. Należy podkreślić, że dzięki zaproponowanemu układowi regulacji, badany kocioł może spełniać najbardziej restrykcyjne, światowe normy stawiane ekologicznym kotłom paletowym (np. niemiecki certyfikat *Blue Angel*), co dotychczas nie byłoby możliwe bez istotnych modyfikacji konstrukcyjnych.

6. Kierunki dalszych badań

Praca umiejscowiona jest w obszarze, w którym istnieje duży potencjał rozwojowy zarówno w kontekście naukowym, jak również implementacyjnym. Możliwości dalszych prac nad tym zagadnieniem można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- prace nad modelowaniem zjawiska,
- prace nad syntezą i analizą układów regulacji kotłem,
- prace związane z przemysłową implementacją układów regulacji.

Jedną z istotnych cech stosowanego rozwiązania jest budowanie modelu stężenia tlenu w spalinach na wylocie z kotła. Jak wynika z analizy przedstawionej w Rozdziale 4 jest to wielkość ze znacznym udziałem składowych stochastycznych, która jest zależna od (zmiennej) intensywności procesów chemicznych zachodzących w komorze spalania. Ponadto z przyczyn technicznych pomiar tlenu resztkowego dokonywany jest w pewnej odległości od strefy spalania (w czopuchu kominowym), co skutkuje ok. 20 sekundowym opóźnieniem generującym znaczne fluktuacje wielkości regulowanej. Dlatego istotną poprawę parametrów regulatora przyniosłyby prace nad szacowaniem zawartości tlenu w spalinach na podstawie pomiarów pośrednich, realizowanych bezpośrednio w komorze spalania. W Podrozdziale 4.4 prezentowane są wstępne wyniki, które pokazują, że istnieje stosunkowo silna zależność między stężeniem tlenu w gazach wylotowych a temperaturą w górnej części komory spalania. Jednakże zmienny charakter tej zależności powoduje, że w pracy nie wykorzystano tej wielkości w predykowaniu zmian tlenu na wyjściu kotła. Ten otwarty problem ma znaczące potencjalne możliwości w poprawie efektywności pracy układów regulacji. Innym przyszłościowym zagadnieniem jest predyktowanie zmian tlenu nadmiarowego na podstawie analizy jasności płomienia w komorze spalania. Wstępne wyniki pokazują również duże potencjalne możliwości wykorzystania tego sygnału w modelowaniu procesu, jednak także w tym przypadku wydaje się konieczne zastosowanie złożonego aparatu matematycznego.

W pracy dokonano implementacji tylko jednego (przykładowego) układu sterowania z rozszerzonym horyzontem predykcji. Z analizy literaturowej można wnioskować, że jest to stosunkowo proste rozwiązanie. Inne algorytmy jak np. uogólnione sterowanie predykcyjne (ang. *Generalized Predictive Control - GPC*) mogą się jednak okazać bardziej efektywne w tym zadaniu. Dlatego interesującym kierunkiem dalszych badań jest analiza różnych metod sterowania predykcyjnego. Ponadto w pracy nie analizowano wpływu układów regulacji na cząstki stałe generowane w procesie spalania i emitowane do atmosfery. Normy dotyczące poziomu ich emisji (poza rozpatrywanymi w pracy CO i NO_x) są ważnymi parametrami branowymi pod uwagę w ocenie szkodliwości kotła dla środowiska. Kluczowym powodem pominięcia tych zanieczyszczeń w pracy jest wysoki koszt aparatury realizującej pomiar *on-line* ilości sadzy oraz pyłów lotnych. Wydaje się, że współpraca z producentami kotłów, przy ich wsparciu finansowym i sprzętowym, pozwoli na uzupełnienie badań o te wielkości.

Oczywiście z punktu widzenia niniejszej dysertacji mniej istotnym, ale również wartym uwagi jest aspekt rozwoju pracy w kierunku wdrożeniowym. W tym miejscu kluczowe wydają się być badania efektywności i odporności algorytmów sterowania w długim (wieloletnim) horyzoncie pracy. Konieczna jest również analiza wpływu zmiennych wartości wejściowych kotła na żywotność układów wykonawczych, np. wpływ zmiennych obrotów wentylatora na jego awaryjność, itp. Ponadto przemysłowe wykorzystanie układów sterowania wiązać się musi z pracami inżynierskimi nad implementacją układów sterowania w stosunkowo prostych sterownikach instalowanych w kotłach grzewczych.

