



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

**WYDZIAŁ INŻYNIERII
MECHANICZNEJ I ROBOTYKI**

Magisterska praca dyplomowa

Jakub Ściga

Imię i nazwisko

Automatyka i Robotyka

Kierunek studiów

**Projekt rozproszonego sterowania układem
ceramicznego pieca obrotowego**

Temat pracy dyplomowej

Dr inż. Krzysztof Lalik
Promotor pracy

.....
*Ocena, data,
podpis Promotora*

Kraków, rok 2017/2018

Kraków. dnia.....

Imię i nazwisko: Jakub Ściga
Nr albumu: 269496
Kierunek studiów: **Automatyka i Robotyka**
Profil dyplomowania: Automatyka i Metrologia

OŚWIADCZENIE

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. Dz.U.z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn.zm.) : „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystyczne wykonanie albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust.1 ustawy z dnia 27 lip[ca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (tj. Dz.U. z 2012 r. poz. 572, z późn.zm.) „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej „sądem koleżeńskim”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem (-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy”.

.....
podpis dyplomanta

Kraków,

Imię i nazwisko: Jakub Ściga
Nr albumu: 269496
Kierunek studiów: **Automatyka i Robotyka**
Specjalność: Automatyka i Metrologia

OŚWIADCZENIE

Świadomy/a odpowiedzialności karnej za poświadczanie nieprawdy oświadczam, że niniejszą magisterską pracę dyplomową wykonałem/łam osobiście i samodzielnie oraz nie korzystałem/łam ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Jednocześnie oświadczam, że dokumentacja oraz praca nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r. Nr 90 poz. 631 z późniejszymi zmianami) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym. Nie zawiera ona również danych i informacji, które uzyskałem/łam w sposób niedozwolony. Wersja dokumentacji dołączona przeze mnie na nośniku elektronicznym jest w pełni zgodna z wydrukiem przedstawionym do recenzji.

Zaświadczam także, że niniejsza magisterska praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów wyższej uczelni lub tytułów zawodowych.

.....
podpis dyplomanta

Kraków,

Imię i nazwisko: Jakub Ściga

Adres korespondencyjny: Chmieleniec 17/50

Temat magisterskiej pracy dyplomowej: Projekt rozproszonego sterowania układem ceramicznego pieca obrotowego.

Rok ukończenia: 2018

Nr albumu: 269496

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Automatyka i Metrologia

OŚWIADCZENIE

Niniejszym oświadczam, że zachowując moje prawa autorskie, udzielam Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie nieograniczonej w czasie nieodpłatnej licencji niewyłącznej do korzystania z przedstawionej dokumentacji magisterskiej pracy dyplomowej, w zakresie publicznego udostępniania i rozpowszechniania w wersji drukowanej i elektronicznej.

Kraków,

data

podpis dyplomanta

ⁱ Na podstawie Ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. 2005 nr 164 poz. 1365) Art. 239. oraz Ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2000 r. Nr 80, poz. 904, z późn. zm.) Art. 15a. "Uczelni w rozumieniu przepisów o szkolnictwie wyższym przysługuje pierwszeństwo w opublikowaniu pracy dyplomowej studenta. Jeżeli uczelnia nie opublikowała pracy dyplomowej w ciągu 6 miesięcy od jej obrony, student, który ją przygotował, może ją opublikować, chyba że praca dyplomowa jest częścią utworu zbiorowego."

Kraków, dnia

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI

TEMATYKA MAGISTERSKIEJ PRACY DYPLOMOWEJ
dla studenta II roku studiów stacjonarnych

Jakub Ściga
imię i nazwisko studenta

TEMAT MAGISTERSKIEJ PRACY DYPLOMOWEJ:
Projekt rozproszonego sterowania układem ceramicznego pieca obrotowego.

Promotor pracy: dr inż. Krzysztof Lalik

Recenzent pracy: dr hab. inż. Marek Sibielak

.....
Podpis dziekana:

Miejsce praktyki dyplomowej:

Wydział Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, przy ulicy Reymonta 23

PROGRAM PRACY I PRAKTYKI DYPLOMOWEJ

1. Omówienie tematu pracy i sposobu realizacji z promotorem.
2. Zebranie i opracowanie literatury dotyczącej tematu pracy.
3. Praktyka dyplomowa:
 - a. Zestawienie środowiska e!COCKPIT w laboratorium
 - b. Integracja sterownika PLC z modułami wejść i wyjść rzeczywistych
 - c. Przygotowanie programu sterowania
4. Zebranie i opracowanie wyników badań.
5. Analiza wyników badań, ich omówienie i zatwierdzenie przez promotora.
6. Opracowanie redakcyjne.

Kraków,
data *podpis dyplomanta*

TERMIN ODDANIA DO DZIEKANATU:

..... **2018 r.**

.....
podpis promotora

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Kraków,

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Specjalność: Automatyka i Metrologia

Jakub Ściga

Magisterska praca dyplomowa

Projekt rozproszonego sterowania układem ceramicznego pieca obrotowego.

Opiekun: dr inż. Krzysztof Lalik

STRESZCZENIE

Praca dyplomowa dotyczy analizy procesów spalania oraz podejmuje problematykę sterowania urządzeniami grzewczymi. Całość materiału jest podzielona na dwie części, z których pierwsza obejmuje wstęp teoretyczny, a druga budowę stanowiska badawczego i opis działania algorytmu sterowania. We wstępie został poruszony problem zanieczyszczeń występujących w Polsce. W następnym rozdziale został opisany proces spalania na poziomie cząsteczkowym. Następny fragment dotyczy metod spalania paliw gazowych, ciekłych oraz stałych, ze szczególnym rozwinięciem tematu spalania węgla i biomasy. Kolejne akapity obejmuje zagadnienia sterowania układów regulacji. Podjęta została analiza różnych typów regulatorów oraz metod ich strojenia, z wyróżnieniem regulatora PID. Następny rozdział rozpoczyna projektową część pracy. Opisuje one sterowniki PLC oraz budowę stanowiska laboratoryjnego, którym był piec ceramiczny z obrotowym rusztem. Urządzenie było sterowane za pomocą dwóch silników, odpowiedzialnych za podawanie paliwa i obrót rusztu, oraz dwanaście wentylatorów podłączonych szeregowo po dwóch stronach pieca. Informacje o temperaturze w komorze spalania były dostarczane poprzez czujniki w termoparach. Program umożliwiał tryb pracy ręcznej i automatycznej. Pierwsza opcja pozwala operatorowi włączać każde z wyjść sterownika oraz ustawiać jego szybkość obrotu. W trybie automatycznym program stara się osiągnąć zadaną wartość temperatury bez udziału operatora. Ostatni rozdział jest podsumowaniem prac nad realizacją projektu i problemów, wynikłych w trakcie jego tworzenia.

AGH University of Science and Technology
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

Kraków, the.....

Field of Study: Automatics and Robotics

Specialisations: Automatics and Metrology

Jakub Ściga

Master Diploma Thesis

Project of dispersed control system for ceramic rotary bake.

Supervisor: dr inż. Krzysztof Lalik

SUMMARY

The thesis concerns the analysis of the combustion processes and takes up the problem of controlling heating devices. The whole material is divided into two parts, the first includes the theoretical introduction and the second the construction of the research station and the description of the operation of the control algorithm. In the introduction, the problem of pollution occurring in Poland has been addressed. The next chapter describes the combustion process at the molecular level. The next fragment deals with the methods of burning gaseous, liquid and solid fuels with a special emphasis on the topic of coal combustion and biomass. Subsequent paragraphs cover control issues of control systems. Analysis of various types of regulators and methods of their tuning was undertaken, with the PID controller being distinguished. The next chapter begins the design part of the work. It describes PLC controllers and the construction of a laboratory stand, which is a ceramic furnace with a rotating grate. The device was controlled by two engines, responsible for supplying fuel and the rotation of the grid, and twelve fans connected in series on two sides of the furnace. Information about the temperature in the combustion chamber was provided by sensors in the thermocouples. The program enables manual and automatic mode. The first option allows the operator to enable each of the controller's outputs and set its rotation speed. In automatic mode, the program attempts to reach the set temperature without the operators intervention. The last chapter is a summary of the work on the implementation of the project and the problems that arose during its creation.

Spis treści

1. Wstęp	11
1.1 Cel i zakres pracy	12
2. Procesy spalania.....	13
2.1 Chemia spalania	13
2.1.1 Równania i przemiany chemiczne	13
2.1.2 Spalanie węglowodorów	14
2.2 Spalanie paliw	16
2.2.1 Spalanie paliw gazowych	16
2.2.2 Spalanie paliw ciekłych	17
2.2.3 Spalanie paliw stałych	19
2.3 Spalanie węgla	19
2.3.1 Etapy spalania węgla	20
2.3.2 Piroliza węgla	21
2.4 Spalanie biomasy	23
2.4.1 Spalanie drewna	23
2.4.2 Wykorzystanie drewna w przemyśle	24
2.5 Zgazowanie drewna	25
2.6 Spalanie odpadów	25
2.6.1 Odpady komunalne.....	26
2.6.2 Odpady medyczne	26
2.6.3 Odpady niebezpieczne.....	27
2.6.4 Drewno użytkowe.....	27
2.6.5 Osady ściekowe	27
2.6.6 Metody spalania odpadów	28

2.7	Zanieczyszczenia w procesach spalania.....	28
2.7.1	Dwutlenek węgla	29
2.7.2	Tlenki azotu	29
2.7.3	Tlenki siarki.....	29
3.	System regulacji.....	30
3.1	Układ regulacji	30
3.2	Projektowanie układów regulacji	32
3.3	Regulatory	33
3.3.1	Regulator P	35
3.3.2	Regulator PI.....	36
3.3.3	Regulator PD	37
3.3.4	Regulator PID	38
3.3.5	Dobór regulatora.....	39
3.4	Metody regulacji	40
3.4.1	Metoda Zieglera-Nicholsa	40
3.4.2	Kryterium stabilności aperiodycznej	42
3.4.3	Kryterium miejsca geometrycznego pierwiastków	42
3.4.4	Całkowe wskaźniki jakości	42
4.	Budowa stanowiska	45
4.1	Konfiguracja środowiska	48
4.2	Działanie programu	52
4.2.1	Wentylatory i silniki	52
4.2.2	Czujniki temperatury	54
4.2.3	Tryb automatyczny	55
4.2.4	Przyciski bezpieczeństwa	56
4.2.5	Maszyna stanów	57

4.3 Analiza wyników	63
5. Zakończenie.....	64
Bibliografia	66

1. Wstęp

W Polsce występuje duże zanieczyszczenie powietrza. Oddychanie w takich warunkach zwiększa ryzyko zachorowań na nowotwory, astmę, choroby płuc i infekcji dróg oddechowych, zawału serca i nadciśnienia tętniczego.

Jednym z głównych źródeł zanieczyszczeń jest ogrzewanie gospodarstw domowych węglem i drewnem. Spalanie tych paliw odpowiada za ponad 50% emisji pyłów (PM10) i 87% emisji rakotwórczego benzo(α)pirenu [1]. Pomieszczenia mieszkalne ogrzewane są zazwyczaj w wykorzystaniem kotłów. Dzieli się one na kotły z automatycznym oraz ręcznym załadunkiem paliwa i wg normy europejskiej PN EN 303-5:2012 należą do określonej klasy: 3, 4 lub 5. W Polsce jednak nadal używa się tanich pieców na węgiel i drewno, które nie spełniają wspomnianej normy i emitują duże ilości pyłów i substancji chorobotwórczych [1].

W obecnych czasach, kiedy szuka się alternatywnych źródeł energii, niezwykle interesującym zamiennikiem dla węgla staje się biomasa. Składa się ona z substancji organicznych pochodzenia zwierzęcego, roślinnego lub odpadów, które ulegają biodegradacji. Może mieć formę pierwotną lub przetworzoną. Biomasa jest otrzymywana z plantacji roślinnych, przeznaczonych na cele energetyczne oraz odpadów, powstałych przy produkcji i przetwarzaniu produktów rolniczych oraz hodowlanych [4].

Innym zamiennikiem jest drewno należące do paliw odnawialnych obok takich źródeł energii jak siła wiatru czy słońce, a dodatkowo posiadające zerowy bilans dwutlenku węgla (CO₂). Podczas wegetacji drzew jest on pobierany w procesie fotosyntezy, a emitowany w procesie spalania [2]. Nie jest jednak wystarczająco energetyczne, by móc konkurować na rynku z innymi paliwami.

Innym rodzajem biomasy, wykorzystywanym w przemyśle, jest pelet. Należy on do paliw odnawialnych. Otrzymuje się go poprzez prasowanie surowca pod wysokim ciśnieniem bez jakichkolwiek substancji klejących. Do produkcji peletu drzewnego są wykorzystywane odpady z tartaków i zakładów przeróbki drewna [10]. Ze względu na proces produkcji jest to paliwo przyjazne dla środowiska oraz łatwe w magazynowaniu i utrzymywaniu. Z powodu wysokiej wartości energetycznej pelety cieszą się coraz większym zainteresowaniem. W 2009 r. zużycie tego paliwa w Europie przekroczyło 10 000 000 ton [10].

1.1 Cel i zakres pracy

Praca dotyczy zgłębienia zagadnienia procesów spalania, przeglądu aktualnych rozwiązań oraz wyników badań symulacyjnych. Projekt pracy miał na celu przygotowanie algorytmu sterowania automatycznego ceramicznym piecem obrotowym na Wydziale Odlewnictwa AGH.

Zakres pracy obejmował zestawienie środowiska programowego oraz konfigurację sterownika WAGO oraz z zewnętrznymi modułami.

Następnym krokiem było przygotowanie ręcznego trybu pracy, który pozwalał operatorowi na swobodne włączanie i wyłączanie modułów wyjściowych sterownika PLC oraz manipulację ich parametrów. Sterownik posiadał także moduły wejściowe, które należało skalibrować tak, aby wskazywały aktualnie panującą wartość temperatury w piecu. Kolejnym etapem projektu była implementacja automatycznego trybu pracy. Cały proces spalania został podzielony na poszczególne fazy, które następnie zostały szczegółowo opisane, a później obsługiwane w programie.

Projekt ma posłużyć do zajęć laboratoryjnych z zakresu energetyki oraz do badań realizowanych na Wydziale Odlewnictwa.

2. Procesy spalania

Posługując się definicją prof. Kordylewskiego „Proces spalania jest zbiorem zjawisk fizycznych i chemicznych, często wzajemnie się warunkujących.” [5]. W niniejszym rozdziale poruszona zostanie problematyka procesu spalania, rodzajów paliw, metod ich spalania i utylizacji odpadów.

2.1 Chemia spalania

Procesu spalania w chemii nie można identyfikować z żadnym z tradycyjnych działów tej nauki. Łączy on w sobie zarówno chemię organiczną, nieorganiczną jak i fizyczną. Paliwami są zazwyczaj węgiel i węglowodory, które należą do chemii organicznej. W trakcie procesu spalania powstają związki, zazwyczaj o prostej budowie. Są to produkty pośrednie, końcowe lub uboczne i ze względu na brak atomów węgla mieszczą się w chemii nieorganicznej. Chemia fizyczna dotyczy szybkości i wpływu warunków zewnętrznych, w których przebiega proces spalania [5].

2.1.1 Równania i przemiany chemiczne

Reakcją chemiczną nazywany jest proces, w którym następuje rozpad lub powstanie nowych związków. Przemiany te są zapisywane za pomocą równań chemicznych. Zawierają one informacje o substratach i produktach każdej reakcji. Można z nich odczytać informacje o liczbie atomów w cząsteczce i liczbie cząsteczek, które biorą udział w określonej reakcji chemicznej [5].

Poruszana tu problematyka została przedstawiona na przykładzie dwóch reakcji chemicznych. Pierwsza z nich obrazuje proces spalania całkowitego etynu, którego nazwa zwyczajowa brzmi acetylen. Produktami tego procesu są dwutlenek węgla oraz para wodna.



Druga reakcja chemiczna jest przykładem reakcji syntezy. Przedstawia ona proces spalania metalicznego glinu, którego produktem jest tlenek glinu.



2.1.2 Spalanie węglowodorów

W procesach spalania węglowodorów istnieją dwa warianty mechanizmu utleniania - niskotemperaturowy oraz wysokotemperaturowy. Drugi wariant zachodzi w temperaturach rzędu 700-800 K, czyli ponad 550 °C [5].

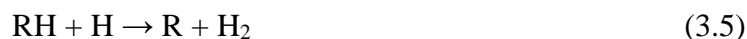
Wynika to z następujących przyczyn:

- dla alkanów, czyli węglowodorów nasyconych, szybkość utleniania niskotemperaturowego wzrasta gwałtownie wraz z długością łańcucha. Efekt ten zanika w wysokich temperaturach i wyższe węglowodory mają podobne temperatury spalania,
- na reakcje niskotemperaturowe duży wpływ mają wiązanie nadtlenkowe (-O-O-) oraz produkty pośrednie, które zawierają tlen, na przykład alkohole i aldehydy,
- węglowodory posiadają różną energię aktywacji w wariantach niskotemperaturowym i wysokotemperaturowym, a w obszarze pośrednim obserwuje się zwolnienie przebiegu reakcji chemicznej [5].

Poniżej, ze względu na temat pracy, omówione zostaną reakcje związane ze spalaniem wysokotemperaturowym.

Mechanizmy spalania są podobne dla wszystkich rodzin węglowodorów, tj. alkanów, alkenów i alkinów. Pierwsza grupa różni się od pozostałych tym, że wszystkie wiązania między atomami węgla z tych związków są pojedyncze. W reszcie występują kolejno wiązanie podwójne i potrójne. Dopuszczalne są także kombinacje między tymi grupami, ale nie jest to przedmiotem pracy. Podstawowym faktem odnośnie spalania węglowodorów (RH) jest to, że nie reagują one z atomowymi cząsteczkami tlenu i wodoru, ale z aktywnymi rodnikami tych pierwiastków. Są to przede wszystkim O, OH i H [5]. Reakcje z poszczególnymi rodnikami zostały przedstawione we wzorach 3.3, 3.4 i 3.5.





