



WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

**Sterowanie procesami wymiany ciepła
z zastosowaniem metod logiki rozmytej**

Daniel Gryc

nr albumu: 93284

kierunek: Automatyka i Robotyka

studia stacjonarne I stopnia

promotor:

dr hab. inż. Krzysztof Bartecki, prof. PO

Opole, 2020

Sterowanie procesami wymiany ciepła z zastosowaniem metod logiki rozmytej

Streszczenie

W przedstawionej pracy dyplomowej wykorzystano logikę rozmytą do sterowania przykładowym procesem wymiany ciepła. Główną część pracy zrealizowano z wykorzystaniem program *Matlab* oraz jego bibliotek: *Simulink*, *Fuzzy Logic Toolbox* oraz *Real Time Workshop*. Za ich pomocą zaprojektowano oraz zbudowano regulatory rozmyte, przeprowadzono badania symulacyjne, a następnie zrealizowano zadanie sterowania laboratoryjnym układem wymiennika ciepła. Na podstawie uzyskanych wyników oceniono jakość regulacji każdego z zastosowanych regulatorów rozmytych. Zbadano także wpływ zmiany pewnych ich parametrów na jakość regulacji.

Fuzzy logic–based control of heat exchange processes

Summary

Fuzzy logic was used to control the laboratory–scale heat exchange process. The main part of work, was based on the program *Matlab* and his libraries: *Simulink*, *Fuzzy Logic Toolbox* and *Real Time Workshop*. They were used to design and bulid fuzzy controllers and make the simulation tests. Next, they were used to control the heat exchanger training system. Based on obtained results, the control quality of all implement fuzzy controlers was assessed. The effect of their parameter changes on the control quality has been also examined.

Spis treści

1. Wprowadzenie	4
2. Cel i zakres pracy	13
3. Budowa uproszczonego modelu wymiennika ciepła	14
3.1. Identyfikacja obiektu.....	14
3.2. Budowa modelu symulacyjnego	18
4. Projektowanie rozmytych regulatorów typu P	22
4.1. Podstawowe informacje	22
4.2. Założenia projektowe	24
4.3. Regulator rozmyty typu P podstawowy – budowa	26
4.4. Regulator rozmyty typu P podstawowy – symulacja działania	29
4.5. Regulator rozmyty typu P rozszerzony – budowa	33
4.6. Regulator rozmyty typu P rozszerzony – symulacja działania	37
4.7. Wnioski	40
5. Projektowanie rozmytych regulatorów typu PI	41
5.1. Podstawowe informacje	41
5.2. Założenia projektowe	43
5.3. Regulator rozmyty typu PI podstawowy – budowa	45
5.4. Regulator rozmyty typu PI podstawowy – symulacja działania	49
5.5. Regulator rozmyty typu PI zmodyfikowany – budowa	54
5.6. Regulator rozmyty typu PI zmodyfikowany – symulacja działania	58
5.7. Wnioski	63
6. Implementacja regulatorów rozmytych w obiekcie rzeczywistym	64
6.1. Przebieg badań	64
6.2. Wyniki badań dla podstawowego regulatora rozmytego typu P	70
6.3. Wyniki badań dla rozszerzonego regulatora rozmytego typu P	74
6.4. Wyniki badań dla podstawowego regulatora rozmytego typu PI	78

6.5.	Wyniki badań dla zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI.....	83
6.6.	Wnioski	87
7.	Ocena jakości regulacji	88
7.1.	Całkowe kryteria jakości regulacji.....	88
8.	Podsumowanie	91
Literatura	93