7. Podsumowanie

W ramach dysertacji opracowano model dynamiczny kotła grzewczego małej mocy opalanego peletem drzewnym dla celów sterowania, który następnie został zastosowany do zaprojektowania i wykonania układu regulacji w celu optymalizacji parametrów ekologiczno-ekonomicznych kotła.

Pierwszym elementem, który został wykonany na potrzeby niniejszej pracy jest stanowisko badawcze pozwalające na pracę kotła grzewczego małej mocy w warunkach eksperymentalnych oraz eksploatacyjnych. Aby zapewnić pracę kotła z mocą nominalną przy stałych warunkach w odpowiednio długim czasie, konieczne było wykonanie obiegu wodnego z buforem energii cieplnej oraz zestawem urządzeń do rozpraszania nadmiaru ciepła. Do badań wybrano kocioł peletowy *Orligno* 400 o mocy 16 kW z palnikiem zrzutkowym. Stanowisko laboratoryjne wyposażono w rozbudowany układ kontrolno-pomiarowy pozwalający na pomiary i bezpośrednią analizę w środowisku Matlab/Simulink różnych sygnałów pomiarowych kotła, tj. temperatur w różnych punktach kotła, podciśnień, stężenia tlenu, intensywności płomienia i prędkości obrotowej wentylatora. Wykorzystany został również profesjonalny, laboratoryjny analizator spalin, pozwalający na monitorowanie emisji poszczególnych związków chemicznych. Stanowisko umożliwiło również sterowanie *on-line* układami wykonawczymi kotła tj. układami podawania paliwa i powietrza.

Opracowane stanowisko badawcze wykorzystano w procesie budowania modelu kotła. Jak wykazała analiza literaturowa kluczową rolę w redukcji emisji szkodliwych substancji odgrywa stabilizacja poziomu stężenia tlenu nadmiarowego. Do wyznaczenia tej wielkości został opracowany matematyczny model o złożonej strukturze. Wyszczególniono w nim cztery podstawowe podsystemy obejmujące: układ podawania powietrza, układ podawania paliwa, komorę spalania oraz wymiennik ciepła. Większość podsystemów modelowano z uwzględnieniem zależności fizykalnych, przy czym część parametrów dobierano metodą strojenia modelu. Wymiennik ciepła został opisany modelem opartym na filtrach Laguerre'a. W dalszej części pracy fizykalny model kotła posłużył do opracowania uproszczonego modelu procesu, który można łatwo zaimplementować w sterowaniu predykcyjnym. W tym celu wykorzystano modele nieliniowe blokowo-zorientowane w postaci układów Hammersteina i Wienera, wykorzystujące dyskretne modele oparte na filtrach Laguerre'a. Analiza porównawcza efektywności wyznaczonych modeli sprawiła, że do zadania sterowania desygnowano model Hammersteina implementujący dyskretny model Laguerre'a oraz funkcję odcinkowo-liniową.

W ramach pracy przedstawiono również przykładową implementację układu sterowania predykcyjnego. Zastosowano w tym celu algorytm z rozszerzonym horyzontem predykcji EHPC oparty na nieliniowym modelu Hammersteina. W pierwszej kolejności algorytm sterowania zastosowano do modelu procesu, gdzie przeprowadzony został eksperyment symulacyjny zarówno w warunkach deterministycznych, jak i stochastycznych. Poprawne wyniki w/w eksperymencie pozwoliły na implementację algorytmu na rzeczywistym obiekcie, tj. kotle peletowym *Orligno* 400. We wszystkich

seriach pomiarowych zaproponowany układ sterowania okazał się bardziej efektywny od regulatorów instalowanych przez producentów kotłów. Skutkowało to częściową redukcją fluktuacji stężenia tlenu w spalinach. Poprawa uchybu regulacji doprowadziła do istotnej poprawy kluczowych z ekologicznego punktu widzenia parametrów spalania. Na skutek działania układu regulacji emisja tlenków węgla (CO) zmniejszyła się o ok. 50%, natomiast zawartość tlenków azotu (NO_x) w spalinach o ok. 10%.

Wyniki pracy pozwolą w przyszłości na niskokosztową modernizację peletowych kotłów grzewczych małej mocy, poprzez modyfikację układu pomiarowego i sterowania, która prowadzi do istotnej redukcji emisji szkodliwych substancji powstających w procesie spalania.