Wszystkie trzy reakcje polegają na oderwaniu atomu wodoru od łańcucha węglowodorowego. Na skutek tej operacji cząsteczka węglowodoru staje się rodnikiem i jest bardziej podatna na zmiany i rozpad.

Rodnik węglowodorowy reaguje z tlenem i przyczynia się do rozpadu łańcucha węglowodorowego do prostych związków chemicznych. Ten proces został zobrazowany na podstawie metanu o wzorze CH_4 , a którego rodnik ma postać CH_3 .



Związek HCHO , który powstaje w pierwszej reakcji 3.6, jest produktem pośrednim, który ulega rozpadowi w reakcji 3.7. Produktami końcowymi w reakcji 3.8 są para wodna (H_2O) oraz tlenek węgla (CO). Podczas spalania węglowodorów o dłuższym łańcuchu następuje przerwanie wiązania między atomami węgla, czego produktem jest rodnik CH_3 . Następne reakcje przebiegają analogicznie.

2.2 Spalanie paliw

Spalanie paliw zależy od ich stanu skupienia. Paliwa gazowe, ciekłe i stałe różnią się charakterystyką spalania i wymagają innych warunków pracy i bezpieczeństwa.

2.2.1 Spalanie paliw gazowych

Zapłon to intensywna reakcja egzotermiczna, wywołana w mieszaninie palnej. Jest to najbardziej powszechny sposób doprowadzenia układu do procesu spalania. Mieszaniną palną określa się substancję, w której płomień rozprzestrzenia się także po zaprzestaniu źródła zapłonu. Oznacza to, że iskra lub płomień powinny zapewnić tylko zapoczątkowanie procesu spalania. Taki sposób określa się mianem zapłonu wymuszonego. Drugi sposób to samozapłon. Polega on na doprowadzeniu mieszaniny do określonej temperatury, zwanej temperaturą samozapłonu.

Po zainicjowaniu reakcji w substancji pojawia się płomień. Jeśli przewód jest dostatecznie długi, zamknięty z jednej strony i wypełniony w całości palną mieszaniną, to płomień ten będzie się przesuwać w stronę zamkniętego elementu. To zjawisko nazywane jest spalaniem laminarnym [5]. Od niedawna stosowana jest także nowa technologia zapłonu bezpłomieniowego. Pozwala ona na „podwyższenie efektywności cieplnej procesu spalania i przede wszystkim na zmniejszenie emisji tlenków azotu i tlenku węgla” [5]. Prowadzone są badania nad wprowadzeniem tej technologii nie tylko w paleniskach przemysłowych, ale również w kotłach opalanych pyłem węglowym. Wymaga ona jednak spełnienia określonych warunków odnośnie temperatury, składu mieszaniny palnej oraz ukształtowania aerodynamiki strumieni powietrza, paliwa, spalin. Najbardziej znaczącymi parametrami są:

- Temperatura powietrza dostarczanego do komory spalania powinna być wyższa od temperatury zapłonu paliwa.
- Konieczny jest wysoki stopień recyrkulacji spalin w miejsce mieszania się paliwa z utleniaczem przed rozpoczęciem procesu spalania.
- Spalanie powinno przebiegać przy niskim stężeniu tlenu, tj. poniżej 2-5% objętości.

- Dysze powietrza i paliwa powinny być ustawione w taki sposób, żeby ich mieszanie zachodziło w dalszej części komory spalania. Umożliwia to wcześniejsze wymieszanie ze spalinami, co zwiększa strefę reakcji w kotle [5].

Pojęcie bezpłomieniowego spalania nie jest jeszcze do końca poznane. Proces jest kontrolowany przez kinetykę chemiczną i mieszanie się paliwa z utleniaczem. Stopniowy dopływ utleniacza do paliwa w obecności spalin umożliwia równomierny rozkład temperatur i stymuluje procesy pirolityczne, czego wynikiem jest redukcja tlenków azotu [5].

2.2.2 Spalanie paliw ciekłych

Proces spalania paliw ciekłych składa się z dwóch faz: odparowania i skraplania par. Na szybkość reakcji wpływają przede wszystkim trzy czynniki:

- parowanie cieczy,
- mieszanie par z utleniaczem,
- kinetyka chemiczna reagowania paliwa z tlenem [5].

Szybkość parowania cieczy zależy od strumienia ciepła, które jest doprowadzane do paliwa ciekłego. W dalszej kolejności istotne są: szybkość mieszania i kinetyka chemiczna. Podczas spalania paliw ciekłych bardzo istotna jest struktura i rozdrobnienie paliwa.

Zależności między rozmiarem kropeł zostały przedstawione w tabeli 3.1.

Tab. 3.1. Porównanie procesu spalania dla różnych form paliw ciekłych [5]

Paliwo ciekłe rozpylone na drobne krople	Paliwo ciekłe rozpylone na większe krople	Paliwo ciekłe o znacznej powierzchni
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Szybko parują; ▪ Pary tworzą z powietrzem homogeniczną palną mieszaninę; ▪ Płomień ma charakter kinetyczny; ▪ Szybkość spalania zależy od propagacji płomienia; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Krople spalają się indywidualnie; ▪ Tworzy się dyfuzyjny płomień, do którego tlen dopływa z powietrza, a pary docierają z kropli; ▪ Szybkość spalania równa się szybkości parowania; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spalanie ma charakter pożaru zbiornika; ▪ Gorące produkty spalania powodują napływ chłodnego powietrza; ▪ Dostęp do par jest utrudniony, dlatego płomień jest bogaty i produkuje sadzę; ▪ Szybkość spalania jest zależna od ruchów powietrza;

Spalanie paliw ciekłych polega zazwyczaj na rozpylaniu i spalaniu kropeł. Podczas spalania pojedyncza kropla jest otoczona przez płomień, który przekazuje do niej ciepło. Kiedy jej temperatura zbliża się do temperatury wrzenia, zaczyna ona parować. Wydziela się strumień pary, który powoduje dyfuzję z otoczenia strumienia tlenu. Oba strumienie reagują w płomieniu [5]. Podczas spalania paliw węglowodorowych szybkość reagowania znacznie przekracza szybkość dopływu powietrza i par do płomienia, z czego wynika charakter dyfuzyjny procesu. Szybkość spalania kropli paliwa ciekłego jest kontrolowana przez szybkość dyfuzji tlenu do płomienia.

2.2.3 Spalanie paliw stałych

Węgiel był do niedawna jedynym paliwem stałym w przemyśle energetycznym i ciepłowniczym. Z powodów ekonomicznych i ekologicznych obecnie na rynku zaistniały takie paliwa jak: muł węglowy, koks petrochemiczny, biomasa i odpady. Wszystkie stałe paliwa mają pochodzenie organiczne, jednakże różnice w ich strukturze i właściwościach wymagają różnych technologii spalania [5].

2.3 Spalanie węgla

Istnieją dwa główne sposoby spalania węgla. Zostały one zobrazowane w tabeli 3.2.

Tab. 3.2. Sposoby organizacji spalania węgla [5]

Palenisko rusztowe	Złoże fluidalne	Płomień pyłowy
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Z rusztem stałym ▪ Z rusztem obrotowym 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pęcherzykowe ▪ Cyrkujące 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pozostałości na sicie

Spalanie na ruszcie jest najbardziej powszechnym wariantem spalania węgla. Powietrze przepływa przez leżącą na ruszcie warstwę węgla, a strefa spalania przemieszcza się, w zależności od budowy pieca, od dołu do góry lub odwrotnie. W warstwie następuje termiczny rozkład węgla oraz spalanie części lotnych. Proces przebiega proporcjonalnie do ruchu powietrza. Pozostałości koksowe po odgazowaniu węgla utleniają się w kontakcie z tlenem i dwutlenkiem węgla. Tlenek węgla i inne części lotne dopalają się nad warstwą węgla [5].

W przypadku złoża fluidalnego cząsteczki węgla znajdują się w ciągłym ruchu, w ciągłym kontakcie z gorącym materiałem złoża. Od spodu podawane jest powietrze fluidyzujące, które służy do spalania węgla, a ponad warstwą fluidalną podawane jest powietrze wtórne, służące do dopalania się tlenku węgla i części lotnych. W cyrkulującym złożu fluidalnym małe cząsteczki węgla są porywane z warstwy fluidalnej i zawracane do miejsca separatora pyłu, co zwiększa intensywność i efektywność spalania [5].

Paleniska pyłowe wymagają największego rozdrobnienia węgla. Do paleniska podawana jest palnikami pyłowymi specjalna mieszanina pyłu i powietrza, która ulega spalaniu w płomieniu pyłowym.

2.3.1 Etapy spalania węgla

Kiedy węgiel dostaje się do płomienia, nagrzewa się i spala. Cały proces spalania dzieli się na konkretne etapy:

- nagrzewanie cząstki węgla w płomieniu,
- zapłon cząstki węgla,
- wydzielanie się i spalanie części lotnych,
- spalanie pozostałości koksowej,

Na początku procesu cząsteczka węgla nagrzewa się od gorących spalin i przez promieniowanie płomienia. Szybkość nagrzewania się węgla zależy od rozmiaru elementów i temperatury. Po utracie wody w cząstce węgla wzrasta jej temperatura. Kiedy osiągnie ona określoną wartość dochodzi do pirolizy, czyli termicznego rozkładu węgla. Z cząstki wydzielają się palne substancje lotne, które ulegają zapłonowi. Czas potrzebny do zapłonu całej cząsteczki nazywany jest czasem indukcji zapłonu [5]. Zapłon zależy od takich parametrów jak: szybkość nagrzewania, temperatura zapłonu, zawartość wody w węglu i rodzaj węgla.

Dla poszczególnych typów węgla temperatura zapłonu wynosi kolejno:

- Węgiel brunatny: 600-670 K
- Węgiel kamienny: 720-760 K
- Antracyt: > 780 K

Spalanie węgla przebiega w dwóch etapach. W pierwszym z nich z węgla wydzielają się substancje lotne, które spalają się w płomieniu. Uzyskane przy tym ciepło przyspiesza pirolizę węgla. Czas spalania części lotnych zależy przede wszystkim od wielkości cząsteczek węgla, temperatury, zawartości części lotnych w węglu oraz kinetyki ich wydzielania [5].

Druga część spalania dotyczy pozostałości koksowej. W przeciwieństwie do substancji lotnych spala się ona powoli. Charakter reakcji z tlenem zawartym w powietrzu jest

bezpłomieniowy. Szybkość spalania części koksowej zależy od wielkości cząstki węgla, jej porowatości i reaktywności oraz temperatury i stężenia tlenu.

2.3.2 Piroliza węgla

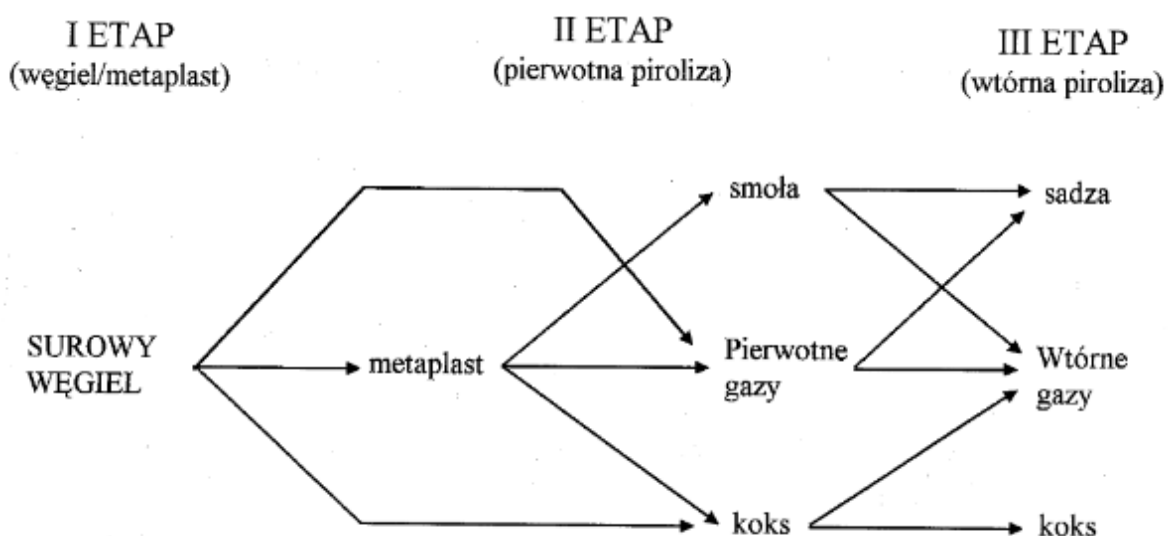
Piroliza to rozkład termiczny substancji bez udziału tlenu. Węgiel, który ulega pirolizie, wydziela produkty gazowe – części lotne oraz ciekłe – smołę. Pozostałość koksową, która nie ulega spalaniu, nazywa się karbonizatem. Proces pirolizy jest złożony i uzależniony od takich czynników jak temperatura, szybkość nagrzewania się, zawartość tlenu oraz rodzaj węgla [5]. Jej mechanizm jest rodnikowy. Podniesiona temperatura powoduje przerwanie wiązań węgla, czego skutkiem jest powstanie wolnych rodników. One z kolei, jak było wspomniane na początku rozdziału, reagują z tlenem i wodorem i na skutek różnych przemian fizycznych mają wpływ na produkty procesu spalania.

Dla węgla o średnim stopniu uwęglenia można wyróżnić trzy fazy rozkładu:

- Węgiel → metaplast
- Metaplast → półkoks + smoła (odgazowanie pierwotne 350-500 °C)
- Półkoks → koks + sadza + gaz (odgazowanie wtórne > 500 °C) [5]

W pierwszym etapie wydzielają się para wodna, dwutlenek węgla, siarkowodór oraz gazy palne. W drugiej części intensywnie wydziela się smoła i zwiększa się wydzielanie gazów. W końcowym etapie pirolizie ulega półkoks. Produktem stałym procesu termicznego rozpadu węgla jest koks.

Poszczególne etapy pirolizy zostały przedstawione na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Etapy procesu pirolizy węgla [5]

Drugi etap jest widoczny tylko dla węgla średniouwęglonych, zwanych także koksującymi. Miękną one w tym etapie i stają się plastyczne. Z powodu równoczesnego wydzielania się gazowych substancji węgla plastyczna masa wydyma się na zewnątrz. Węgłe niskouwęglone zawierają bitumity, które ulegają rozkładowi w temperaturze 350-500 °C. Z tego powodu nie przechodzą one przez stan plastyczny. Węgłe wysokouwęglone z kolei nie posiadają lub posiadają małe ilości bitumitów, co powoduje, że wydzielają małą ilość części lotnych [5].

2.4 Spalanie biomasy

Istnieje wiele rodzajów biomasy, które nadają się do wykorzystania w energetyce. Mnogość gatunków powoduje, że opracowano wiele technicznych rozwiązań stosowania biomasy jak nośnika energii. Największym zainteresowanie cieszy się biomasa o strukturze lignino-celulozy, a więc składająca się z drewna lub odpadów po produkcji roślinnej [5].

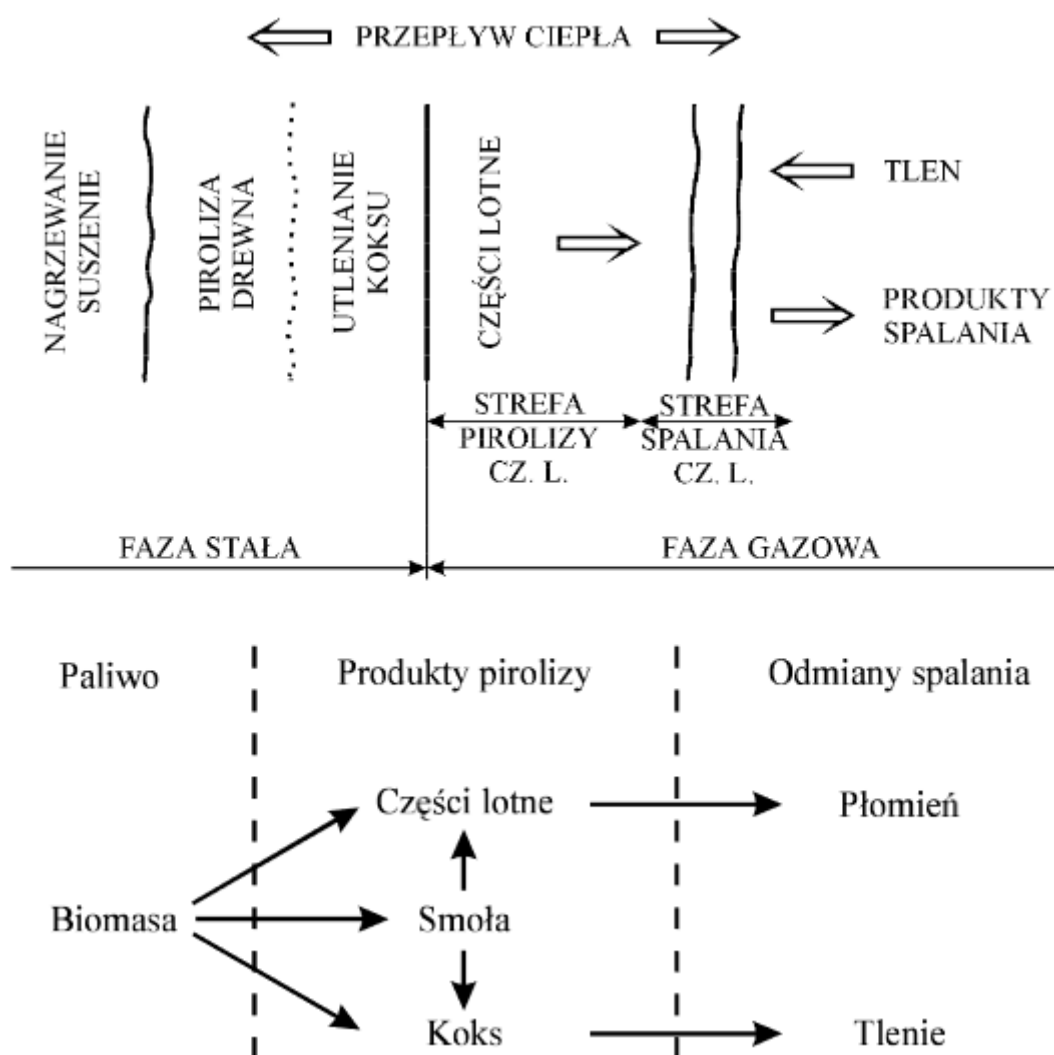
2.4.1 Spalanie drewna

Ze względu na dużą zawartość wody i części lotnych w drewnie, posiada ono specyficzną charakterystykę spalania. Można w niej wyróżnić cztery fazy:

- nagrzewanie i suszenie,
- rozkład termiczny (piroliza),
- spalanie produktów pirolizy,
- spalanie pozostałości koksowej,

Drewno w pierwszym etapie nagrzewa się i suszy bez reakcji chemicznych. Podczas pirolizy w pierwszej kolejności spalają się produkty lotne, a na końcu karbonizat. Podczas analizy termicznego spalania drewna trzeba brać pod uwagę energię potrzebną do wysuszenia materiału, a podczas badania szybkości spalania należy pamiętać, że woda zwiększa przewodność temperaturową [5].