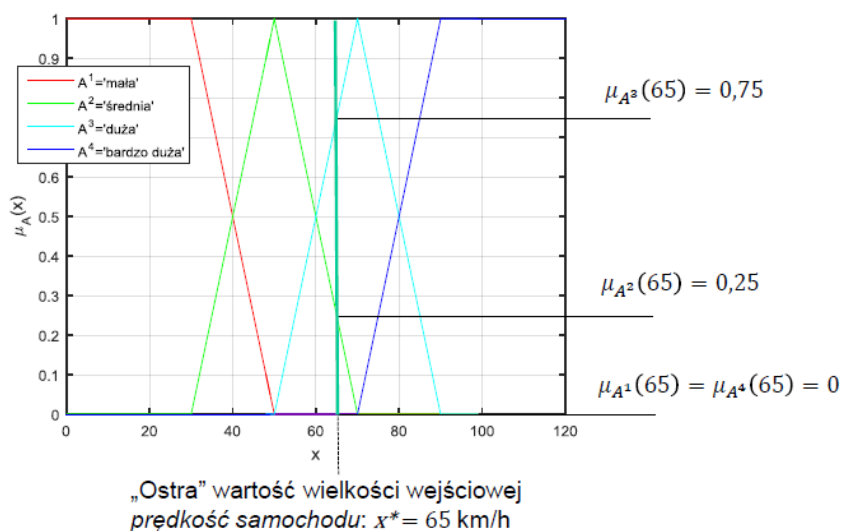
1. Wprowadzenie

Wprowadzenie pojęć takich jak zbiory rozmyte i logika rozmyta, było odpowiedzią na rosnącą potrzebę opisywania matematycznego, procesów i zjawisk o charakterze nieprecyzyjnym. Zamiast przyjmowania wartości tylko prawdziwych lub tylko fałszywych, używane są tu tak zwane zmienne lingwistyczne, których wartości są opisywane za pomocą nieprecyzyjnych pojęć języka mówionego np.: zimny, ciepły, wolny, szybki [9].

Logika rozmyta znajduje zastosowanie w sterowaniu procesami, gdzie sygnał sterujący można wyznaczyć w oparciu o wiedzę eksperta. Ekspert, czyli człowiek znający przebieg procesu i rządzące nim zależności jest w stanie intuicyjnie dobrać odpowiednią wartość sygnału sterującego, aby uzyskać określony efekt, czyli cel sterowania.

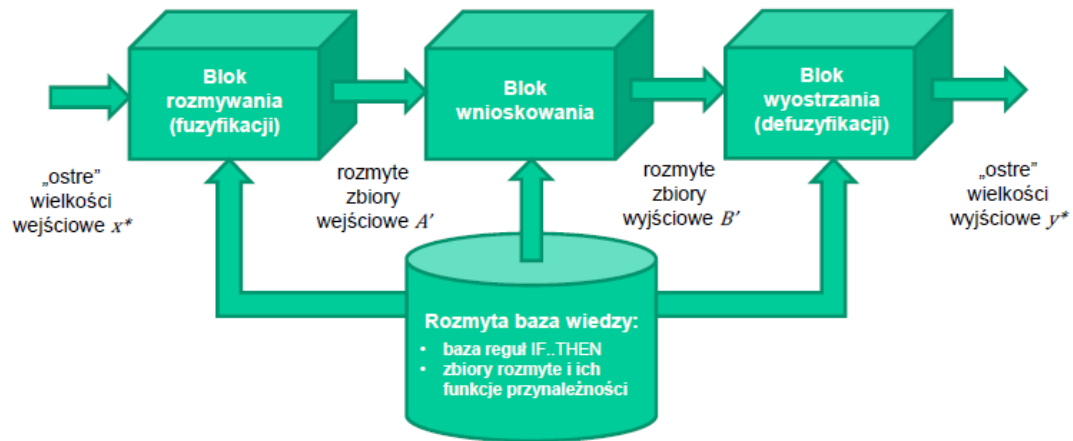
Przy wykorzystywaniu logiki rozmytej w sterowaniu procesami przemysłowymi nie wymaga się dokładnej znajomości modeli tych procesów, a jedynie reguł postępowania w danym przypadku. Za jej pomocą możliwe stało się zawarcie wiedzy eksperta w sterowniku rozmytym w formie bazy reguł, stworzonej na zasadzie zdań warunkowych typu IF...THEN [8].

Logika rozmyta opiera się na wykorzystywaniu tak zwanych funkcji przynależności do określania za ich pomocą przynależności wielkości wejściowej, do zbiorów rozmytych je reprezentujących (Rys. 1.1.).



Rys. 1.1. Przykładowe określanie stopnia przynależności dla danej wielkości wejściowej [1]

Zgrupowanie wielu funkcji przynależności opisujących dane wielkości, prowadzi do powstania tak zwanych systemów rozmytych. Na nich oraz na zależnościach je wiążących opiera się działanie regulatorów rozmytych.