Oryginalny dorobek rozprawy obejmuje:

- zbudowanie układu badawczego implementującego zarówno środowisko pracy kotła, jak również układy kontrolno-pomiarowe pozwalające na sterowanie wielkościami wejściowymi i archiwizację danych pomiarowych,
- opracowanie efektywnego modelu fizykalnego procesów zachodzących w kotle, określającego ilościową zawartość tlenu nadmiarowego na wyjściu z kotła,
- opracowanie modelu dynamicznego dla celów sterowania,
- opracowanie przykładowego układu regulacji predykcyjnej oraz jego implementacja na obiekcie rzeczywistym,
- przeprowadzenie analizy efektywności opracowanego układu regulacji w kontekście emisji szkodliwych związków.

Literatura

- [AEB15] AEBIOM Statistical Report 2015, European Bioenergy Outlook. The European Biomass Association, Belgium.
- [AsW89] K.J. Astrom, B. Wittenmark, Adaptive Control. Addison-Esley, NY, 1989.
- [Baf08] L. S. Bäfver, Particles from biomass combustion : characteristics and influence on additives. Chalmers University of Technology, 2008, ISBN 9789173851770
- [BAF16] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/biomasse/publikationen/energie_ee_bm_grundwissen.pdf (stan na 10.05.2016)
- [BGB10] R. Bauer, M. Göllés, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes. Biomass and Bioenergy, 34(4), 2010, 417–427.
- [BMC06] C. Boukis, D. P. Mandic, A. G. Constantinides, L. C. Polymenakos, A novel algorithm for the adaptation of the pole of Laguerre filters. IEEE Signal Processing Letters, 13(7), 2006, 429–432
- [BHK09] P. Butschbach, F. Hammer, H. Kohler, A. Potreck, T. Trautmann, Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of exhaust gas. Sensors and Actuators B: Chemical, 137, 2009, 32–41
- [Bim10] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2010.
- [BNW05] C. Boman, A. Nordin, R. Westerholm, M. Öhman, D. Boström, Emissions from small-scale combustion of biomass fuels – extensive quantification and characterization, Umea University, Stockholm, 2005,
- [BoM06] I. Boiko, V. Mkrttchian, Sensor dynamics compensator for temperature measurement in combustion chambers of utility boilers and incinerators. IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, Kananaskis, Canda, 25.06-28.06, 2006, 237-242, ISBN: 978-3-902661-08-1
- [CaB99] E. Camacho, C. Bordons, Model Predictive Control. London, UK, Springer-Verlag, 1999
- [CJN13] P. Chalupa , P. Januška, J. Novák, State Observers for Model Predictive Control, Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer-Verlag, 2013, 295-303
- [Che03] Z. Chen, Bayesian Filtering, From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond. Adaptive Syst. Lab., McMaster University, Hamilton, Canada, 2003.
- [CCS06] G. Conte, M. Cesaretti, D. Scaradozzi, Combustion control in domestic boilers using an oxygen sensor. 14th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED '06, Ancona, 28.06-30.06, 2006, 1-4, ISBN: 0-9786720-1-1