Poszczególne fazy procesu spalania drewna zostały umieszczone na rysunku 3.2.



Rys. 3.2. Etapy procesu pirolizy drewna [5]

Proces spalania drewna jest podobny do spalania młodych węgli, zwłaszcza brunatnych. Duży udział części lotnych oznacza, że istotnym elementem procesu jest odgazowanie drewna i spalenie tych części. W procesie spalania wydzielą się 60-70% wartości opałowej drewna [5].

2.4.2 Wykorzystanie drewna w przemyśle

Wykorzystanie drewna do celów energetycznych często wymaga więcej pracy niż wykorzystanie węgla. W przeciwieństwie do węgla, drewna nie pozyskuje się na

zamówienie, ale najpierw trzeba je przygotować. Musi być ono rozdrobnione i posegregowane. Następnym problemem jest transport drewna i jego załadunek do kotła. Części drewna muszą być odpowiedniej wielkości i kształtu [5]. Zapotrzebowanie na biomasę spowodowało, że na rynku pojawiły się formy drewna, które wyszły naprzeciw wspomnianym utrudnieniom. Drewno można obecnie nabyć w różnej postaci. Występują między innymi krótkie i długie kawałki (zrębki i gałęzie), wiązki (chrust), odpady (ścinki), plastry, trociny, granulki, brykiety oraz kory. Jako formę wygodną do spalania stosuje się zrębki. Bardzo rozdrobnione elementy scala się na brykiety [5].

2.5 Zgazowanie drewna

Drewno posiada dużą zawartość części lotnych. Z tego powodu jest ono uważane za przyszłościowy surowiec, który może być wykorzystywany do pozyskiwania paliwa gazowego. Rozważa się także pozyskiwanie wodoru z procesu spalania drewna [5]. Zgazowanie drewna polega na działaniu czynnika zgazowującego w podniesionej temperaturze przy niedoborze tlenu. W przypadku biomasy takim czynnikiem jest zazwyczaj powietrze. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury zachodzi proces rozkładu termicznego lignino-celulozy z wydzielaniem części lotnych, które stanowią ok 80-90% masy drewna. Niestety uzyskany w tym procesie gaz jest niskiej jakości i posiada wiele zanieczyszczeń. W większości składa się z części niepalnych, wśród których najwięcej jest azotu (N_2) i wody (H_2O). Części palne to zazwyczaj tlenek węgla (CO), wodór (H_2) i węglowodory. Najbardziej zanieczyszczonym produktem zgazowania biomasy jest smoła, która składa się z węglowodorów o skomplikowanych, wielopierścieniowych łańcuchach. Proces oczyszczania smoły jest kosztowny i trudny [5].

2.6 Spalanie odpadów

W Unii Europejskiej obowiązuje podział na dwadzieścia grup odpadów, które z kolei dzieli się na podgrupy i rodzaje. Ze względu na pochodzenie można podzielić odpady na:

- odpady komunalne;
- odpady medyczne;

- odpady niebezpieczne;
- drewno użytkowe;
- sady ściekowe.

2.6.1 Odpady komunalne

Do odpadów komunalnych zaliczamy te, które powstają w gospodarstwach domowych, obiektach publicznych i miejscach obsługi ludności. Do tej kategorii należą także odpady uliczne oraz wraki pojazdów mechanicznych. Głównym kryterium podziału odpadów komunalnych jest palność, stąd dzielimy je na palne i niepalne [5].

2.6.2 Odpady medyczne

Odpady medyczne pochodzą z ośrodków opieki, takich jak szpitale, przychodnie, kliniki medyczne i weterynaryjne. Ważnym zagadnieniem jest ich bezpieczne magazynowanie, gdyż mogą one zawierać czynniki chorobotwórcze, takie jak wirusy, bakterie, grzyby czy pasożyty. Dlatego też powinny być one przechowywane w specjalnych pojemnikach. Głównymi operacjami przetwarzania odpadów szpitalnych jest rozdrabnianie i sanitacja, czyli wyjąławianie materiałów. Odbywa się ono zazwyczaj przez dezynfekcję środkami chemicznymi lub wyjąławianie parowe.

2.6.3 Odpady niebezpieczne

Odpady niebezpieczne łączą w sobie wiele rodzajów odpadów. Pochodzą one zazwyczaj z laboratoriów badawczych, szpitali, gospodarstw domowych i rolnych. Wśród najbardziej niebezpiecznych substancji można wymienić rozpuszczalniki, konserwanty, kwasy, związki metali ciężkich i chlorowcopochodne. Jedną z podgrup odpadów niebezpiecznych są odpady zwierzęce. Dzieli się je na dwie kategorie: wysokiego i niskiego ryzyka. Do pierwszej grupy należy padlina, a do drugiej odpady poubojowe.

2.6.4 Drewno użytkowe

Do tej grupy należą wszelkie elementy wykonane z drewna jak meble, elementy konstrukcyjne, opakowania i inne. W Polsce produkuje się bardzo dużo drewna użytkowego, stąd wymagana jest odpowiednia utylizacja tych odpadów. Wykorzystuje się je głównie do procesów spalania i zgazowania. Bezpośrednie wykorzystanie drewna użytkowego do spalania niesie ze sobą ryzyko emisji toksycznych substancji, które pochodzą z materiałów uzdatniających drewniane elementy.

2.6.5 Osady ściekowe

Jednym z trudniejszych problemów gospodarki odpadów jest temat osadów z oczyszczalni ścieków. Osady ściekowe to „organiczno-mineralna faza stała, wyodrębniona ze ścieków komunalnych w procesie sedymentacji” [5]. Składają się one z substancji ciekłych i stałych różnego pochodzenia. W większości są to proteiny, węglowodany, tłuszcze i oleje. Mogą one zawierać niebezpieczne substancje organiczne, nieorganiczne, toksyczne, a nawet chorobotwórcze mikroorganizmy. Transport osadów ściekowych odbywa się po uprzednim odwadnianiu. Jest to proces obejmujący zagęszczanie, odwadnianie właściwe oraz suszenie. Istnieją trzy metody stabilizacji odpadów ściekowych. Należą do nich fermentacja beztlenowa, wapnowanie oraz obróbka termiczna [5].

2.6.6 Metody spalania odpadów

Spalanie jest jedną z głównych metod termicznego przekształcania odpadów. Proces spalania jest pojmowany jako proces rozkładu składników organicznych w temperaturze powyżej 600 °C.

Metody termicznego przekształcania odpadów niebezpiecznych mają osobną specyfikę, ponieważ ich najważniejszym celem jest zmniejszenie objętości i detoksyfikacja. Uzyskanie energii staje się drugorzędne. Do najbardziej rozpowszechnionych metod utylizacji niebezpiecznych odpadów należą:

- spopielenie;
- piroliza;
- zesklenie;
- spalanie płomieniowe;
- detonacja.

2.7 Zanieczyszczenia w procesach spalania

Procesy spalania są głównym źródłem zanieczyszczeń emitowanych do powietrza, do których zaliczają się wszystkie produkty spalania z wyjątkiem pary wodnej, tlenu oraz azotu. Poza problemami lokalnymi, które można zaobserwować np. w tworzącym się nad miastami smogu, widoczne są również efekty na skalę globalną. Zaliczamy do nich przede wszystkim: efekt cieplarniany, dziurę ozonową i kwaśne deszcze [5].

Głównymi produktami spalania paliw są dwutlenek węgla oraz para wodna. Jednak paliwa nie składają się wyłącznie z jednorodnych łańcuchów węglowodorowych, ale zawierają także inne pierwiastki. Wiele z nich, jak na przykład azot, siarka, fosfor i pierwiastki metaliczne, wchodzi w skład materii żywej. Najbardziej powszechnymi zanieczyszczeniami są dwutlenek węgla (CO_2) oraz tlenki azotu (np. NO_2) i siarki (np. SO_2).

2.7.1 Dwutlenek węgla

Szacuje się, że roczna emisja CO₂ wynosi 20 000 000 000 000 kg. Ograniczenie emisji dwutlenku węgla jest problemem trudnym do rozwiązania z powodu dużej zawartości węgla w paliwach kopalnych. Najbardziej skutecznymi metodami zmniejszenia produkowania CO₂ jest racjonalizacja zużycia energii i poprawa sprawności pozyskiwanej z paliw energii cieplnej oraz elektrycznej [5].

2.7.2 Tlenki azotu

Azot występuje w przyrodzie na różnych stopniach utlenienia. Podczas procesów spalania tworzy z tlenem trzy rodzaje związków: N₂O, NO oraz NO₂, w których azot jest kolejno na pierwszym, drugim i czwartym stopniu utlenienia.

Związany w węglu azot pochodzi z materii węglotwórczej czyli roślin, białek, aminokwasów i alkaloidów [5]. Zawartość azotu w węglu kamiennym waha się między 0,6-2,8%, a w węglu brunatnym wynosi między 0,6-2% wagi materiału.

2.7.3 Tlenki siarki

Emisja siarki jest o rząd wielkości mniejsza niż emisja dwutlenku węgla i wynosi ok. 20 miliardów kilogramów. Ilość uwalnianego pierwiastka w procesach gnilnych i wulkanicznych jest porównywalna.

Zostały opracowane metody, które umożliwiają usuwanie siarki z paliwa. Największą popularnością cieszą się one w wypadku gazu ziemnego. Usunięcie siarki z węgla jest znacznie trudniejszym procesem. Aktualnie wykorzystywane są w tym celu stosunkowo duże różnice gęstości parytu.

3. System regulacji

System w automatyce jest rozumiany jako zbiór elementów połączonych między sobą i „stanowiący całość o określonym przeznaczeniu i scharakteryzowany pewną liczbą wielkości zwanych zmiennymi stanu” [7]. System składa się z dwóch części. Jedna dotyczy obiektu sterowania, którym jest urządzenie, a którego działanie jest sercem działania systemu sterowania. Drugim elementem jest system sterujący. Jeżeli stany systemu sterującego nie zależą od stanu obiektu, to mamy do czynienia z torem otwartym. W przeciwnym razie, kiedy występuje sprzężenie zwrotne, mówimy o układzie zamkniętym lub regulacji.

3.1 Układ regulacji

W automatyce wyróżnia się dwa podstawowe sposoby sterowania. Należą do nich:

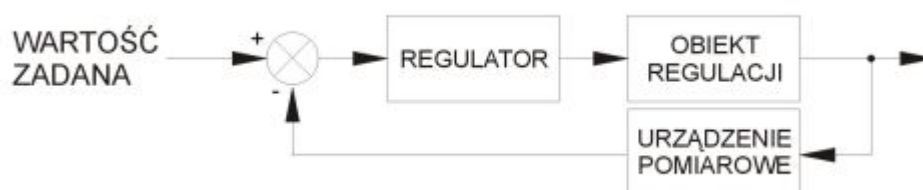
- układ otwarty;
- układ zamknięty, czyli ze sprzężeniem zwrotnym.

Działanie poszczególnych rodzajów układów zostało zobrazowane na rysunkach 4.1 i 4.2.



Rys 4.1. Układ otwarty I

Celem regulacji jest uzyskanie określonej wartości sygnału wyjściowego. W układzie otwartym system sterujący nie dostaje informacji od obiektu regulacji i nie posiada możliwości kompensacji ewentualnych zakłóceń w torze głównym. Te przyczyny powodują, że ciężko zrealizować cel regulacji. W tego powodu w przemyśle, w miarę możliwości, wykorzystuje się układy zamknięte.



Rys. 4.2. Układ zamknięty

Na powyższym rysunku widać znaczącą różnicę. W układzie istnieje sprzężenie zwrotne, którym do regulatora przekazywana jest informacja o stanie sygnału wyjściowego. Taka struktura pozwala na przygotowanie dokładnego algorytmu regulacji, który będzie uwzględniał stan obiektu oraz zakłócenia w układzie. Na zakłócenia wpływają eksploatacja układu, starzenie się elementów, warunki pracy oraz warunki klimatyczne. Wszystko to doprowadza do zmian parametrów, takich jak sprężystość, tłumienie czy przewodność cieplna i elektryczna, co skutkuje zmianą pracy całego systemu [7]. Podstawowym zadaniem układu regulacji jest osiągnięcie zadanego celu, pomimo występujących zakłóceń. Istnieją różne typy układów regulacji, które różnią się algorytmem pracy. Wśród nich wyróżniamy:

- Układy stałowartościowe – mają one za zadanie utrzymanie stałej, zadanej wartości sygnału wyjściowego. Ten rodzaj jest wykorzystywany np. w procesach spalania, gdzie istotna jest praca w określonych wartościach temperatury.
- Układy nadążne – gdzie sygnał wyjściowy podąża za wyznaczoną wcześniej trajektorią. Ten typ można spotkać np. w lotnictwie.
- Układy programowane – sygnał wyjściowy zależy od algorytmu. Przykładem użycia tego rodzaju jest obrabiarka CNC [7].

3.2 Projektowanie układów regulacji

Układy regulacji są projektowane według określonych kryteriów. Na cały proces składają się takie elementy, jak:

- analiza zadania;
- projekt wstępny;
- identyfikacja modelu układu regulacji;
- analiza właściwości układu oryginalnego (niekorygowanego);
- korekcja właściwości układu;
- analiza właściwości układu skorygowanego [8].

W ramach analizy zadania projektant rozważa problemy, które dotyczą warunków pracy oraz wymagań, które musi spełniać dany układ. Do takich parametrów możemy zaliczyć przede wszystkim dokładność statyczną i dynamiczną, czyli uchyb ustalony oraz przeregulowanie i czas regulacji [8].

Drugi krok dotyczy przygotowania projektu wstępnego, czyli koncepcję rozwiązania danego zadania. Ten etap ściśle wiąże się z identyfikacją obiektu regulacji. Znajomość modelu jest kluczowa do przygotowania poprawnego algorytmu sterowania, ponieważ każdy typ obiektu cechuje się innymi właściwościami. Przykładowo, odpowiedź obiektów inercyjnych ustala się na określonej wartości, a dla obiektu całkującego dąży do nieskończoności. Z tego wynika, że metody regulacji dla obu przypadków będą różne, ponieważ zachowanie samych obiektów jest inne.

Następnie analizuje się zachowanie układu nieskorygowanego, czyli bez włączonego regulatora. Liczy się uchyb statyczny, przeregulowanie, czas regulacji przy określonych warunkach, np. skokowym sygnale wymuszającym oraz stałym zakłóceniu i porównuje otrzymane wyniki z wymaganiami [8]. Jeżeli rezultaty nie spełniają założeń projektowych należy dostroić układ. Celem korekcji może być likwidacja uchybu ustalonego, zmniejszenie lub likwidacja przeregulowania lub skrócenie czasu regulacji.

Kolejnym etapem jest dobór odpowiedniego regulatora, którego praca umożliwi osiągnięcie zadanych wartości. Projektant powinien dobrać odpowiednie parametry regulatora, takie jak wzmocnienie i stałe czasowe.

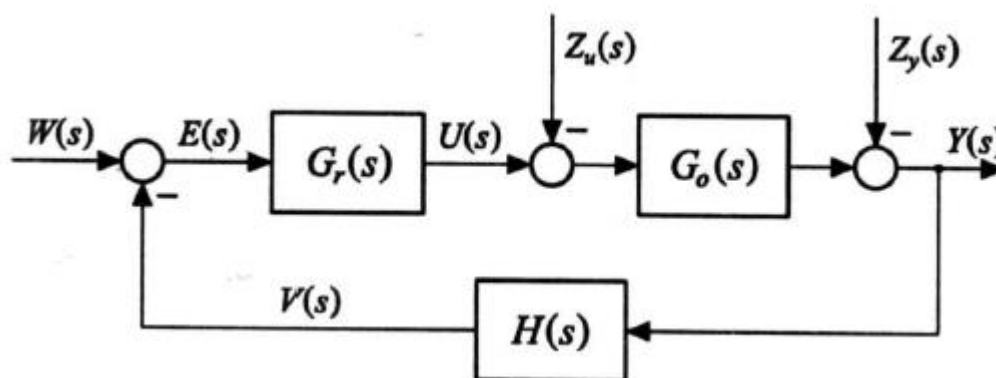
Ostatnim krokiem jest analiza układu skorygowanego, czyli z działającym regulatorem i porównanie otrzymanych wyników z wymaganiami. Etap projektowania kończy się kiedy zastosowany algorytm regulacji spełni wszystkie cele regulacji.