Rys. 1.2. Schemat blokowy systemu rozmytego [1]

Działanie każdego systemu rozmytego widocznego na rysunku 1.2. składa się z trzech głównych operacji [14]:

- *rozmywanie* – przeprowadzane jest rozmywanie wielkości wejściowych. Polega to na sprawdzaniu w jakim stopniu, dane „ostre” wielkości wejściowe, przynależą do poszczególnych zbiorów rozmytych.
- *wnioskowanie* – na podstawie wyznaczonych stopni przynależności, z wykorzystaniem odpowiedniej operacji matematycznej i bazy reguł, obliczana jest tak zwana wynikowa funkcja przynależności wyjścia modelu f_p . Ma ona często złożony kształt, zależny od kształtu funkcji przynależności wielkości wejściowych oraz postaci bazy reguł.
- *wyostrzanie* – dzięki wynikowej funkcji przynależności f_p , wyznaczonej w bloku wnioskowania, obliczana jest „ostra” wartość wyjściowa za pomocą odpowiedniego mechanizmu defuzyfikacji np.: metody środka ciężkości.

Za pomocą programu *Matlab* oraz jego bibliotek *Simulink* i *Fuzzy Logic Toolbox*, można zbudować i zasymulować działanie systemów rozmytych. Zaprojektowane w ten sposób regulatory rozmyte można wykorzystać do sterowania rzeczywistymi procesami takimi jak np.: procesy wymiany ciepła.

Procesy wymiany ciepła zachodzą wszędzie tam, gdzie ma miejsce podgrzewanie lub ochładzanie różnych substancji. Prosty przykład występującym w naturze jest podgrzewanie Ziemi przez Słońce lub przepływ ciepła występujący między organizmami żywymi i ich otoczeniem. Zjawisko transportu ciepła znalazło liczne zastosowania w technice np.: chłodzenie produktów żywnościowych czy też ogrzewanie pomieszczeń za pomocą instalacji centralnego ogrzewania. Procesy wymiany ciepła w przemyśle oraz technice są zwykle realizowane za pomocą wymienników ciepła. Wymiennik ciepła jest to obiekt w którym, oddziałują na siebie pewne układy termodynamiczne. Muszą być one odizolowane od otoczenia oraz rozdzielone między sobą. Bardzo ważną rolę w wymienniku ciepła spełnia tak zwana granica rozdziału układów termodynamicznych. Może mieć ona formę materialną lub występować w postaci powierzchni międzyfazowej. Jej brak oznacza, że dany obiekt nie jest wymiennikiem ciepła np.: urządzenie w którym, mieszają się ze sobą dwie ciecze wzajemnie się rozpuszczające. Granica rozdziału posiada pewne określone właściwości takie jak opór cieplny czy zdolność do przepuszczania tylko ciepła lub określonego składnika. W wymiennikach ciepła bardzo ważny jest też stan układów termodynamicznych biorących udział w procesie wymiany ciepła. Aby była ona możliwa jeden z nich musi charakteryzować się nadwyżką energii, a drugi jej niedoborem w stosunku do stanu równowagi termodynamicznej [3].

Wymienniki ciepła można dzielić na różne rodzaje, wykorzystując do tego określone kryteria podziału. Istotny podział wynika z konstrukcji danego wymiennika. Na tej podstawie wymienniki dzieli się ze względu na [3]:

- a) rodzaj wymienianej wielkości,
- b) sposób realizacji wymiany w czasie.

Kryterium a) wyróżnia:

- wymienniki ciepła i masy – są to obiekty w których ze względu na właściwości granicy rozdziału, następuje wymiana ciepła oraz niektórych składników,
- wymienniki ciepła – obiekty w których, przez granicę rozdziału przepuszczane jest tylko ciepło,
- wymienniki masy – występuje tylko wymiana niektórych składników pomiędzy układami termodynamicznymi.

Z kolei kryterium b) dzieli wymienniki na:

- wymienniki ze stałą wartością strumienia – są to obiekty, których termodynamiczne układy otwarte charakteryzują się niewielką zdolnością do akumulacji energii. Wynika to z niewielkiej ilości substancji biorących udział w wymianie ciepła, w obrębie samego wymiennika.
- wymienniki ze zmienną wartością strumienia – są to wymienniki, składające się z jednego układu otwartego i jednego układu zamkniętego z małym przepływem. Charakteryzuje je zdolność do akumulowania energii przez układ zamknięty.
- wymienniki ze zmiennym zwrotem oraz zmienną wartością strumienia – są to obiekty w których substancje z układów termodynamicznych otwartych przepływają naprzemiennie przez wymiennik, a granica rozdziału posiada zdolność do akumulacji energii.