- [CLW08] L. Carvalho, J. Lundgren, E. Wopienka, Challenges in small-scale combustion of agricultural biomass fuels. *Clean Air*, 9, 2008, 127–142.
- [CWP13] L. Carvalho, E. Wopienka, C. Pointner, J. Lundgren, V. K. Verma, W. Haslinger, C. Schmidl, Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, 104, 2013, 286–296.
- [DFG15] P. Deborah ,V. Francesca, G. Giuseppe, Analysis of the environmental impact of a biomass plant for the production of bioenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51,2015, 634–647.
- [DIJ12] N. Dedovic, S. Igic, T. Janic, S. Matic-Kekic, O. Ponjican, M. Tomic, L. Savin, Efficiency of Small Scale Manually Fed Boilers-Mathematical Models. *Energies*, 5, 2012, 1470-1489.
- [DeW04] E.J. Dempsey, D.T. Westwick, Identification of Hammerstein models with cubic spline nonlinearities. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 51(2), 2004, 237—245.
- [DoC02] N. Docquier, S. Candel, Combustion control and sensors: a review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 28 (2), 2002, 107–150
- [DSP02] K. Davidsson, B. Strojko, J. Pettersson, Alkali Emission from Birchwood Particles during Rapid Pyrolysis. *Energy Fuels*, 16 (5), 2002, 1033–1039
- [DSR14] M. Díaz-Ramírez, F. Sebastián, J. Royo, A. Rezeau, Influencing factors on NO_x emission level during grate conversion of three pelletized energy crops. *Applied Energy*, 115, 2014, 360-373.
- [FeC12] U. Fernandes, M. Costa, Particle emissions from a domestic pellets-fired boiler. *Fuel Processing Technology*, 103, 2012, 51–56.
- [FGP15] L. Febrero, E. Granada, D. Patiño, P. Eguía, A. Regueiro, A Comparative Study of Fouling and Bottom Ash from Woody Biomass Combustion in a Fixed-Bed Small-Scale Boiler and Evaluation of the Analytical Techniques Used. *Sustainability*, 7, 2015, 5819-5837.
- [Fie04] F. Fiedler, The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,8(3), 2004, 201–221
- [FPM15] S. Fournel, J.H. Palacios, R. Morissette, J. Villeneuve, S. Godbout, M. Heitz, P. Savoie, Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*, 141, 2015, 247–259.
- [GoN98] J. Good, T. Nussnaumer, Efficiency improvement and emission reduction by Advanced Combustion Control Technique (ACCT) with CO/Lambda control and setpoint optimization. *Biomass for Energy and Industry*, 10th European Conference and Technology Exhibition, Würzburg, Germany, 08.06-11.06, 1998
- [GRB14] M. Göllés, S. Reiter, T. Brunner, N. Dourdoumas, I. Obernberger, Model based control of a small-scale biomass boiler. *Control Engineering Practice*, 22, 2014, 94–102.

- [HKB11] J. Haapaaho, T. Korpela, T. Björkqvist, J. Hrdlička, V. Plaček, S. Vrána, B. Šulc, Continuous Control Issues Concerning Operation Improvement of Small-Scale Biomass Boilers. 18th IFAC World Congress (IFAC'11), Milano, Italy, 28.08 – 2.09, 2011, 7035 - 7042
- [HKB11] J. Haapa-aho, T. Korpela, T. Björkqvist, J. Hrdlička, V. Plaček, S. Vrána, B. Šulc, Continuous Control Issues Concerning Operation Improvement of Small-Scale Biomass Boilers. 18th World Congress The International Federation of Automatic Control, Milano, Italy, 28.08-2.09, 2011, 7035-7042
- [HVW05] P. S. C. Heuberger, P. M. J. Van Den Hof, B. Wahlberg, Modeling and identification with rational orthogonal basis functions. Springer-Verlag, London, UK, 2005.
- [HiD09] P. Hippe, J. Deutscher, Design of Observer-based Compensators, Springer-Verlag, London, UK, 2009
- [HoB10] A. Hošovský, J. Boržíková, Emission model for optimization of combustion control using intelligent methods. Journal of applied science in the thermodynamics and fluid mechanics, 4(2), 2010, 1-6
- [HrS11] J. Hrdlička, B. Šulc, Advanced Features of a Small-Scale Biomass Boiler Control for Emission Reduction, International Journal Of Energy, 5(3), 2011, 62-69.
- [HrS11] J. Hrdlička, B. Šulc, Advanced Features of a Small-Scale Biomass Boiler Control for Emission Reduction. International Journal Of Energy, 3(5), 2011, 62-69.
- [HSP11] J. Hrdlička, B. Šulc, V. Plaček, S. Vrána, Impact of Control Solutions on Ecology and Economy of Small-scale Biomass Boilers, International Journal Of Circuits, Systems And Signal Processing, 3(5), 2011, 247-254
- [HSu11] J. Hrdlička, B. Šulc, On-line Operating Adjustment of Small Biomass Fired Boilers Optimizing CO and NO_x Emissions. 6th IASME/WSEAS international conference on Energy & environment, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2011, 35-40, ISBN: 978-960-474-274-5
- [HSV10] J. Hrdlička, B. Šulc, S. Vrána, V. Plaček, Ecological Aspects of Small-Scale Biomass Combustion Control. International Conference on Development, Energy, Environment, Economics (DEEE'10), Puerto De La Cruz, Tenerife, 30.11-02.12, 2010, 388-393, ISBN: 978-960-474-253-0
- [INT16] <http://www.interloop.pl/pellettop.html> (stan na 10.05.2016 r.)
- [JCG08] JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [JLG04] L.S. Johansson, B. Leckner, L.Gustavsson, D.Cooper, C. Tullin, A. Potter, Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. Atmospheric Environment, 38, 2004 , 4183–4195.
- [JMB98] B.M. Jenkins, L.L. Baxter, T.R. Miles Jr., T.R. Miles, Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology, 54, 1998, 17–46.