3.3 Regulatory

Według definicji prof. Oprędkiewicz „regulatorem nazywamy człon wprowadzony do układu dla poprawienia właściwości eksploatacyjnych tego układu” [8]. Są one wykorzystywane przede wszystkim do takich zastosowań, jak:

- Minimalizacja uchybu statycznego oraz ukształtowanie charakterystyk dynamicznych układu;
- Zmniejszenie wpływu zakłóceń;
- Utrzymywanie sygnału wyjściowego na stałym poziomie w układach stałowartościowych;
- Poprawa nadążności sygnału wyjściowego za sygnałem wejściowym w układach nadążnych [3].

Typowy układ z regulatorem ma postać:



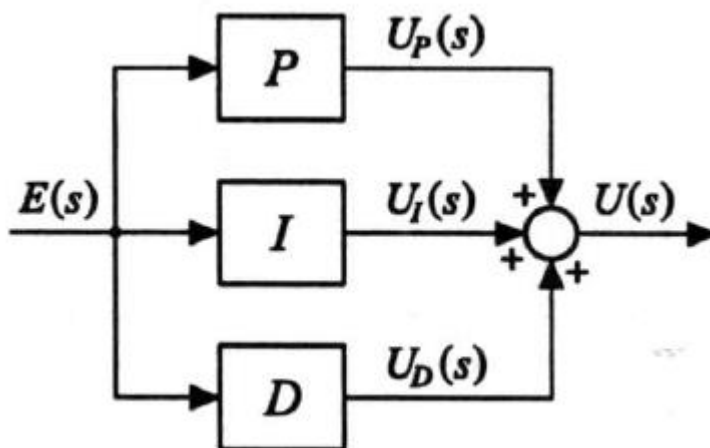
Rys. 4.3. Schemat blokowy układu zamkniętego z regulatorem [3]

Konwencjonalne regulatory można podzielić ze względu na sposób przetwarzania sygnału uchybu $E(s)$ w sygnał $U(s)$ (Rys. 4.3.):

- Regulatory liniowe;
- Regulatory dwupołożeniowe;
- Regulatory trójpłaszczyńowe;

- Regulatory impulsowe [3].

W tej pracy zostanie poruszona tematyka pierwszego typu regulatorów. Zasada działania regulatorów liniowych została przedstawiona na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Schemat blokowy regulatora PID [3]

Regulator składa się z trzech części, które biorą swoje nazwy z języka angielskiego:

- P (*ang. proportional*) – część proporcjonalna
- I (*ang. integral*) – część całkująca
- D (*ang. derivative*) – część różniczkująca

Sygnał wyjściowy regulatora w pełnej formie ma postać:

$$U(s) = U_P(s) + U_I(s) + U_D(s) \quad (4.1.)$$

W praktyce wykorzystuje się kilka wariantów regulatora liniowego:

- Regulator P – regulator proporcjonalny
- Regulator PI – regulator proporcjonalno-całkujący
- Regulator PD – regulator proporcjonalno-różniczkujący
- Regulator PID – regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący

Nie zyskał zastosowania samodzielny regulator I, ponieważ posiada duży wpływ na własności dynamiczne układu. Obecność regulatora D ogranicza się jedynie do przebiegów przejściowych, więc także nie spełnia on wymagań przemysłu [3].

3.3.1 Regulator P

Regulator P jest podstawowym wariantem regulatora liniowego. Sygnał wyjściowy regulatora jest proporcjonalny do sygnału uchybu w układzie.

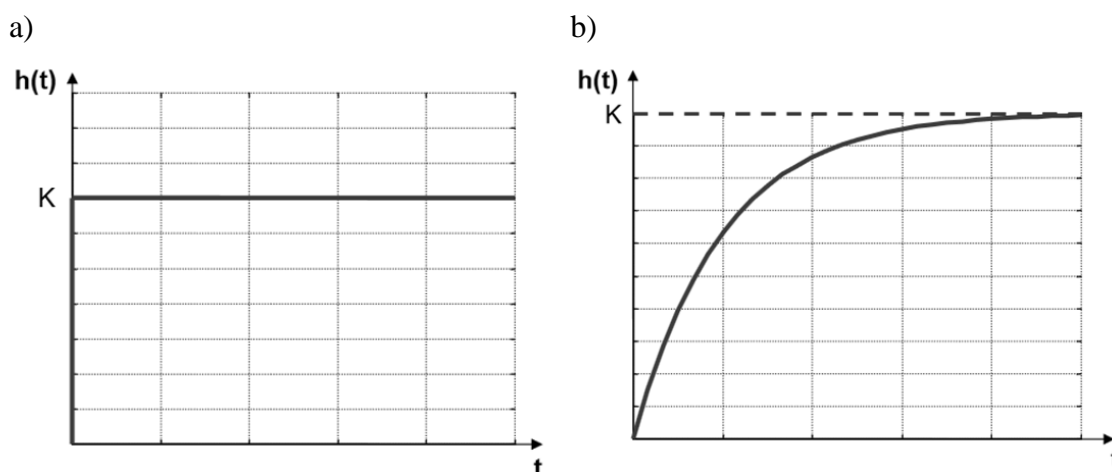
Transmitancja idealnego regulatora P ma następującą postać:

$$G_{Rid}(s) = K_r \quad (4.2)$$

W przypadku regulatorów analogowych występuje inercyjność, która wynika z konstrukcji elementów regulatora. Rzeczywista funkcja przejścia regulatora P przyjmuje wtedy formę opisaną przez wzór 4.3.

$$G_{Rrz}(s) = \frac{Kr}{Ts+1} \quad (4.3)$$

Na rysunku 4.3. przedstawiono porównanie sygnałów wyjściowych regulatora P w formie idealnej i rzeczywistej.



Rys. 4.5. Porównanie odpowiedzi a) idealnego i b) rzeczywistego regulatora P [8]

Inercja regulatora rzeczywistego (Rys. 4.5b.) zależy od stałej czasowej T i jej wartość rośnie proporcjonalnie do niej.

3.3.2 Regulator PI

Drugim typem regulatora jest regulator proporcjonalno-całkujący.

Funkcja przejścia regulatora PI w wersji idealnej i rzeczywistej została przedstawiona we wzorze 4.3. i 4.4:

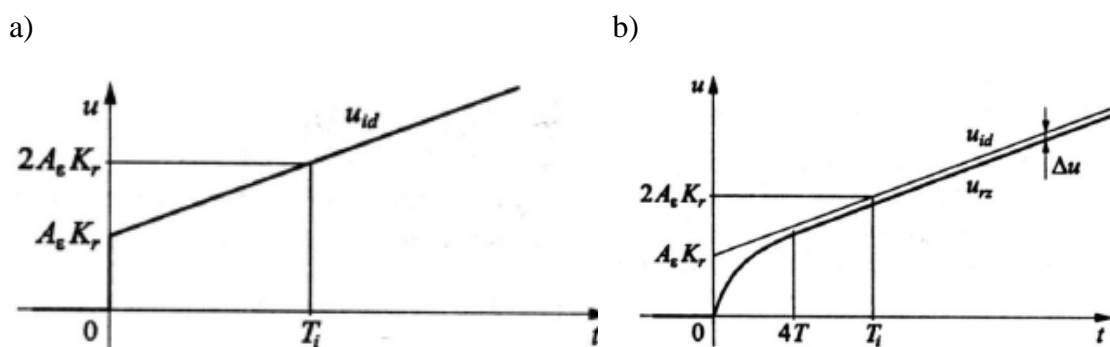
$$G_{Rid}(s) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (4.3)$$

$$G_{Rrz}(s) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s + 1}\right) \quad (4.4)$$

gdzie:

- K_r – nastawialne wzmocnienie
- T_i – nastawialna stała czasowa zwana czasem zdwojenia [3]

Charakter pracy regulatora PI wyraża przebieg jego funkcji przejścia. Został on przedstawiony na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Porównanie odpowiedzi a) idealnego i b) rzeczywistego regulatora PI [3]

Na rysunku 4.4a. wyraźnie widać znaczenie stałej T_i w transmitancji regulatora. Nazywana jest ona czasem zdwojenia, ponieważ po upływie czasu, jaki przedstawia, wartość sygnału rośnie dwukrotnie.

W przeciwieństwie do regulatora P odpowiedź regulatora z elementem całkującym zmierza do nieskończoności. Ten typ wykorzystywany jest przede wszystkim do eliminacji uchybu w układzie.

3.3.3 Regulator PD

Regulatorem PD nazywamy człon, którego odpowiedź zawiera sumę części proporcjonalnej i różniczkującej sygnału uchybu.

Transmitancja idealnego regulatora PD została przedstawiona we wzorze 4.5.

$$G_{Rid} = K_r(1 + T_d s) \quad (4.5)$$

gdzie:

- K_r – nastawialne wzmocnienie
- T_d – nastawialna stała czasowa zwana czasem wyprzedzenia [3]

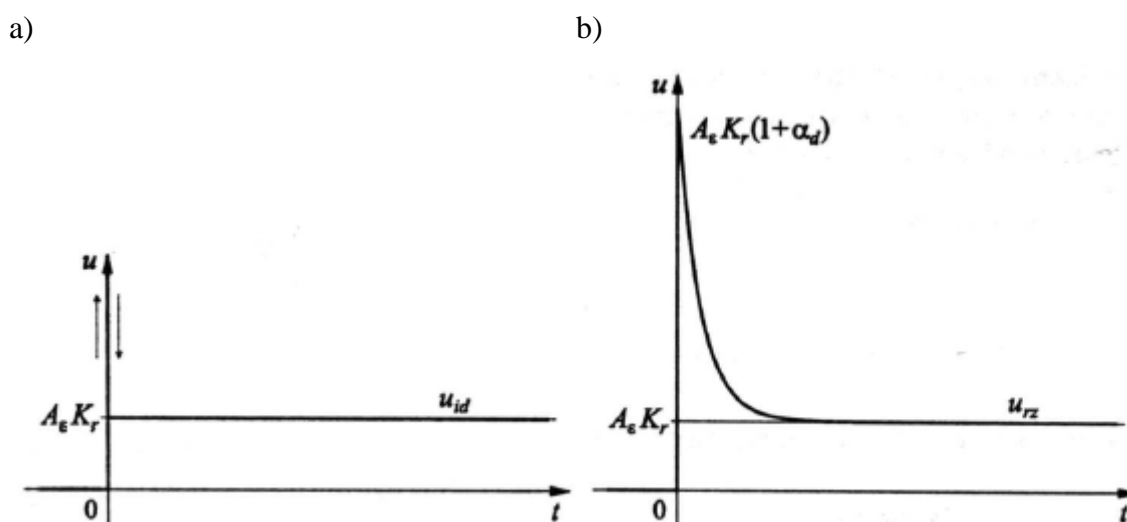
Ze względu na przebieg funkcji przejścia idealnego regulatora PD (Rys. 4.6a) zazwyczaj stosowana jest transmitancja członu rzeczywistego:

$$G_{Rrz}(s) = K_r \left(1 + \frac{T_d s}{\alpha_d s + 1} \right) \quad (4.6)$$

gdzie:

- α_d – nienastawialny współczynnik różniczkowania rzeczywistego. Przyjmuje on zazwyczaj wartości w przedziale 8-15, średnio przyjmuje się 10 [3].

Dla lepszego zobrazowania działania regulatora PD na rysunku 4.7. zostało przedstawione porównanie funkcji przejścia wariantu idealnego i rzeczywistego:



Rys. 4.7. Porównanie odpowiedzi a) idealnego i b) rzeczywistego regulatora PD [3]

Na rysunku 4.7a. obecny jest idealny pik sygnału, który nie jest możliwy do uzyskania w warunkach pracy układu. Z tego powodu w przemyśle wykorzystywany jest rzeczywisty model członu różniczkującego.

3.3.4 Regulator PID

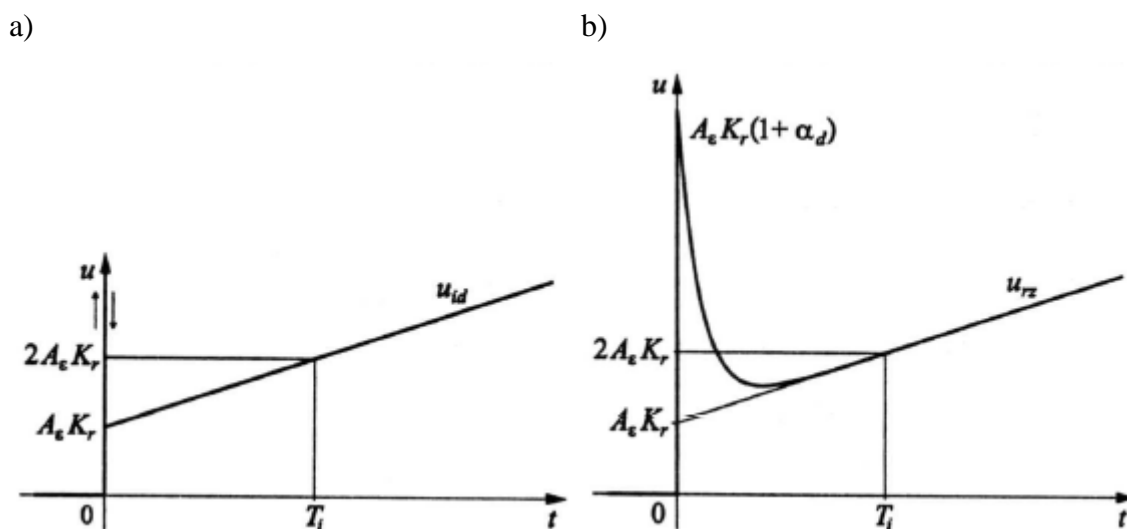
Ostatnim typem regulatora jest regulator PID. Regulator ten wykorzystuje wszystkie trzy części: proporcjonalną, całkującą oraz różniczkującą i łączy ich możliwości.

Transmitancje idealnego i rzeczywistego regulatora PID są reprezentowane przez wzory 4.7 oraz 4.8.

$$G_{Rid} = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.7)$$

$$G_{Rrz}(s) = K_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{\alpha_d} s + 1} \right) \quad (4.8)$$

Rysunek 4.8. przedstawia porównanie funkcji przejścia regulatora proporcjonalno-całkująco-różniczkującego w obu formach:



Rys. 4.8. Porównanie odpowiedzi a) idealnego i b) rzeczywistego regulatora PID [3]

Wykresy różnią się między sobą działaniem rzeczywistej części regulatora. Ma to jednak wpływ na początku przebiegu funkcji przejścia regulatora. Kształtujący się sygnał rzeczywistego regulatora PID posiada tą samą wartość i nachylenie do osi czasu co idealny odpowiednik.

3.3.5 Dobór regulatora

Podczas doboru regulatora należy kierować się znajomością obiektu oraz wymaganiami danego projektu.

Regulatory ciągłe posiadają w swoim sygnale wyjściowym trzy składowe: proporcjonalną, całkującą oraz różniczkującą. Składowa proporcjonalna zazwyczaj powoduje zmniejszenie błędu statycznego, wpływa też na zmniejszenie czasu regulacji. Zastosowanie składowej całkującej skutkuje likwidacją błędów statycznych, ale równocześnie wydłuża czas regulacji. Natomiast składowa różniczkująca występuje jedynie w stanach przejściowych. Jej wprowadzenie powoduje skrócenie czasu regulacji.

Wpływ poszczególnych typów regulatora na pracę układu obrazuje tabela 4.1.

Tab. 4.1. Wpływ zastosowania regulatora na przebieg sygnału [8]

Typ regulatora	Wpływ na parametry regulacji
Regulator P	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zmniejszenie uchybu statycznego odpowiedzi na skokowy sygnał sterujący lub zakłócający.
Regulator PI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Likwidacja uchybu statycznego odpowiedzi na skokowy sygnał sterujący lub zakłócający; ▪ Wydłużenie czasu regulacji.
Regulator PD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zmniejszenie uchybu statycznego odpowiedzi na skokowy sygnał sterujący lub zakłócający; ▪ Skrócenie czasu regulacji.
Regulator PID	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Likwidacja uchybu statycznego odpowiedzi na skokowy sygnał sterujący lub zakłócający; ▪ Skrócenie czasu regulacji.

Ostateczna decyzja doboru regulacji zawsze należy do projektanta i zależy od warunków pracy i przeznaczenia regulowanego układu.

3.4 Metody regulacji

Istnieje wiele metod wyznaczania wzmocnienia i pozostałych parametrów regulatora. Należą do nich między innymi:

- metoda Zieglera-Nicholsa,
- kryterium stabilności aperiodycznej,
- kryterium miejsca geometrycznego pierwiastków,
- całkowite wskaźniki jakości [3].

3.4.1 Metoda Zieglera-Nicholsa

Metoda Zieglera-Nicholsa jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod regulacji. Umożliwia ona dobór parametrów regulatora PID. W rozwiązaniach przemysłowych wykorzystuje się dwa rozwiązania tej metody.