Stosując te kryteria podziału, do użytego w pracy dyplomowej wymiennika ciepła firmy *Edibon*, można stwierdzić, że ze względu na rodzaj wymienianej wielkości jest on wymiennikiem ciepła, a ze względu na sposób realizacji wymiany w czasie jest on wymiennikiem ze stałą wartością strumienia.

Używany w pracy dyplomowej wymiennik ciepła jest także szczególnym rodzajem wymiennika płaszczowo–rurowego, czyli wymiennikiem typu „rura w rurze”. Charakteryzuje się on prostą konstrukcją, dzięki czemu możliwa jest jego łatwa konserwacja i naprawa. W przemyśle jest on stosowany w procesach, gdzie ciecze uczestniczące w wymianie ciepła, cechują się dużą gęstością i lepkością. Niestety w porównaniu z klasycznymi wymiennikami płaszczowo-rurowymi posiada on mniejszą wydajność, co wynika z mniejszej powierzchni wymiany ciepła [11, 13].

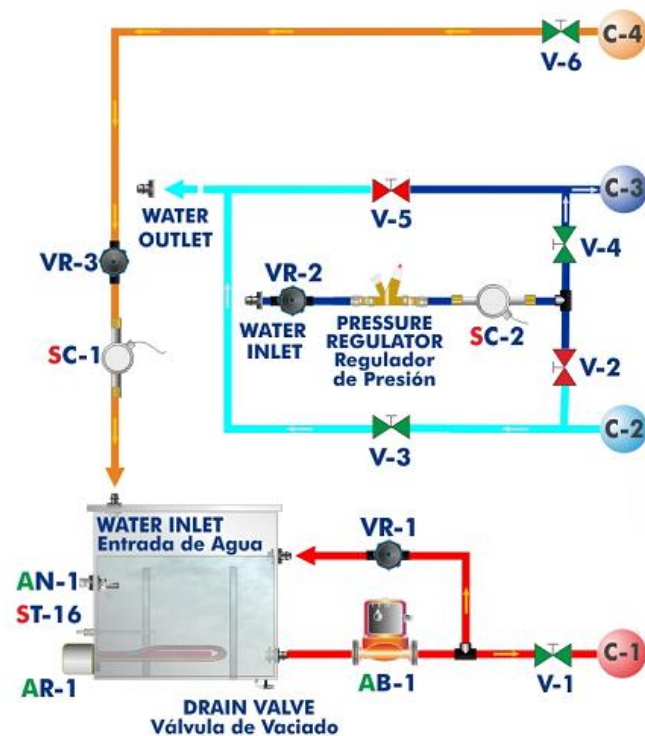


Rys. 1.3. Stanowisko laboratoryjne wymiennika ciepła hiszpańskiej firmy *Edibon*

Zgodnie z dokumentacją, stanowisko laboratoryjnego wymiennika ciepła widoczne na rysunku 1.3., składa się z następujących elementów [10]:

1. Jednostki bazowej TIUS (Rys. 1.4.) zawierającej:

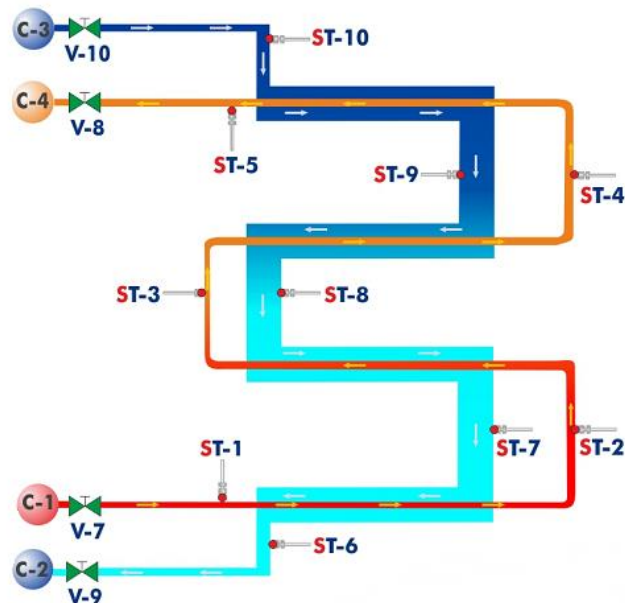
- zbiornik z wodą do podgrzewania o pojemności 30 l,
- grzałkę AR-1 o mocy 3000 W,
- termostat AN-1 ustawiony na wartość 70 °C,
- czujnik temperatury wody w zbiorniku ST-16,
- pompę wody AB-1 z regulowanym przepływem 0–3 l/min,
- dwa czujniki przepływu SC-1 i SC-2 (jeden dla wody ogrzewanej, a drugi dla wody ogrzewającej) o zakresie pomiaru 0.25–6.5 l/min,
- zawory kulowe V-2, V-3, V-4 i V-5 umożliwiające ustawienie kierunku przepływu wody ogrzewanej,
- zawory kulowe V-1 i V-6 odpowiedzialne za umożliwienie przepływu wody ogrzewającej,
- reduktor ciśnienia wody na wejściu obiegu wody ogrzewanej, ustawiony na wartość 0.6 Bara,
- reduktory przepływu wody VR-1, VR-2 i VR-3.



Rys. 1.4. Schemat jednostki bazowej TIUS [10]

2. Rurowego wymiennika ciepła TITCA (Rys. 1.5.) w którym, znajduje się m.in.:

- 5 czujników temperatury (ST-1 do ST-5) dla obiegu wody ogrzewającej,
- 5 czujników temperatury (ST-6 do ST-10) dla obiegu wody ogrzewanej,
- zawory V-7 i V-8 umożliwiające przepływ wody ogrzewającej,
- zawory V-9 i V-10 umożliwiające przepływ wody ogrzewanej,
- dwa zawory odpowietrzające każdy z obiegu wymiennika.



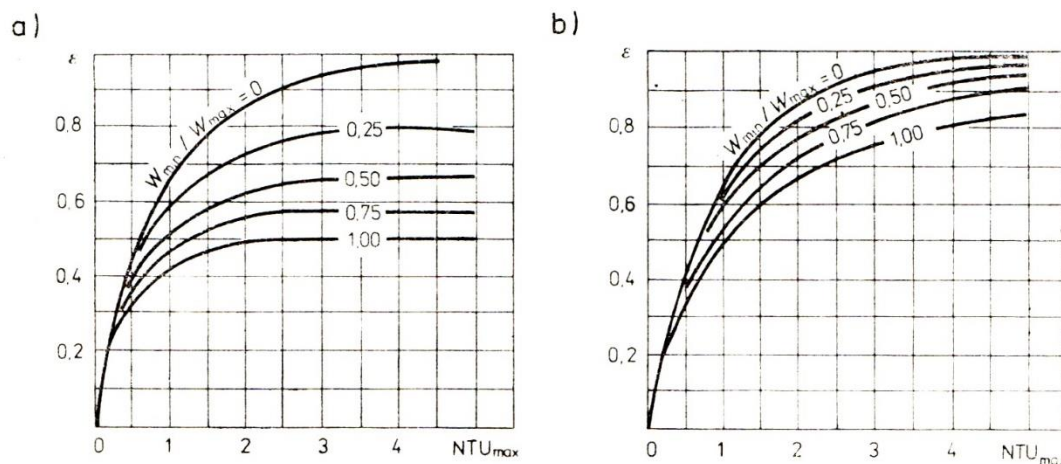
Rys. 1.5. Schemat rurowego wymiennika ciepła TITCA [10]

3. Urządzenia kontrolnego z interfejsem pomiarowym (CIB), którego głównym zadaniem jest:

- zbieranie danych pomiarowych z czujników i przekazywanie ich do karty pomiarowej znajdującej się w komputerze stanowiskowym,
- odbieranie sygnałów sterujących z odpowiedniego oprogramowania,
- sterowanie pompą wody oraz grzałką w zbiorniku wody ogrzewającej.

Urządzenie kontrolne jest sterowane z dedykowanego oprogramowania komputerowego o nazwie *Edibon SCADA System*, w którym można ustalać prędkość przepływu wody ogrzewającej oraz odczytywać dane zgromadzone na karcie pomiarowej. Istnieje także możliwość sterowania urządzeniem za pomocą programu *Matlab* [10].