- [Jor03] T. Joronen, Advanced estimation and compensation of variations in solid fuel caloric value, *Automaatio'03*, Helsinki, 2003, 187-192.
- [Jus11] M. Juszcak, Pollutant concentrations from deciduous wood fuelled heat station. *Chemical and Process Engineering*, 32(1), 2011, 41-55.
- [KoK94] F. Kong and R. De Keyser, "Criteria for choosing the horizon in extended horizon predictive control," *IEEE Trans. Autom. Control*, 39, 1994, 1467-1470.
- [KBL06] T. Korpela, T. Björkqvist, P. Lautala, Modelling of wood pellet combustion for control purposes. 2nd World Conference on Pellets, Jönköping, Sweden, 30.05 - 1.06, 2006, 97-104.
- [KBL08] T. Korpela, T. Björkqvist, P. Lautala, Durable Feedback Control System for small scale wood chip combustion. World Bioenergy Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Jönköping, Sweden, 27.05-29.05, 2008, 264-270, ISBN: 978-91-977624-0-3.
- [KBL09] T. Korpela, T. Björkqvist, P. Lautala, Control Strategy for Small-Scale Wood Chip Combustion. IFAC Symposium Power Plants & Power Systems, Tampere Hall, Finland, 5.07-8.07, 2009, 119-124.
- [KHH09] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer, *Energie aus Biomasse*, Springer, Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-85095-3.
- [KMP14] E. Krugly, D. Martuzevicius, E. Puida, K. Buinevicius, I. Stasiulaitiene, I. Radziuniene, A. Minikauskas, L. Kliucininkas, Emissions from the Combustion of Biomass-Residue-Derived Fuels in a Small Residential Boiler. *Energy Fuels*, 28, 2014, 5057-5066.
- [KRB09] T. Korpela, M. Ruusunen, T. Björkqvist, P. Lautala, Control structures of a multivariable process applied to small scale biomass combustion. *Automaatio XVIII*, Seminaari, Helsinki, Finland, 17.03-18.03, 2009, 1-8.
- [KrR06] A. Kristin, P. Raymer, A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. *Biomass and Bioenergy*, 30, 2006, 605-617.
- [KwH05] W. H. Kwon, S. Han, Receding Horizon Control. *Model Predictive Control for State Models*, ser. *Advanced Textbooks in Control and Signal Processing*. London, UK: Springer-Verlag, 2005.
- [Lat99] K. Latawiec, *Contributions to Advanced Control and Estimation for Linear Discrete-Time MIMO Systems*. Opole, Poland, Opole University of Technology Press, 1999.
- [Lat04] Latawiec K.J.: *The Power of Inverse Systems in Linear and Nonlinear Modeling and Control*. Technical University of Opole Press, Opole, 2004.
- [LMR03] K.J. Latawiec, C. Marciak, R. Rojek, G.H.C. Oliveira, Linear parameter estimation and predictive constrained control of Wiener/Hammerstein systems. *Proc. 13th IFAC Symposium on System Identification (SYSID'2003)*, Rotterdam, Netherlands, 2003, 359-364.
- [LMR03b] K.J. Latawiec, C. Marciak, R. Rojek, G.H.C. Oliveira, Modeling and parameter estimation of open-loop unstable systems by means of orthonormal basis