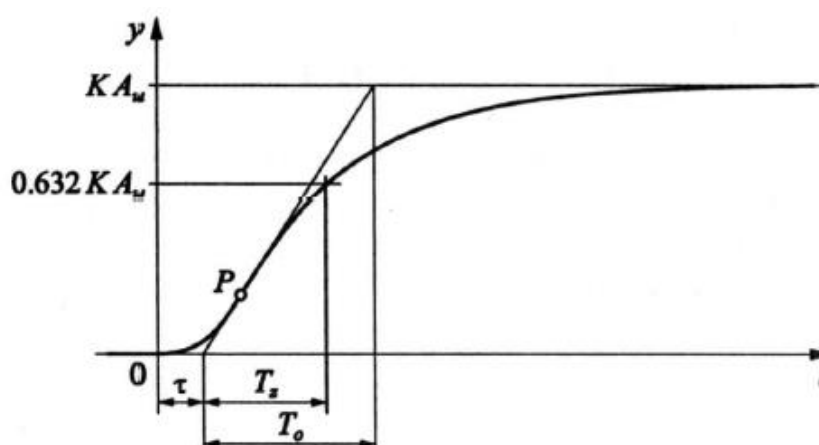
Pierwszy sposób polega na odłączeniu działania stałych czasowych przy elementach całkującym i różniczkującym. Następnie, poprzez zwiększanie wartości wzmocnienia K należy doprowadzić układ do granicy stabilności, co na wykresie objawia się niegasnącymi oscylacjami o stałej amplitudzie. Na podstawie tych wyników mierzy się wzmocnienie krytyczne K_{kr} oraz czas oscylacji T_{osc} , które to parametry służą do wyznaczenia pozostałych stałych regulatora.

W tabeli 4.2. przedstawiono zależności między wartościami parametrów a rodzajem regulatora.

Tab. 4.2. Parametry regulatora PID wg metody Zieglera-Nicholsa [3]

Typ regulatora	K_p	T_i	T_d
Regulator P	$0.50 K_{kr}$	-	-
Regulator PI	$0.45 K_{kr}$	$0.83 T_{osc}$	-
Regulator PID	$0.60 K_{kr}$	$0.50 T_{osc}$	$0.125 T_{osc}$

Drugi wariant metody Zieglera-Nicholsa jest wykorzystywany kiedy osiągnięcie granicy stabilności jest niemożliwe lub niewskazane z powodów technicznych, konstrukcyjnych lub bezpieczeństwa. Symulacja polega na analizie charakterystyki skokowej obiektu w układzie otwartym. Na podstawie otrzymanej charakterystyki określa się położenie pierwszego punktu przegięcia funkcji, czyli miejsca, w którym pochodna drugiego rzędu wynosi 0. Styczna, poprowadzona przez ten punkt, dzieli wykres na obszary, które pozwalają wyznaczyć poszczególne parametry (Rys. 4.9.).



Rys. 4.9. Parametry regulatora PID uzyskane z analizy odpowiedzi skokowej obiektu

3.4.2 Kryterium stabilności aperiodycznej

Kryterium stabilności aperiodycznej pozwala na wyznaczenie takiego wzmocnienia, że w równaniu charakterystycznym wystąpi dominujący pierwiastek wielokrotny rzeczywisty. Pierwiastek ten jest odpowiedzialny za wyznaczenie odpowiedzi skokowej o najkrótszym czasie regulacji [3].

W wyniku analizy różnych układów regulacji stwierdzono, że zawsze można spodziewać się co najwyżej dwukrotnego rzeczywistego pierwiastka dominującego w układzie. Wynikają z tego dwa równania [8].

$$1 + H(s)G(s) = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{d}{ds}(1 + H(s)G(s)) = 0 \quad (5.0)$$

Drugie równanie (5.0) służy zazwyczaj do wyznaczenia poszukiwanego pierwiastka, a pierwsze (4.9) do określenia wymaganego wzmocnienia.

3.4.3 Kryterium miejsca geometrycznego pierwiastków

Miejsce geometryczne pierwiastków równania charakterystycznego pozwala na wyznaczenie wymaganego wzmocnienia, tak aby spełnić zapas stabilności wyrażony za pomocą liczby tłumienia dominujących pierwiastków zespolonych równania charakterystycznego lub przy aperiodycznym warunku syntezy, czyli zerowym przeregulowaniu charakterystyki skokowej.

Metoda ta polega na zaznaczeniu na wykresie miejsca geometrycznego pierwiastków na podstawie znanej transmitancji i wyznaczeniu odpowiedniego współczynnika czułości statycznej.

3.4.4 Całkowe wskaźniki jakości

Całkowe wskaźniki jakości służą do określenia jakości przyjętego sterowania. Opisane niżej wskaźniki dotyczą uchybu, który reprezentuje straty energetyczne układu regulacji [3].

Podstawowymi wskaźnikami całkowymi są:

- Całka z sygnału uchybu – stosowana, gdy uchyb nie zmienia znaku, a straty są proporcjonalne do uchybu. Wskaźnik ten informuje o energii w układzie.

$$I_I = \int_0^{\infty} \varepsilon_p(t) dt \quad (5.1)$$

- Całka z sygnału uchybu pomnożonego przez czas – stosowana, kiedy uchyb nie zmienia znaku, a straty są proporcjonalne do uchybu i czasu. Wskaźnik ten informuje o energii w układzie.

$$I_{It} = \int_0^{\infty} \varepsilon_p(t) t dt \quad (5.2)$$

- Całka z bezwzględnej wartości sygnału uchybu – stosowana, gdy uchyb zmienia znak, a straty są proporcjonalne do uchybu. Wskaźnik ten informuje o energii w układzie.

$$I_{Im} = \int_0^{\infty} |\varepsilon_p(t)| dt \quad (5.3)$$

- Całka z bezwzględnej wartości sygnału uchybu pomnożonego przez czas – stosowana, kiedy uchyb zmienia znak, a straty są proporcjonalne do uchybu i czasu.

$$I_{Itm} = \int_0^{\infty} |\varepsilon_p(t)| t dt \quad (5.4)$$

- Całka z kwadratu sygnału uchybu – stosowana niezależnie od zmian znaku uchybu, gdy straty są proporcjonalne do kwadratu uchybu. Wskaźnik ten informuje o energii traconej.

$$I_2 = \int_0^{\infty} \varepsilon_p^2(t) dt \quad (5.5)$$

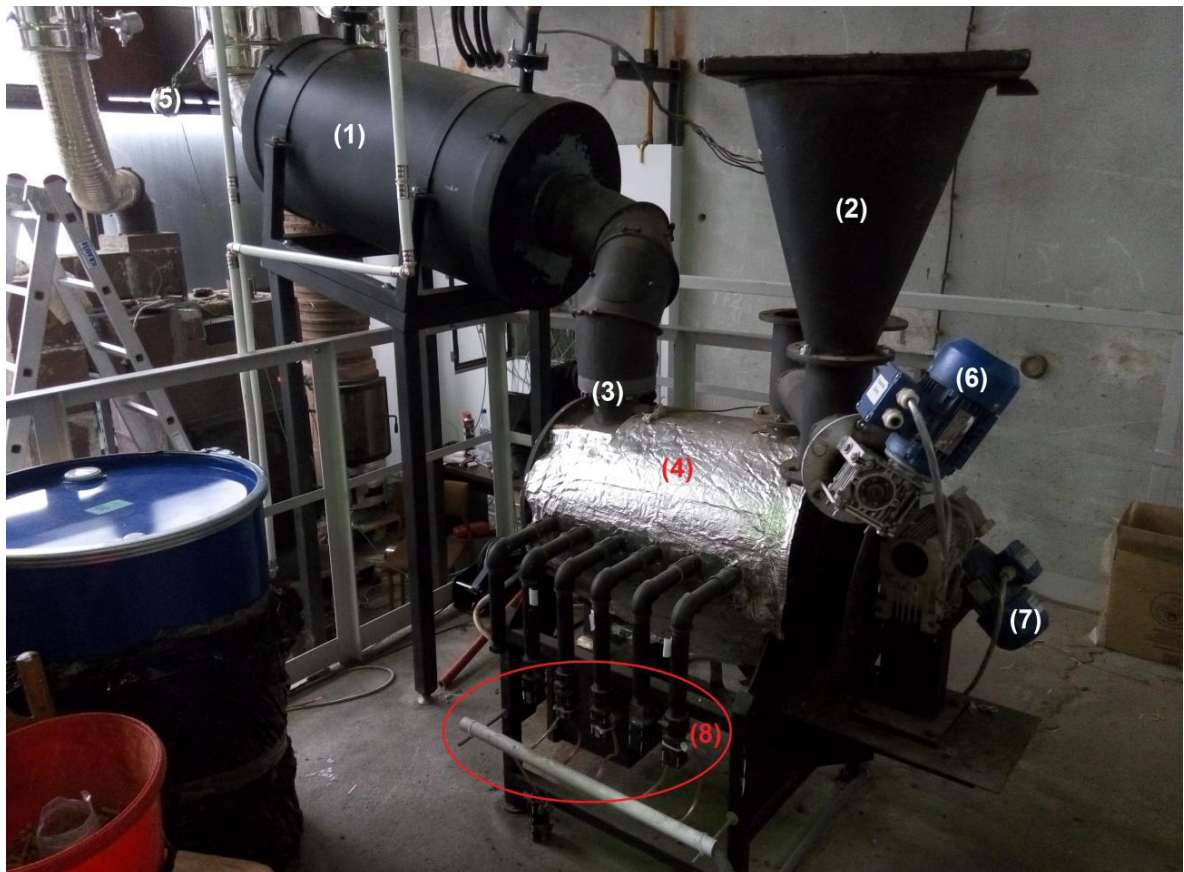
Stosowanie wskaźników całkowych niesie ze sobą sporo niedogodności:

- Całki z sygnału uchybu są często bardzo skomplikowane, co powoduje trudności rachunkowe i problemy z minimalizacją;
- Znalezione wzmocnienie regulatora może znaleźć się poza zakresem stabilności układu;
- Układy projektowane wg całkowych wskaźników jakości posiadają spore przeregulowania, sięgające 60% [3].

4. Budowa stanowiska

Projekt układu sterowania rozproszonego był realizowany na stanowisku badawczym, które mieści się w budynku Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

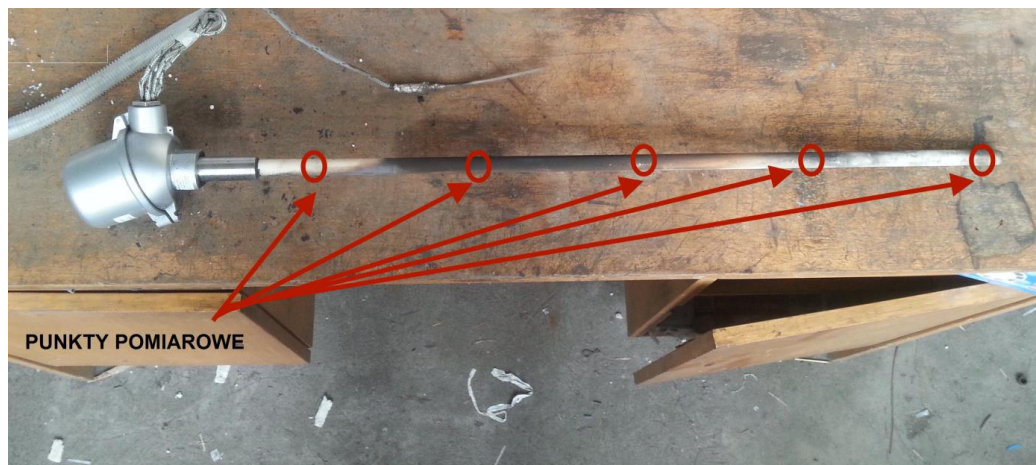
Budowa stanowiska została przedstawiona na rysunku 5.1.:



Rys 5.1. Budowa stanowiska [9]

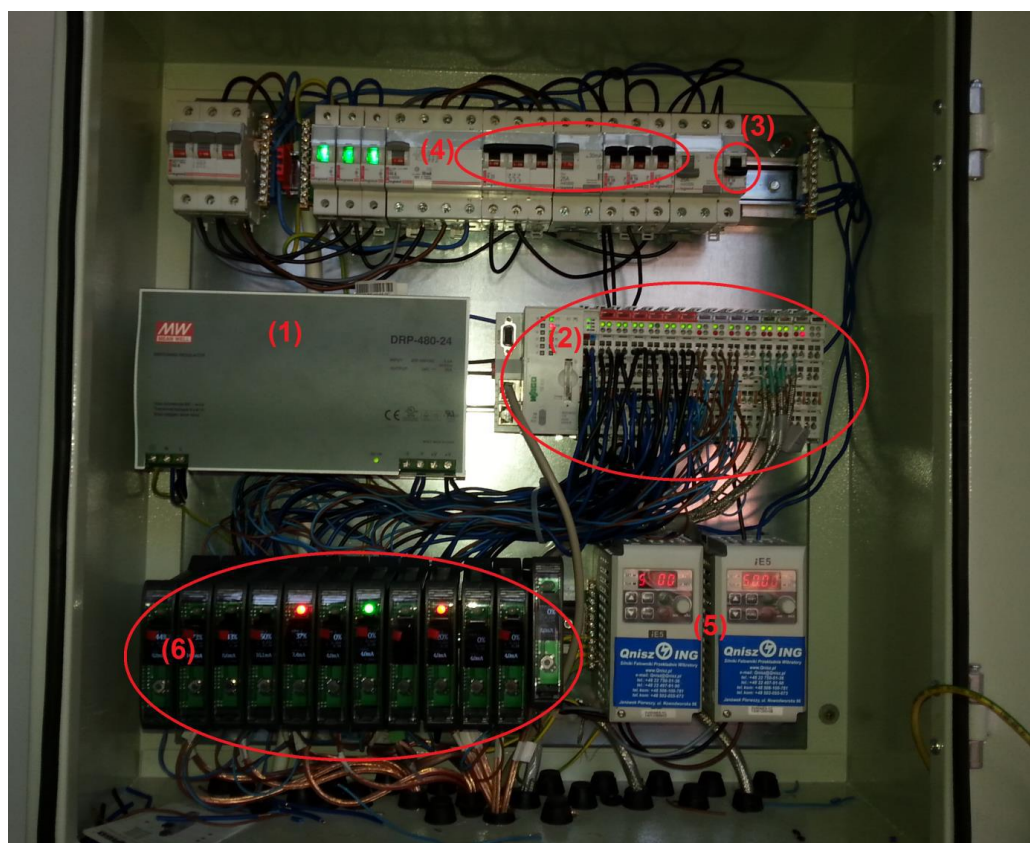
Stanowisko składa się z pieca o ruszcie obrotowym oraz innych elementów, które zostały oznaczone na rysunku powyżej. Są nimi: wymiennik ciepła (1), podajnik paliwa (2), termopara na wylocie pieca (3), izolacja pieca (4), termopara na końcu wymiennika ciepła (5), silnik elektryczny podajnika paliwa (6), silnik elektryczny sterujący rusztem (7), rząd wentylatorów (8) [6].

Wewnątrz pieca znajduje się termopara o pięciu czujnikach temperatury, która umożliwia pomiar temperatury w kolejnych przedziałach pieca.



Rys. 5.2. Rozmieszczenie czujników na wewnętrznej termoparze [9]

Ponad panelem operatorskim znajduje się skrzynka elektryczna. Jej elementy zostały wyszczególnione na rysunku 5.3.

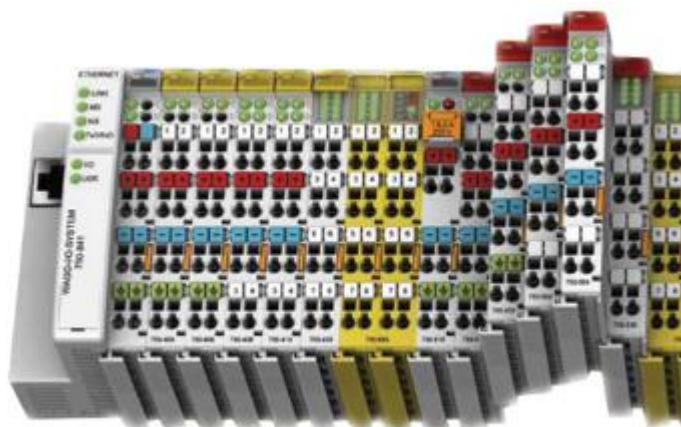


Rys. 5.3. Skrzynka elektryczna [9]

Zaznaczone na rysunku elementy to kolejno: zasilacz sterownika oraz modułów (1), sterownik PLC firmy WAGO oraz moduły wejść i wyjść (2), fizyczny włącznik zapalarki elektrycznej (3), listwa bezpieczników (4), falowniki sterujące silnikami elektrycznymi (5), dwanaście programowalnych modułów z wyświetlaczem do sterowania wentylatorów (6).

Sterownikiem PLC, który zarządzał pracą całego stanowiska badawczego, był sterownik firmy WAGO o nazwie WAGO 750-8202 PFC200 CS 2ETH.

Programowalne sterowniki przemysłowe (ang. PLC – Programmable Logic Controllers) są powszechnie stosowane w układach automatyki. Dzięki swojej niezawodności i możliwości uniwersalnego zastosowania, są z powodzeniem instalowane w wielu firmach, halach produkcyjnych i przemysłowych.




Rys. 5.4. Sterownik firmy WAGO z podpiętymi modułami

Głównym przeznaczeniem sterownika PLC jest komunikacja urządzeń wejść i wyjść, które łączą sterownik z systemem sterowanym oraz sterowanie procesem przemysłowym. Urządzenia wejścia dostarczają informacji o stanie badanego obiektu i pozwalają na wprowadzenie wartości zadanych. Natomiast urządzenia wyjściowe służą do sterowania procesem. Informacje, które są przekazywane do sterownika przez czujniki, docierają do PLC przez odpowiednie karty pomiarowe lub specjalne moduły. Takie połączenie nazywane jest torem pomiarowym [6]. Sygnały, które służą do sterowania, można podzielić na analogowe i cyfrowe (dyskretne). Jest to bardzo istotna informacja przy wyborze modułów lub wersji sterownika, ponieważ określa potencjał danych, na których można operować.