Jak wynika z dokumentacji, za pomocą odpowiednich zaworów możemy zmieniać kierunek przepływu wody ogrzewanej, dzięki czemu dany wymiennik ciepła może pracować w dwóch konfiguracjach: współprądowej i przeciwpładowej. Każda z tych konfiguracji ma bezpośredni wpływ na przebieg procesu wymiany ciepła.



Rys. 1.6. Efektywność wymienników równoległopładowych:

a) współprładowego, b) przeciwpładowego [3]

Wykresy na rysunku 1.6. są graficzną ilustracją jednego z ważnych parametrów wymiennika ciepła, a mianowicie efektywności ε . Jak można zaobserwować, zależy ona od maksymalnej liczby jednostek wymiany NTU_{max} oraz od wielkości reprezentującej stosunek układu termodynamicznego o mniejszej pojemności cieplnej W_{min} do układu o większej pojemności cieplnej W_{max} .

Efektywność ε jest obliczana zgodnie z wzorem [3]:

$$\varepsilon = \frac{1}{1+R} \{1 - \exp[-NTU(1+R)]\}, \quad (1.1)$$

gdzie:

$$R = \frac{W_{min}}{W_{max}}. \quad (1.2)$$

Porównując oba wykresy można stwierdzić, że dla rozważanych przypadków efektywność wymiany ciepła ε jest zawsze większa, jeśli wymiennik ciepła pracuje w konfiguracji przeciwpładowej. Dane wykresy można odnieść do wymiennika *Edibon*, po przez porównanie efektywności obliczonej z zależności 1.1 dla przypadku, kiedy stosunek pojemności cieplnej obu układów wynosi 1. Wynika to z faktu, że na danym stanowisku laboratoryjnym oba układy termodynamiczne to woda, zatem wielkość 1.2 będzie miała wartość równą jedności.

Sterowanie wymiennikiem ciepła polega zwykle na regulacji temperatury wylotowej jednego z płynów, uczestniczących w wymianie ciepła. Wielkościami, które mogą pełnić rolę sygnału sterującego są zarówno temperatura wlotowa jak i prędkość przepływu danej cieczy. Dla rurowych wymienników ciepła można wyróżnić cztery podstawowe wielkości, istotne z punktu widzenia sterowania [7]:

- temperatura wlotowa cieczy w rurze $T_{1in}(t)$,
- przepływ wlotowy cieczy w rurze $\dot{V}_{1in}(t)$,
- temperatura wlotowa cieczy w płaszczu $T_{2in}(t)$,
- przepływ wlotowy cieczy w płaszczu $\dot{V}_{2in}(t)$.

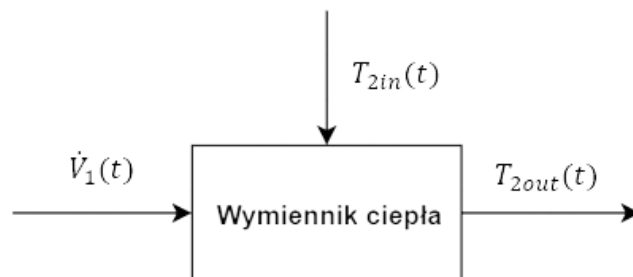
Wpływają one bezpośrednio, na wielkości wyjściowe wymiennika jakimi są temperatury i przepływy wylotowe cieczy: $T_{1out}(t)$, $T_{2out}(t)$, $\dot{V}_{1out}(t)$, $\dot{V}_{2out}(t)$. W przypadku wymiennika ciepła firmy *Edibon* przyjęto następujące założenia upraszczające:

$$\dot{V}_{1in}(t) = \dot{V}_{1out}(t), \quad (1.3)$$

$$\dot{V}_{2in}(t) = \dot{V}_{2out}(t). \quad (1.4)$$

Równości 1.3 i 1.4 wynikają z zastosowania tylko jednego czujnika przepływu na każdy z obiegów w wyniku czego założono, że wartości wejściowe i wyjściowe przepływu są sobie równe. Wpłynęło to także na zmianę oznaczeń, przez co przepływ cieczy w rurze oznaczono jako $\dot{V}_1(t)$, a przepływ cieczy w płaszczu jak $\dot{V}_2(t)$.