- functions. In Proc. 9th IEEE MMAR Conference (MMAR'03), Miedzyzdroje, Poland, 2003, no. 2, 1303-1307.
- [LMS04] K.J. Latawiec, C. Marciak, R. Stanisławski, and G.H.C. Oliveira, The mode separability principle in modeling of linear and nonlinear block-oriented systems. Proc. the 10th IEEE MMAR Conference (MMAR'04), Miedzyzdroje, Poland, 1, 2004, 479-484.
- [LRM00] K.J. Latawiec, R. Rojek, C. Marciak, G.H.C. Oliveira, Adaptive estimation of Laguerre models with time-varying delay. In Proc. 2nd IFAC Workshop on Linear Time Delay Systems, Ancona, Italy, 2000, 163-167.
- [LCS11] L. de Lima, H. Carmona, C. da Silva, F. Cavalcante Junior, Oxygen Excess Control of Industrial Combustion Through the Use of Automotive Lambda Sensor. International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, 2 (3), 2011, 365-373.
- [Lju87] L. Ljung, System Identification. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
- [Lue71] D. Luenberger, An introduction to observers. IEEE Transactions on Automatic Control, 16, 1971, 596-602
- [LHD04] J. Lundgren, R. Hermansson, J. Dahl, Experimental studies of a biomass boiler suitable for small district heating systems. Biomass and Bioenergy, 26, 2004, 443-453.
- [LRL11] Y. Lee, Ch. Ryu, W. Lee, Y. Park, Assessment of wood pellet combustion in a domestic stove. Journal of Material Cycles and Waste Management, 13(3), 2011, 165-172.
- [MMG12] J.L. Míguez, J.C. Morán, E. Granada, J. Porteiro, Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market. Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 16(issue6), 2012, 3867-3875.
- [MMH06] M. Miltner, A. Makaruk, M. Harasek, A. Friedl, CFD-Modelling For The Combustion Of Solid Baled Biomass. 5th International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 13.12-15.12, 2006.
- [NGN98] P. Neuenschwander, J. Good, and T. Nussbaumer, Combustion Efficiency in Biomass Furnaces With Flue Gas Condensation, Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, Würzburg (Germany), 8.06-11.06, 1998.
- [NiG02] B. Ninness, S. Gibson, Quantifying the accuracy of Hammerstein model estimation. Automatica, 38, 2002, 2037-2051.
- [NSP13] Narodowy Spis Powszechny Ludności i Mieszkań 2011, GUS, Warszawa 2013
- [Nus03] T. Nussbaumer, Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy & Fuels, 2003, 17, 1510-1521.
- [Nus11] T. Nussbaumer, Characterisation of particles from wood combustion with respect to health relevance and electrostatic precipitation. Combustion, 3, 2011.
- [Nus99] T. Nussbaumer, Regelung Von Automatischen Heizkesseln. Bois Énergie / Holz Energie, 3, 1999, 44-51.

- [OBB06] I. Obernberger, T. Brunner, G. Bärnthaler, Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30, 2006, 973–982.
- [OPS12] C. Oswald, V. Plaček, B. Šulc, A. Hošovský, Transfer Issues of Control Optimizing Combustion from Small-scale to Medium-scale Biomass-fired Boilers. 8th Power Plant and Power System Control Symposium, Toulouse, France, 02.09-05.09, 2012, 207-211, ISBN: 978-3-902823-24-3.
- [OsS11] C. Oswald, B. Šulc, Achieving Optimal Operating Conditions in PI Controlled Biomass-fired Boiler, 12th International Carpathian Control Conference (ICCC), 25.05-28.05, 2011, 280-285, ISBN: 978-1-61284-360-5.
- [Pad02] R. Padinger, Regelungstechnik für die Haustechnik der Zukunft. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2002.
- [PoP00] R.K. Pearson, M. Pottman, Gray-box identification of block-oriented nonlinear models. *Journal of Process Control*, (10), 2000, 301-315.
- [PCP09] J. Porteiro, J. Collazo, D. Patino, E. Granada, J. C. M. Gonzalez, J. L. Miguez, Numerical Modeling of a Biomass Pellet Domestic Boiler. *Energy & Fuels* 2009, 23, 1067–1075.
- [PeH05] H. Petersson, M. Holmberg, Initial studies on the possibility to use chemical sensors to monitor and control boilers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, (111–112), 2005, 487–493.
- [PFN09] T. Persson, F. Fiedler, S. Nordlander, C. Bales, J. Paavilainen, Validation of a dynamic model for wood pellet boilers and stoves. *Applied Energy*, 86, 2009, 645–656.
- [PiM11] J. Pitel, J. Mizak, Approximation of CO/λ biomass combustion dependence by artificial intelligence techniques. 22nd International DAAAM Symposium, 22(1), Vienna, Austria, 23.11-27.11, 2011, 143-144, ISBN: 978-3-901509-83-4.
- [PiM12] J. Pitel, J. Mizák, Cost effective biomass combustion process control. *Power Plants and Power Systems Control*, 8(1), 2012, 616-620.
- [PIH11] V. Plaček, J. Hrdlička, Influence of Control on Environmental and Economical Aspects of Small-scale Biomass Boiler. Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Torremolinos, Málaga, Spain, 05, 2011.
- [PIS15] V. Placek, B. Šulc, Support of Biomass Boiler Control Design by Modeling. 16th International Carpathian Control Conference (ICCC), 27.05-30.05, 2015, Miskolc, Hungary, 393-398, ISBN: 978-1-4799-7370-5.
- [PMH13] J. Pitel, J. Mizáková, A. Hošovský, Biomass Combustion Control and Stabilization Using Low-Cost Sensors. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 2013, 1-7.
- [PNE02] PN-EN 12809:2002/AC:2014-09 Kotły grzewcze na paliwa stałe - Nominalna moc cieplna do 50 kW - Wymagania i badania.
- [PNE09] PN-EN 14785:2009 Ogrzewacze pomieszczeń opalane peletami. Wymagania i metody badań.