4.1 Konfiguracja środowiska

Zadanie projektowe miało na celu napisanie algorytmu sterowania ręcznego oraz automatycznego. Zamierzonym celem było utrzymywanie zadanej temperatury na wylocie pieca oraz odpowiedni poziom spalin.

Pierwszym etapem prac było zainstalowanie nowego oprogramowania e!COCKPIT na PLC. Firma WAGO umożliwia pracę swoich sterowników w dwóch trybach CoDeSys i e!COCKPIT. Ponadto, producent dba o to, aby klienci posiadali na swoich produktach najnowszą wersję oprogramowania poprzez jego synchronizację z programem na komputerze. Instalacja oprogramowania odbywa się przez zgranie odpowiedniego pliku na kartę SD, a następnie wykonanie sekwencji określonych kroków. Składają się na nie: włożenie karty do sterownika, zmiana jego ustawień na tryb awaryjny, a następnie reset całego urządzenia. Po tej procedurze PLC uruchamia się z karty SD i pobiera z niej najnowsze oprogramowanie. Sterownik otrzymuje domyślne IP o adresie 192.168.1.17. Kolejnym krokiem jest zmiana tego adresu oraz podsieci, w której działa komputer, aby komunikacja z PLC była nadal możliwa. WAGO umożliwia zmianę adresu IP na różne sposoby. Jednym z nich jest serwis internetowy, do którego użytkownik loguje się przez IP sterownika. Aplikacja ta pozwala na skonfigurowanie ustawień PLC, zmianę ustawień komunikacji, zmianę hasła oraz innych parametrów. Na rysunku 5.5. przedstawiono okno służące do zmiany adresu IP przez stronę internetową.



Web-based Management
WAGO 750-8202 PFC200 CS 2ETH RS

Navigation

- Information
- PLC Runtime >
- Networking
 - Host-/Domain Name
 - TCP/IP**
 - Ethernet
 - Routing
- Firewall >
- Clock
- Administration >
- Package Server >
- Mass Storage
- Software Uploads
- Ports and Services >
- Cloud Connectivity
- SNMP >
- Diagnostics

TCP/IP Configuration

Changes will take effect immediately.

Changes to the settings can have an impact on the DHCPD server. Please check that the DHCPD configuration is still correct (see page "Ports and Services" - "DHCPD").

IP Configuration X1/X2

Configuration Type: ☒ Static IP
☐ DHCP
☐ BootP

IP Address:

Subnet Mask:

Gateway Configuration

Note: The gateway configuration is performed via the "[Networking - Routing](#)" page under "Static Route". A route is a gateway.

DNS Server

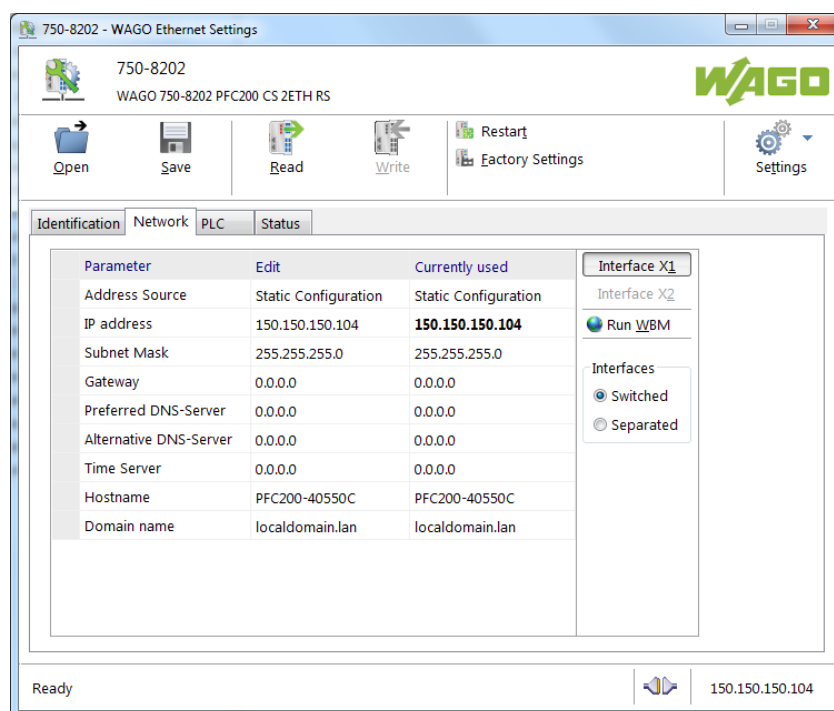
Configured: none

New Server IP:

Additionally used: none
(assigned by DHCP)

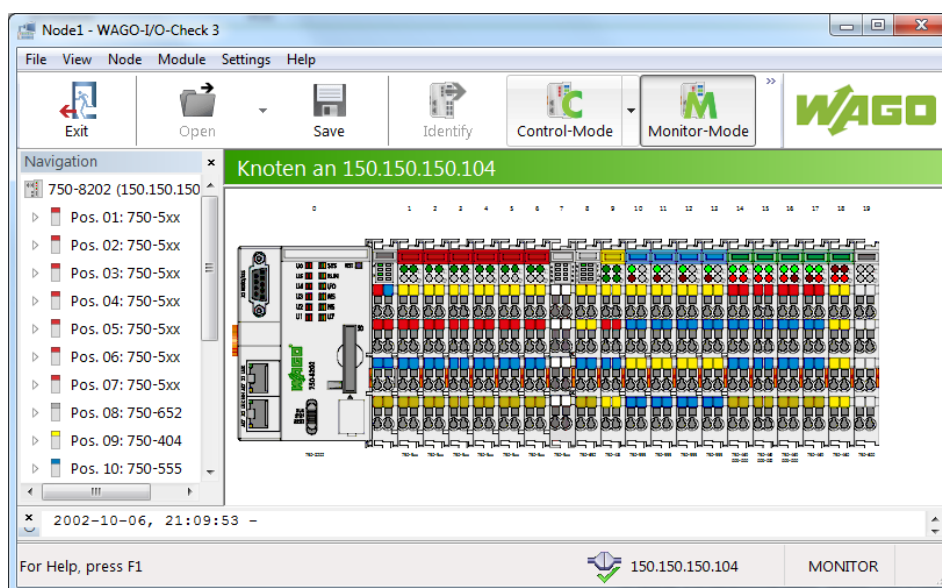
Rys 5.5. Zmiana adresu IP przez serwis internetowy

Drugą opcją jest skorzystanie z osobnej aplikacji o nazwie „WAGO Ethernet Settings”, która jest dostarczana przez producenta razem ze środowiskiem do programowania. Jest to osobny program służący do konfiguracji połączeń ze sterownikiem. Na rysunku 5.6. zostało zamieszczone zdjęcie interfejsu tego narzędzia:



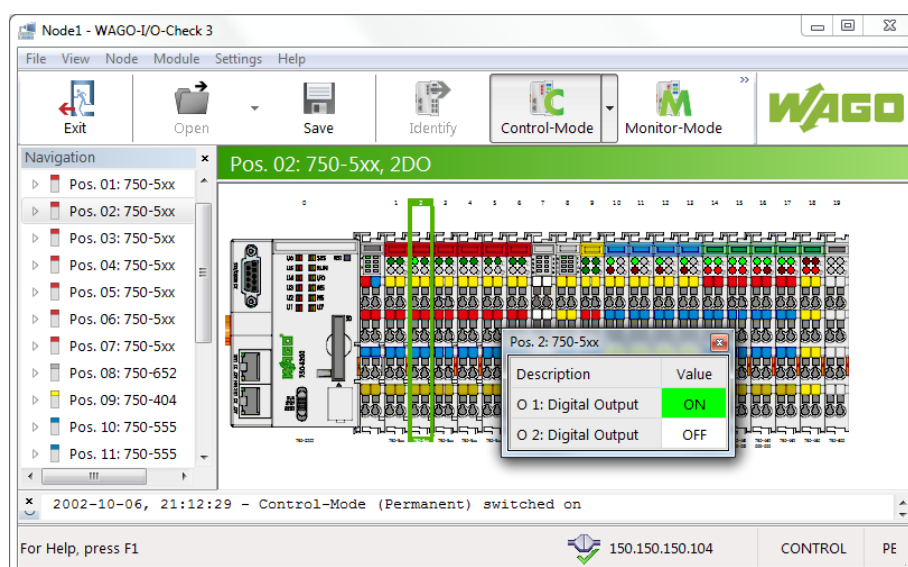
Rys. 5.6. Zmiana adresu IP przez program „Ethernet settings”

Trzecim narzędziem, które dostarcza firma WAGO, jest program „I/O Check”. Służy on do wykrywania modułów podłączonych do PLC i pozwala na zmianę wartości wejść i wyjść na tych modułach (Rys 5.7.).



Rys. 5.7. Podgląd modułów sterownika w programie „I/O Check”

Na powyższym rysunku widać panel programu „I/O Check”. Z lewej strony znajduje się lista wszystkich modułów, ułożona od najbliższego do najdalszego modułu, licząc od sterownika PLC. Po prawej stronie zobrazowane są sterownik oraz moduły. Na niektórych z nich widać zapalone czerwone i zielone diody, które odwzorowują rzeczywisty status czujników. Narzędzie może także pracować w trybie Control-Mode. Do zmiany trybu działania służy górny panel programu. Działanie drugiej opcji przedstawia rysunek 5.8.



Rys. 5.8. Wpisywanie wartości do wyjść modułów w programie „I/O Check”

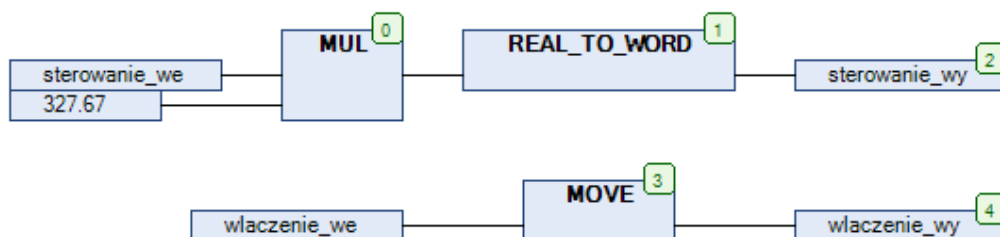
Zapis wartości odbywa się przez zaznaczenie określonego modułu i wybór określonego wyjścia lub wejścia. Przykładowy moduł posiada dwa wyjścia cyfrowe. Wysoki stan sygnału jest dodatkowo sygnalizowany przez zapaloną diodę na module. Korzystanie z narzędzia „I/O check” nie jest możliwe przy równoczesnym korzystaniu z programu e!COCKPIT. Jego wykorzystanie sprawdza się do sprawdzenia poprawnego działania wszystkich elementów sterownika PLC. Po zakończeniu tych operacji można przystąpić do tworzenia programu.

4.2 Działanie programu

Algorytm sterowania piecem został napisany w programie e!COCKPIT. Obejmuje on tryb pracy ręcznej i automatycznej.

4.2.1 Wentylatory i silniki

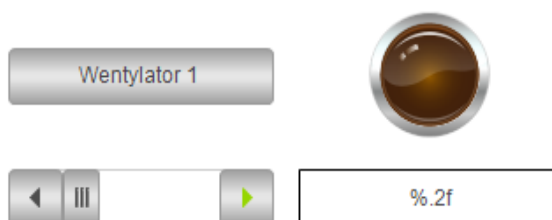
Program zarządza prędkością dwunastu wentylatorów oraz dwóch silników, z których jeden jest odpowiedzialny za obrót rusztu, a drugi jest podajnikiem paliwa. Sterowanie jest realizowane poprzez blok funkcyjny, którego zastosowanie zostało przedstawione na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Sterowanie wentylatorów

Moduł wentylatora przyjmuje ze sterownika dwie informacje, które obejmują wartość prędkości pracy oraz sygnał włączenia urządzenia. Powyższa funkcja koryguje podaną w procentach wartość pracy, a następnie wysyła stan wysoki na wejście odpowiedzialne za uruchomienie wentylatora.

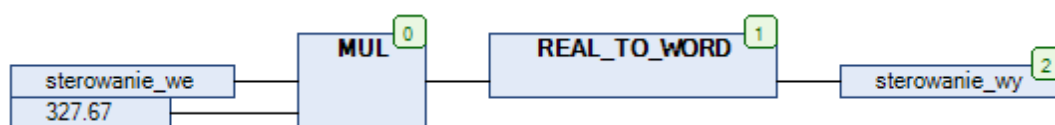
Program e!COCKPIT pozwala na wizualizację poszczególnych wejść i wyjść sterownika PLC oraz współpracujących z nim modułów. Rysunek 5.10. przedstawia stan pierwszego wentylatora.



Rys. 5.10. Wizualizacja pierwszego wentylatora

Przycisk „Wentylator 1” służy do włączenia konkretnego wentylatora. Stan urządzenia jest sygnalizowany przez diodę. Świeci się ona, kiedy moduł jest włączony. Do manipulacji prędkością służy suwak. Pole po prawej stronie pozwala na wpisanie konkretnej wartości prędkości, a także informuje o aktualnym położeniu suwaka.

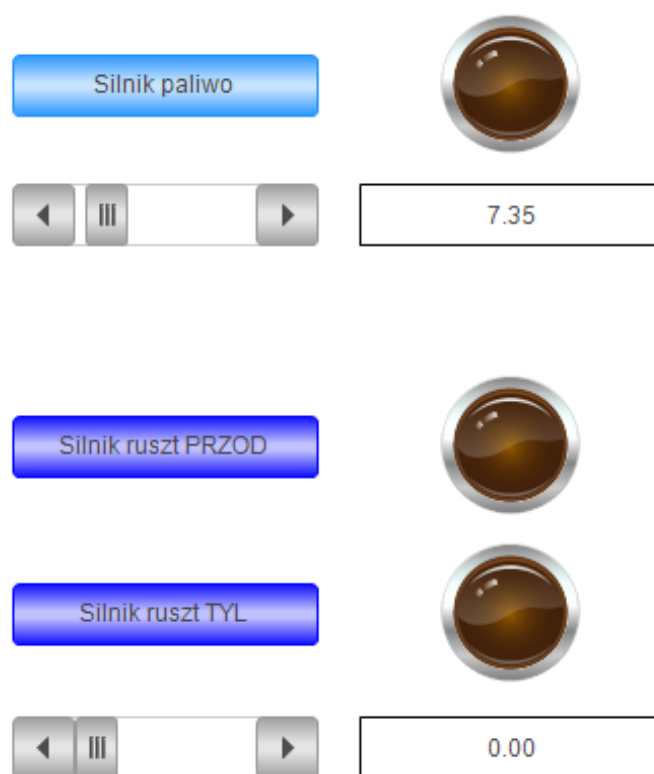
Funkcja sterująca silnikami jest mniej skomplikowanym wariantem funkcji sterującej wentylatorami.



Rys. 5.11. Sterowanie silników

Rysunek 5.11. przedstawia działanie funkcji odpowiedzialnej za sterowanie falownikami. Nie umożliwia ona włączenia silnika, ponieważ jest to realizowane przez sygnał, który odpowiada za kierunek pracy silnika. W przypadku podajnika paliwa istotny jest ruch w jednym kierunku, ponieważ w odwrotnym przypadku paliwo nie dostawałoby się do pieca. Program umożliwia pracę rusztu w obu kierunkach.

Wizualizacja stanu silników jest podobna do wentylatorów i została przedstawiona na rysunku 5.12.



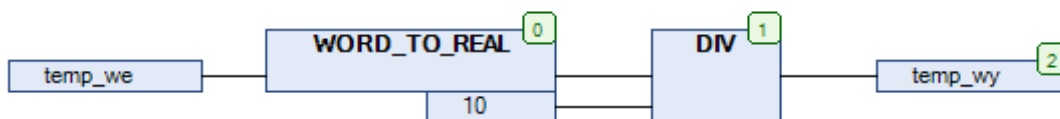
Rys. 5.12. Wizualizacja silników sterujących podajnikiem i rusztem

Numery silników wynikają z podpięcia ich do kolejnego modułu sterownika PLC. Pierwszy silnik służy do sterowania podajnikiem paliwa. Na wizualizacji zostało wyprowadzone sterowanie w jednym kierunku, który pozwala na doprowadzenie paliwa do komory pieca. Drugi silnik jest wykorzystywany do obracania rusztem. Wybór i zmiana kierunku pracy rusztu są realizowane przez dwa przyciski „Silnik ruszt PRZOD” oraz „Silnik ruszt TYL”. Logika sterowania falownikiem nie pozwala na równoczesne naciśnięcie obu przycisków. Ze względu na to, że oba przyciski służą do uruchomienia jednego elementu, wystarczy jeden suwak do określenia prędkości ruchu rusztu obrotowego.

4.2.2 Czujniki temperatury

Sterownik PLC przy stanowisku badawczym posiada zestaw modułów, które zbierają informacje o stanie czujników temperatury. Pięć z nich mieści się w komorze pieca, jeden na wylocie komory, a ostatni za wymiennikiem ciepła.

Pomiar temperatury jest realizowany przez blok funkcyjny, przedstawiony na rysunku 5.13.