- [PNE12] PN-EN 303-5:2012 Kotły grzewcze. Część 5: Kotły grzewcze na paliwa stałe z ręcznym i automatycznym zasypem paliwa o mocy nominalnej do 500 kW. Terminologia, wymagania, badania i oznakowanie.
- [PSV11] V. Placek, B. Šulc, S. Vrána, J. Hrdlička, J. Pitel, Investigation in Control of Small-scale Biomass Boilers. 12th International Carpathian Control Conference (ICCC), Velke Karlovice, Czech Republic, 25.05-28.05, 2011, 308 – 311, ISBN: 978-1-61284-360-5.
- [PTT00] M. R. I. Purvis, E. L. Tadulan, A. S. Tariq, NO_x control by air staging in a small biomass fuelled underfeed stoker. International Journal of Energy Research, 24, 2000, 917-933.
- [RDC11] M. M. Roy, A. Dutta, K. Corscadden, P. Havard, Co-combustion of Biosolids with Wood Pellets in a Wood Pellet Stove. International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, 11(3), 2011, 7-13.
- [RuL02] M. Ruusunen, K. Leiviskä, Fuzzy modelling of carbon dioxide in a burning process. Control Engineering Practice, 12 (5), 2004, 607–614.
- [RuP09] M. Ruusunen, Modelling and control of small-scale biomass combustion for emission reduction. EnePro conference, 03.06, 2009, University of Oulu, Finland. Kalevaprint, Oulu, 75-78, ISBN 978-951-42-9154-8.
- [Ruu06] M. Ruusunen Monitoring of Small-Scale Biomass Combustion Processes. Report A No 29, University of Oulu, 2006, ISBN: 951-42-8027-X.
- [Ruu08] M. Ruusunen, Real-time moisture content monitoring of solid biomass in grate combustion. 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, 6.07-11.07, 2008, 10652-10656.
- [Ruu09] M. Ruusunen, Model-based method for combustion power stabilisation in grate-fired boilers. Power Plants and Power Systems Control, 1(1), 2009, 32-37.
- [Ruu13] M. Ruusunen, Signal Correlations in Biomass Combustion – an information Theoretic Analysis. Ph. D. Thesis, University of Oulu, 2013, ISBN: 978-952-62-0191-7.
- [SAD11] R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas, M.S. Hossain, S. Mekhilef, A review on biomass as a fuel for boilers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2011, 2262–2289.
- [SCS14] S.G. Sahu, N. Chakraborty, P. Sarkar, Coal - biomass co-combustion: An overview. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 2014, 575–586.
- [SHT07] O. Sippula, K. Hytönen, J. Tissari, T. Raunemaa, J. Jokiniemi, Effect of Wood Fuel on the Emissions from a Top-Feed Pellet Stove. Energy & Fuels, 21, 2007, 1151-1160.
- [Sip10] O. Sippula, Fine particle formation and emissions in biomass combustion. Report series in aerosol science, University of Eastern Finland, Kuopio, 2010.
- [SLE11] C. Schmidl, M. Luisser, E. Padouvas, L. Lesselsberger, M. Rzaca, C. Ramirez-Santa Cruz, M. Handler, G. Peng, H. Bauer, H. Puxbaum, Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems. Atmospheric Environment, 45, 2011, 7443-7454.