Rys. 5.13. Funkcja pomiaru temperatury

Czujnik 1	19.18
Czujnik 2	19.18
Czujnik 3	18.82
Czujnik 4	18.74
Czujnik 5	18.34
Czujnik 6	18.10
Czujnik 7	19.83

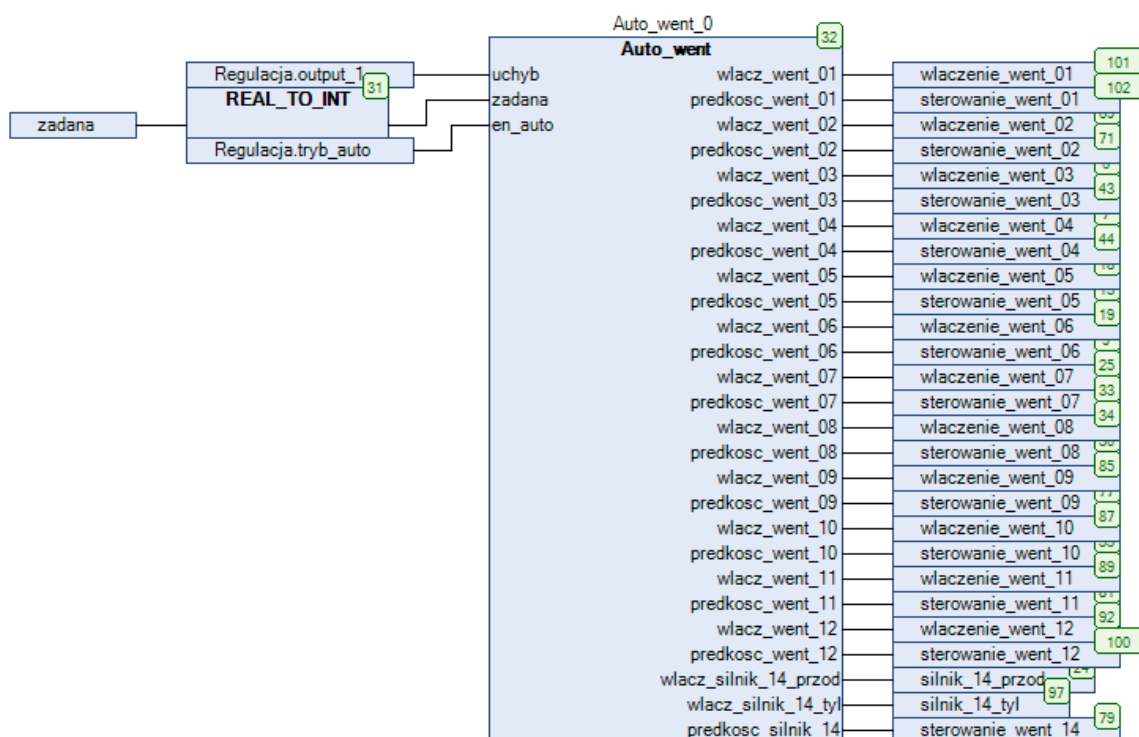
Działanie funkcji polega na przeskalowaniu informacji z czujnika do jednostki stopni Celsjusza.

Temperatura otrzymana przez czujniki jest prezentowana na panelu operatorskim poprzez siedem pól (Rys. 5.14). Służą one jedynie do odczytu wartości i nie jest możliwe wpisanie im innej wartości.

Rys. 5.14. Wartości temperatury z czujników

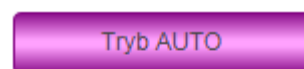
4.2.3 Tryb automatyczny

Istotnym elementem jest funkcja umożliwiająca pracę sterownika w trybie automatycznym (Rys. 5.15). Wejściem funkcji jest zadana wartość temperatury, wartość uchybu ustalonego oraz informacja o włączonym trybie pracy automatycznej.



Rys. 5.15 Blok funkcji sterującej automatyczną pracą wentylatorów i silników

Wizualizacja trybu pracy sterownika jest realizowana przez przycisk przedstawiony na rysunku 5.16. Zgaszona dioda oznacza tryb manualny, a zapalona automatyczny.



Rys. 5.16. Przycisk trybu pracy

4.2.4 Przyciski bezpieczeństwa

Ważnym elementem programu jest para przycisków, która służy do zatrzymania oraz wznowienia pracy sterownika PLC (Rys. 5.17).

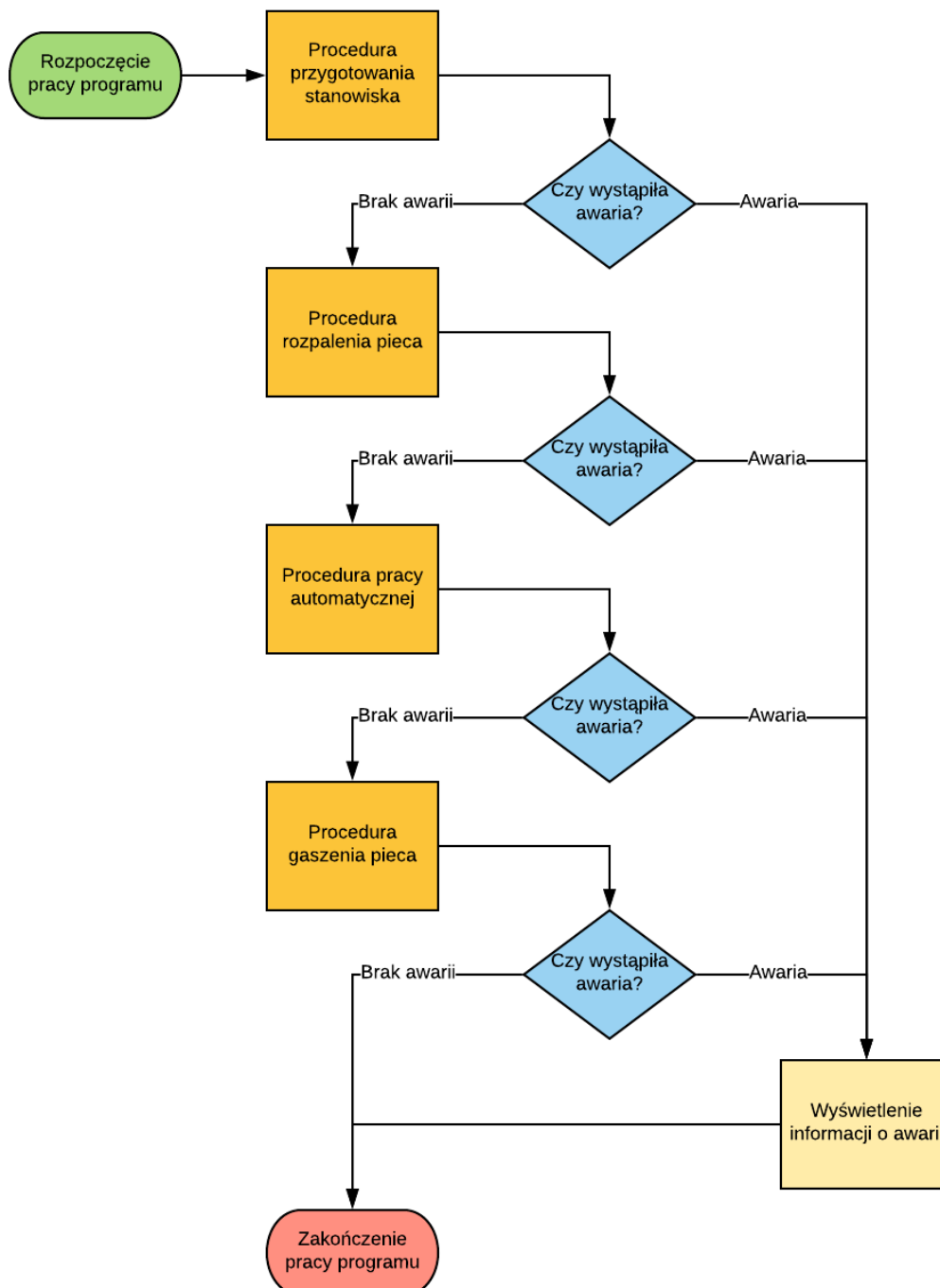


Rys. 5.17. Przyciski awaryjne

Przycisk „STOP” służy do awaryjnego wyłączenia wszystkich modułów sterowanych przez sterownik PLC i automatycznego trybu pracy. Przycisk „Kasowanie awarii” służy do wyłączenia flagi zgłoszonej przez pierwszy przycisk.

4.2.5 Maszyna stanów

Sercem całego algorytmu sterowania jest zaimplementowana maszyna stanów, która odpowiada za poprawne działanie programu. Rysunek 5.18. przedstawia ogólny schemat działania.

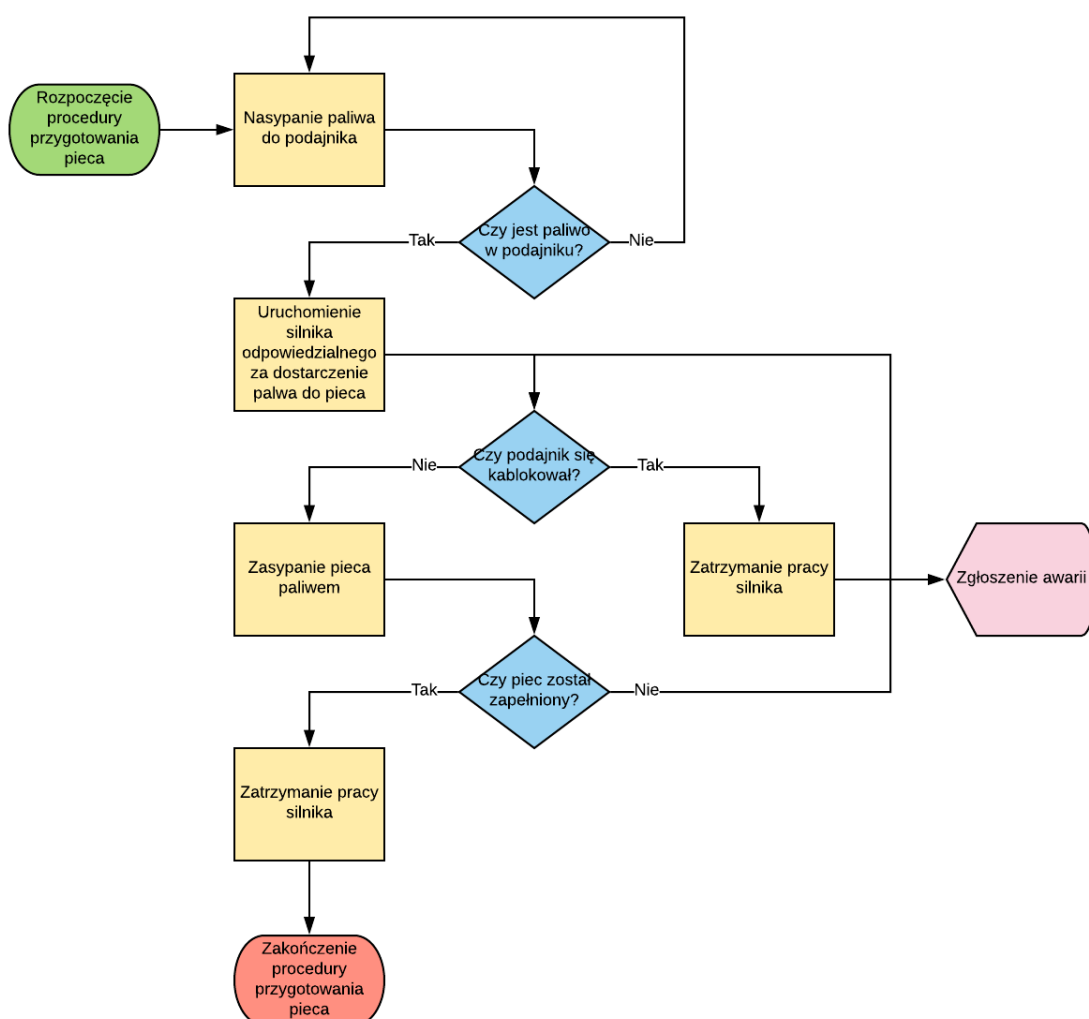


Rys. 5.18. Ogólny schemat działania maszyny stanów

Algorytm składa się z kilku następujących po sobie etapów. Należą do nich:

- procedura przygotowania stanowiska
- procedura rozpalenia pieca
- procedura pracy automatycznej
- procedura gaszenia pieca

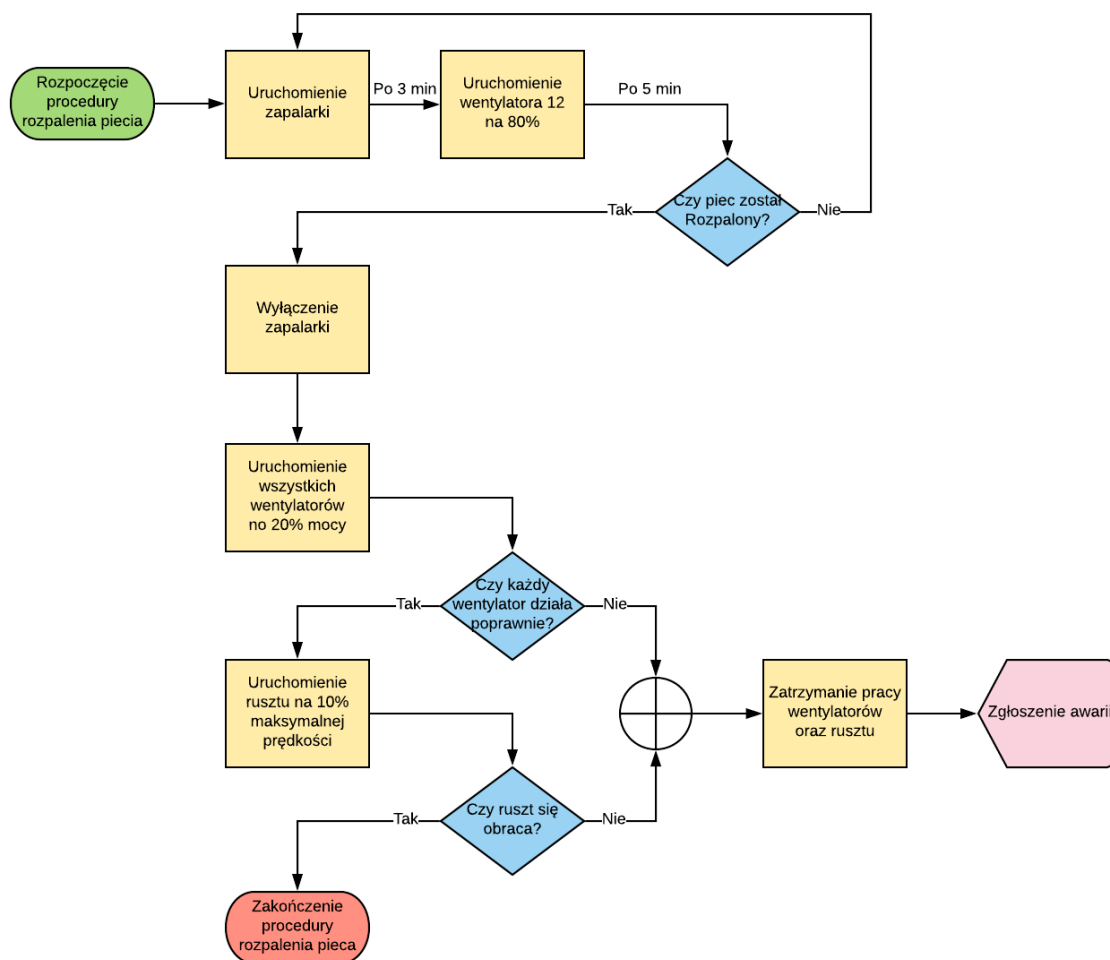
Funkcjonalność każdego z wymienionych elementów zostanie przybliżona w następnych akapitach. Wykonanie każdego etapu jest zakończone sprawdzeniem bezpieczeństwa, tj. wystąpieniem awarii. W przypadku takiej sytuacji program informuje operatora o problemie, a następnie przerywa pracę.



Rys. 5.19. Procedura przygotowania stanowiska

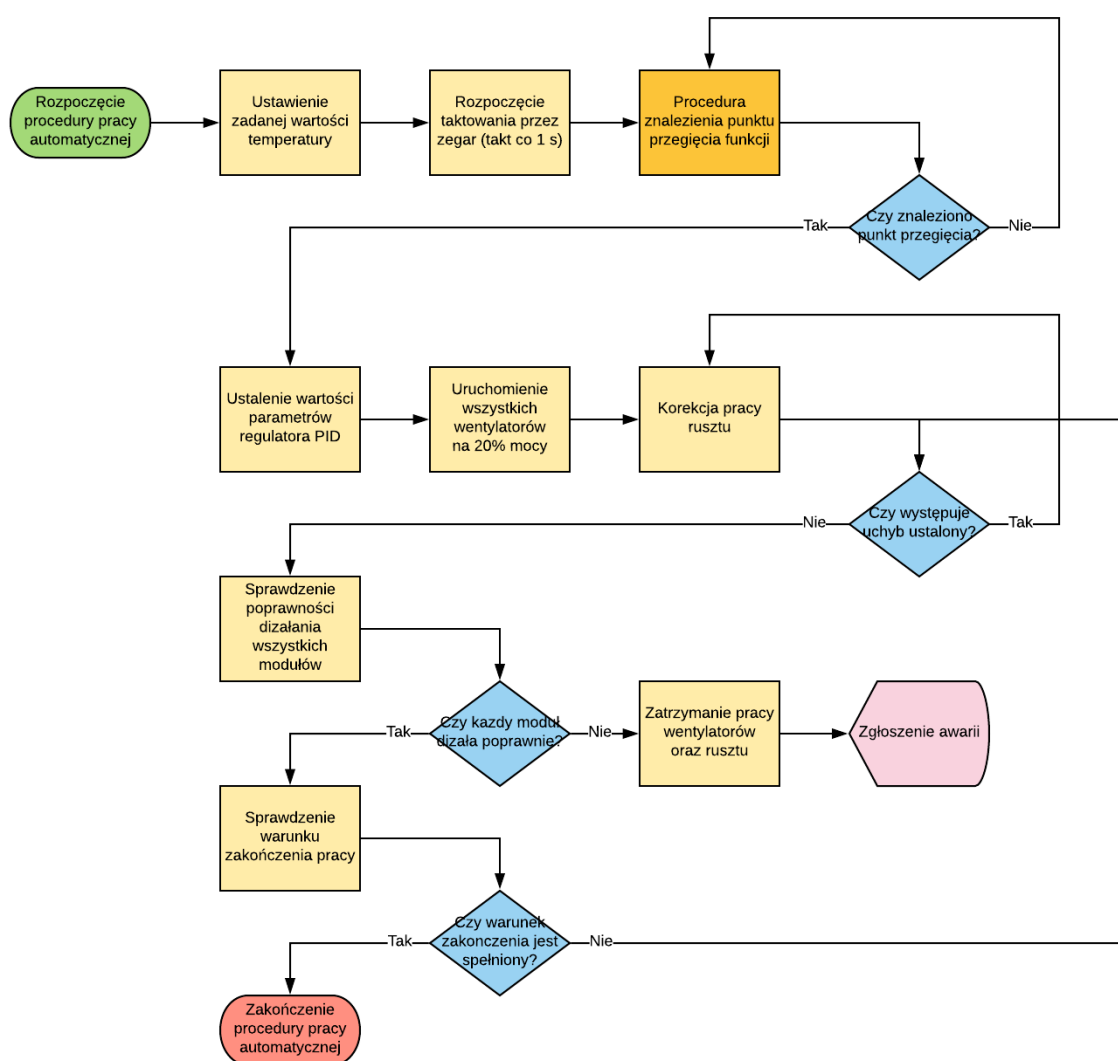
Procedura przygotowania stanowiska (Rys. 5.19.) dotyczy załadunku pieca. Ten etap jest szczególnie znaczący, ponieważ rozpoczyna działanie całego algorytmu sterowania. Procedura rozpoczyna się od napełnienia podajnika paliwem. Jeśli jest on pełny, to uruchamiany jest silnik, który za pomocą ślimakowego trzpienia doprowadza paliwo do komory spalania. W przypadku blokady surowca w podajniku, program zwraca informację o awarii. Praca silnika ustaje po zakończeniu procesu.

Drugim etapem przygotowawczym jest procedura rozpalenia pieca, przedstawiona na rysunku 5.20. Proces rozpoczyna się przy zasypanym paliwem piecu. Pierwszym krokiem jest włączenie zapalarki, która jest zamontowana nad wentylatorem nr 12 i pozwala na zapłon paliwa bez otwierania komory spalania.



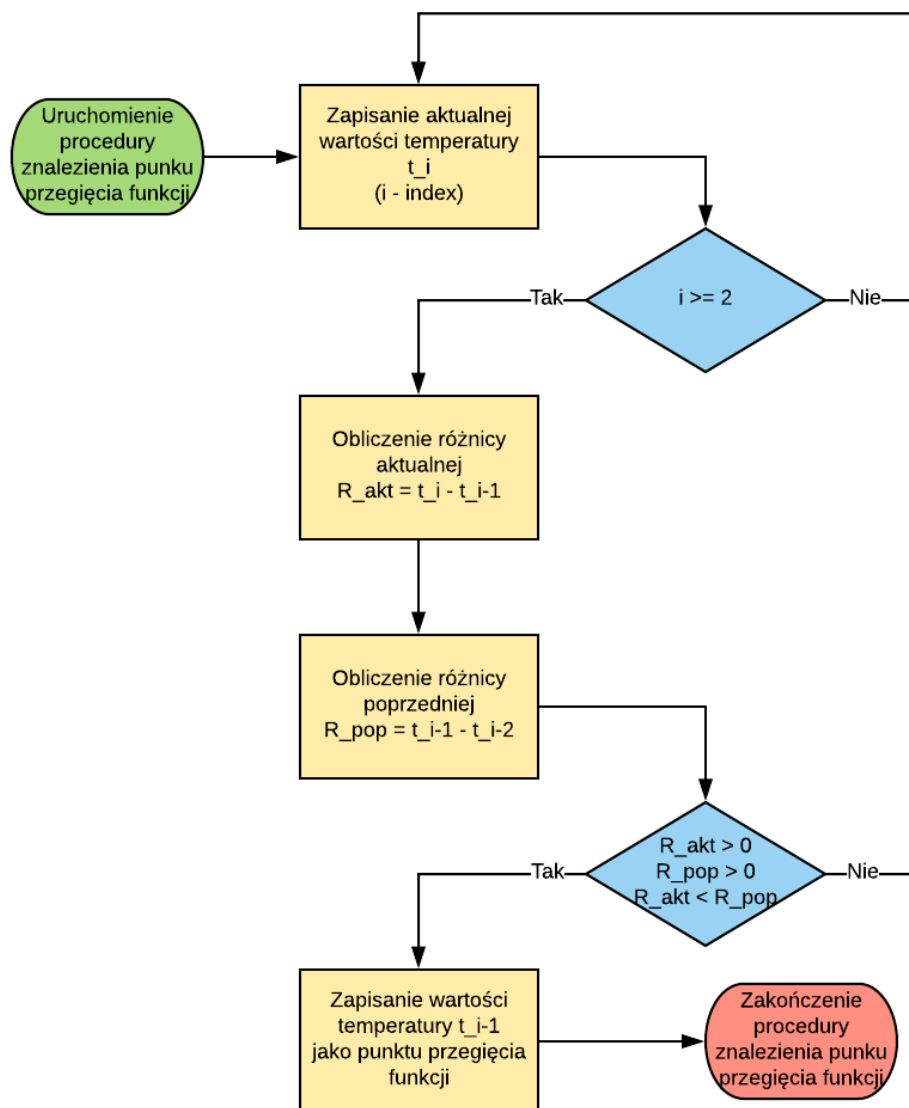
Rys. 5.20. Procedura rozpalenia pieca

Po upływie trzech minut jest uruchamiany 12. Wentylator, który ma za zadanie rozprowadzić gorące powietrze po tylnej ścianie pieca i doprowadzić więcej tlenu do komory. Rozpalanie pieca jest sygnalizowane przez rosnącą temperaturą na pierwszym czujniku. Jeśli proces się powiedzie, zapalarka jest wyłączana, a uruchamiane są wszystkie wentylatory na 20% mocy. Następnie włącza się ruszt, który pracuje na 10% swojej maksymalnej prędkości. W przypadku awarii wentylatora lub silnika, który steruje rusztem wszystkie moduły wyjść sterownika PLC są zatrzymywane i zwracana jest informacja o awarii danego urządzenia.



Rys. 5. 21. Procedura pracy automatycznej

Rysunek 5.21. przedstawia proces pracy automatycznej sterownika. Po ustawieniu zadanej wartości temperatury rusza zegar, który służy do archiwizacji danych oraz wyznaczenia parametrów regulatora PID (Rys. 5.22.).

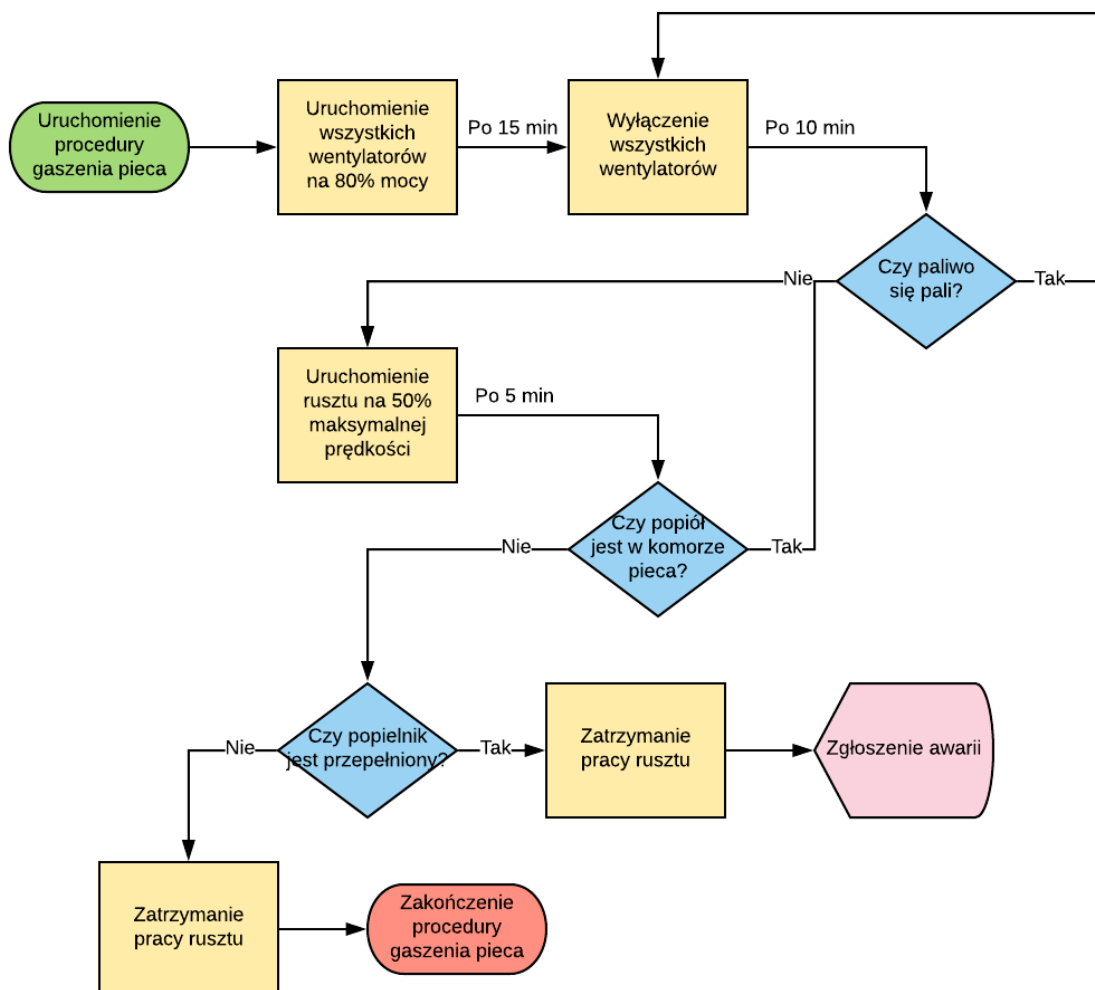


Rys. 5.22. Procedura znalezienia punktu przebiegu funkcji

Proces szukania i odkrycia punktu przebiegu funkcji służy do automatycznego doboru nastaw regulatora PID (Rys. 4.9.). Algorytm polega na zapamiętywaniu aktualnej oraz dwóch poprzednich chwil czasowych. Na ich podstawie obliczane są różnice między aktualną i poprzednią, oraz dwiema poprzednimi wartościami temperatury. Analiza przyrostów pozwala na znalezienie punktu przebiegu funkcji, a ten z kolei umożliwia automatyczny dobór wzmocnienia oraz stałych czasowych regulatora.

Przez cały czas pracy pieca wentylatory działają na 20% mocy. Umożliwia to stały dostęp tlenu do komory spalania i chroni moduły przez gorącym powietrzem z pieca. Regulator PID steruje pracą rusztu, którego prędkość zależy od wartości uchybu ustalonego.

Sterownik pracuje w tym stanie do momentu otrzymania sygnału o zakończeniu spalania. Informacja ta jest wprowadzana z panelu operatorskiego.



Rys. 5.23. Procedura gaszenia pieca

Rysunek 5.23. przedstawia proces gaszenia pieca. Procedura rozpoczyna się od uruchomienia wszystkich wentylatorów na 80% ich mocy w celu dopalenia się resztek paliwa w komorze. Po piętnastu minutach wentylatory są wyłączane, co wpływa na spadek zawartości tlenu w komorze. Po dziesięciu minutach jest sprawdzana temperatura wewnątrz pieca i na jej podstawie jest uruchamiany drugi etap pracy. Polega on na

zepchnięciu pozostałego w komorze popiołu do popielnika. Odbywa się to poprzez jednostajną pracę rusztu, który obraca się z połową swojej maksymalnej prędkości. W przypadku, kiedy popielnik się przepełni, a nie zostanie do niego zsunięty cały popiół, zwracane jest informacja o błędzie i ruszt się zatrzymuje.

4.3 Analiza wyników

Implementacja algorytmu sterowania nie zakończyła się pełnym sukcesem.

Ze względu na brak operatora stanowiska nie było możliwe rozpalenie pieca i zebranie wyników, które mogłyby posłużyć do analizy jakości zastosowanego sterowania.

Program został przetestowany przy zgaszonym piecu i spełniał zamierzone wymagania projektowe. Próby regulacji temperatury wewnętrznej pieca ceramicznego dokonywały się poprzez nagrzewanie termopar z wykorzystaniem palnika. Układ reagował w spodziewany sposób. Działanie maszyny stanów umożliwia automatyczną pracę sterownika.

Przygotowany algorytm sterowania będzie wykorzystywany podczas zajęć laboratoryjnych ze studentami oraz w przyszłych badaniach spalania odpadów prowadzonych na wydziale Odlewnictwa AGH.

5. Zakończenie

Celem niniejszej pracy dyplomowej była analiza procesów spalania oraz przygotowanie projektu sterowania dla rzeczywistego stanowiska badawczego.

Pierwsza część obejmowała podjęcie problematyki zanieczyszczeń powietrza powstałych na skutek nieprzestrzegania norm dotyczących ogrzewania budynków przemysłowych oraz gospodarstw domowych w Polsce.

Kolejny rozdział dotyczył procesu spalania. Zostało wyjaśnione zagadnienie procesu spalania na poziomie cząsteczkowym, który polega na tworzeniu się wolnych rodników reagujących łańcuchami węglowodorowymi i doprowadzających do powstania nowych związków chemicznych.

Dalsza analiza obejmowała spalanie paliw w zależności od ich stanu skupienia, tj. gazowych, ciekłych i stałych. Zostały przedstawione charakterystyczne aspekty każdego rodzaju spalania oraz aktualnie wykorzystywanych technologii spalania. Bardziej szczegółowo opisane zostały procesy spalania węgla oraz biomasy, jako dwóch konkurencyjnych paliw na rynku. Zebrane informacje pozwalają na porównanie obu rodzajów paliw i rozważenie biomasy jako ekologicznego paliwa przyszłości.

Następny fragment pracy opisywał zagadnienie procesu regulacji oraz stosowanych w przemyśle metod strojenia regulatorów. Poruszane zagadnienia automatyki dotyczyły obiektów regulacji, rodzajów regulatorów, ze szczególnym rozwinięciem działania regulatora PID oraz metod strojenia, wśród których zostały wyróżnione: metoda Zieglera-Nicholsa, kryterium stabilności aperiodycznej i całkowite wskaźniki regulacji.

W drugiej części pracy została opisana budowa stanowiska laboratoryjnego oraz działanie zaimplementowanego algorytmu sterowania.

Badane stanowisko obejmowało ceramiczny piec obrotowy, którego praca zależała od dwóch silników, z których pierwszy sterował miarkowaniem paliwa, a drugi kierunkiem i prędkością rusztu. Dopływ powietrza do komory spalania umożliwiało dwanaście wentylatorów zamontowanych szeregowo po obu stronach pieca.

Program sterowania piecem obejmował dwa tryby pracy – ręczny i automatyczny. Tryb manualny pozwalał na włączenie każdego z modułów wentylatorów i silników oraz

ustawienie szybkości ich pracy. W przypadku silnika sterującego rusztem możliwa była także zmiana kierunku obrotu.

Działanie trybu automatycznego zostało przedstawione za pomocą maszyny stanów. Program został podzielony na procesy przygotowawcze, proces pracy i proces gaszenia pieca. Kolejne stany pracy zależały od spełnienia określonych warunków. Z tej przyczyny nie była możliwa manualna konfiguracja określonych zmiennych w sterowniku. Każdy etap kończył się informacją o braku lub ewentualnym błędzie, o którym był informowany operator stanowiska. Program przeszedł próby symulacyjne, które zweryfikowały poprawne działanie maszyny stanów.

Zaimplementowany algorytm sterowania nie został przetestowany przy rozpalonym piecu ze względu na brak operatora urządzenia. Przygotowany program będzie wykorzystywany na uczelni w ramach zajęć dydaktycznych.

Analiza obecnych w przemyśle rozwiązań dotyczących spalania budzi wątpliwość czy stare paliwa, wykorzystywane do dostarczania energii, nie powinny być zastąpione nowymi, ekologicznymi zamiennikami. Umożliwiłoby to znaczne ograniczenie emisji do atmosfery szkodliwych substancji, które powstają przy spalaniu węgla, a równocześnie zmniejszyłoby zapotrzebowanie na spalany materiał, ponieważ biomasa jest bardziej energetycznym produktem niż węgiel.

Bibliografia

- [1] Gil P., Wilk J., Tychanicz M., Wielgos S.: Wstępne badania automatycznego kotła na pellet pod kątem wymagań normy PN-EN 303-5:2012, *Rynek Energii*, 10/2017
- [2] Gomułka, S., Knap, T., Strzelczyk, P., & Szczurba, Z.: *Energetyka wiatrowa. Uszczelnianie*, Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2006
- [3] Jędrzykiewicz Z., *Teoria sterowania układów jednowymiarowych*, Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2002
- [4] Kawałko S., Olek M.: *Spalanie biomasy*, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza
- [5] Kordylewski W. (red.): *Spalanie i paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008
- [6] Kwaśniewski J.: *Programowalne sterowniki przemysłowe w systemach sterowania*, Kraków 1999
- [7] Kwaśniewski J.: *Sterowniki PLC w praktyce inżynierskiej*, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2008
- [8] Oprządkiewicz I., Podstawy automatyki, http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~o_iwona/podstawy_aut/index.html [odwiedzona 25.08.2018 r.]
- [9] Tomczyk B.: *Budowa, uruchomienie, wykonanie pomiarów na stanowisku pieca ceramicznego z obrotowym rusztem*, Kraków 2016
- [10] Wach E., Bastian M.: *Produkcja i spalanie pelet*, Gdańsk 2010