- [ScM96] I. Scott , B. Mlllgrew, Orthonormal function neural network for nonlinear system modeling. Prof IEEE Conf. on Neural Networks, 1996.
- [SPM13] C. Serrano, H. Portero, E. Monedero, Pine chips combustion in a 50 kW domestic biomass boiler. *Fuel*, 111, 2013, 564–573.
- [SRS14] H. Sefidari, N. Razmjoo, M. Strand, An experimental study of combustion and emissions of two types of woody biomass in a 12-MW reciprocating-grate boiler. *Fuel*, 135, 2014, 120–129.
- [Sta12] R. Stanisławski, New Laguerre filter approximators to the Grunwald-Letnikov fractional difference, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, 2012, Paper ID: 732917, 1-10.
- [Sta13] R. Stanisławski, Advances in modeling of fractional difference systems – new accuracy, stability and computational results. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Seria Studia i Monografie*, 343, 2013.
- [SHL08] R. Stanisławski, W.P. Hunek, K.J. Latawiec, Modeling of nonlinear block-oriented systems using orthonormal basis and radial basis functions. 19th International Conference on Systems Engineering (ICSENG 2008), Las Vegas, USA, 2008, 55-58.
- [SHL10] R. Stanisławski, W.P. Hunek, K.J. Latawiec, Modeling of non-linear block-oriented systems using orthonormal basis and radial basis functions. *System Science*, 35(2), 2009, 11-18.
- [StL08] R. Stanisławski, K.J. Latawiec, Orthonormal basis and radial basis functions in modeling and identification of nonlinear block-oriented systems. *Automation and Robotics*, 2008, 277-284.
- [SLH07] R. Stanisławski, K.J. Latawiec, W.P. Hunek, Identification of feedback-nonlinear systems by means of orthonormal basis and radial basis functions. *Proc. 13th IEEE IFAC IC MMAR 2007, 27-30 August 2007, Szczecin*, 611-616.
- [SLG14] R. Stanisławski, K.J. Latawiec., M. Gałek, M. Łukaniszyn, Modeling and identification of a fractional-order discrete-time SISO Laguerre-Wiener system. 19th International Conference On Methods And Models In Automation And Robotics (MMAR), 2014, 165-168.
- [SoS89] Söderström T., Stoica P., *System Identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [SVH09] B. Šulc, S. Vrána, J. Hrdlička, M. Lepold Control for ecological improvement of small biomass boilers. *IFAC Symposium Power Plants & Power Systems, Tampere Hall, Finland, 5.07-8.07, 2009*, 113-118.
- [Tis08] J. Tissari, *Fine Particle Emissions from Residential Wood Combustion*. Doctoral dissertation, Kuopio 2008.
- [VBD09] V.K. Verma, S. Bram, J. De Ruyck, Small scale biomass heating systems: Standards, quality labelling and marketing driving factors – An EU outlook. *Biomass and Bioenergy*, 33, 2009, 1393-1402.
- [VBD12] V.K. Verma, S. Bram, F. Delattin, P. Laha, I. Vandendael, A. Hubin, J. De Ruyck, Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, 90, 2012, 17-23.

- [VBD12] V.K. Verma, S. Bram, F. Delattin, P. Laha, I. Vandendael, A. Hubin, J. De Ruyck, Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, 90, 2012, 17–23.
- [VBG09] V.K. Verma, S. Bram, G. Gauthier, J. De Ruyck, Evaluation of the performance of a multi-fuel domestic boiler with respect to the existing European standard and quality labels: Part-1. *Biomass and Bioenergy*, 33, 2006, 1393-1402.
- [VBV11] V.K. Verma, S. Bram, I. Vandendael, P. Laha, A. Hubin, J. De Ruyck, Residential pellet boilers in Belgium: Standard laboratory and real life performance with respect to European standard and quality labels. *Applied Energy*, 88, 2011, 2628-2634.
- [VPO14] S. Vrána, V. Plaček, C. Oswald, B. Šulc, P. Neuman, Neural Network Evaluation of Combustion Process for Continuous Control of Small Scale Biomass Fired Boilers. 19th World Congress The International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, 24.08-29.08, 2014, 1440-1445.
- [VTB02] A. Veski, T. Tiikma, V. Borovikov, Combustion Air Control in Biofuel-Fired Boilers. 12th European Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, , Amsterdam, The Netherlands, 17.06-21.06, 2002, 408-411.
- [Whi10] A.S. White, Simulation of Domestic Boiler Control. *International Journal of Simulation - Systems, Science & Techno*, 11(4), 2010, 22-32
- [Wid13] H. Widell, Industrial-scale biomass combustion plants: engineering issues and operation. *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, 2013, 225–277.
- [YdK85] B. Ydstie, L. Kershenbaum, and R. Sargent, “Theory and application of an extended horizon self-tuning controller,” *AIChE Journal*, vol. 31, no. 11, pp. 1771–1780, 1985.
- [ZaE00] P. Zarco, A.G. Exposito, Power system parameter estimation: A Survey. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15 (1), 2000, 216-222