Z wykorzystaniem regulatorów rozmytych, podjęto się sterowania przepływem wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ o temperaturze $T_{1in}(t)$, w celu uzyskania określonej temperatury wody ogrzewanej $T_{2out}(t)$ na wylocie wymiennika ciepła. Wielkością zakłócającą były wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, doprowadzanej do wejścia obiegu wody ogrzewanej wymiennika ciepła. Zostało to zobrazowane na rysunku 1.7.



Rys. 1.7. Schemat wymiennika ciepła jako obiektu sterowania

Wykorzystanie logiki rozmytej do sterowania wymiennikiem ciepła jest jak najbardziej uzasadnione. W procesach nieliniowych na stan wielkości sterowanej wpływa często wiele parametrów, które dodatkowo oddziałują na siebie wzajemnie. Trudno w takich przypadkach dobrać optymalne nastawy dla regulatorów klasycznych takich jak regulator klasyczny PID czy regulator dwustanowy, tak aby przy wyznaczaniu sygnału sterującego uwzględnić wszystkie zmienne mające wpływ na wielkość wyjściową. Stworzone w oparciu o schemat z rysunku 1.2. sterowniki rozmyte, znacząco poprawiają płynność sterowania danym procesem. Wynika to z opisywania wielkości wejściowych nie w sposób zero – jedynkowy, tak jak to ma miejsce w logice binarnej, ale w sposób umożliwiający określenie ich stopnia przynależności do odpowiedniego zbioru rozmytego (Rys 1.1.). Przejście między poszczególnymi stanami wielkości wejściowych jest płynne i nie zmienia się skokowo. Taki proces klasyfikacji jest bardziej zbliżony do rozumowania ludzkiego [5].

Odpowiednie dobranie stopnia przynależności do zbioru rozmytego dla każdej wielkości wejściowej, bezpośrednio wpływa na dokładniejsze wyznaczenie wartości sygnału sterującego w procesie defuzyfikacji. W rezultacie jakość regulacji ulegnie poprawie w stosunku do wyników osiąganych przez regulatory klasyczne.

Zgromadzone informacje, pozwoliły na przedstawienie w pracy dyplomowej :

- procesu budowania systemów rozmytych służących do sterowania procesami wymiany ciepła,
- praktycznego wykorzystania zbudowanych regulatorów w sterowaniu rzeczywistym wymiennikiem ciepła,
- oceny jakości regulacji, poszczególnych regulatorów na podstawie danych pomiarowych uzyskanych z odpowiednich czujników.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest synteza i implementacja regulatorów rozmytych typu P i PI, w celu regulacji temperatury wody na wyjściu wymiennika ciepła, przy przepływie przeciwpłdowym. Ten tryb pracy wymiennika, został wybrany ze względu na większą efektywność, przy wymianie ciepła.

W pierwszym etapie pracy, który został opisany w rozdziale trzecim, przeprowadzono identyfikację obiektu dla dwóch wybranych wartości wymuszeń przepływu wody ogrzewającej, w celu uzyskania odpowiedzi czasowych układu. Na podstawie uzyskanych charakterystyk, za pomocą programu *Matlab* i jego biblioteki *Simulink*, zbudowano uproszczony model transmitancyjny wymiennika ciepła, którego odpowiedź była możliwie najbliższa odpowiedzi rzeczywistego układu.

W drugim etapie, na który składają się rozdziały czwarty i piąty wykorzystano pakiet *Fuzzy Logic Toolbox*, do zbudowania regulatorów rozmytych typu P i PI. Określono ich funkcje przynależności oraz stworzono odpowiednią bazę reguł. Zaprojektowane w tym etapie regulatory rozmyte, poddano badaniom symulacyjnym na uproszczonym modelu wymiennika ciepła, gdzie sprawdzono ich odpowiedzi w danych warunkach.

W trzecim etapie opisanym w rozdziale szóstym, wykorzystano zbudowane regulatory rozmyte do sterowania obiektem rzeczywistym, gdzie sprawdzono ich działanie. Następnie w rozdziale siódmym zawarto ocenę jakości regulacji wykorzystanych regulatorów.

3. Budowa uproszczonego modelu wymiennika ciepła

Dla dwóch wymuszeń przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ w wymienniku, wyznaczono charakterystyki reprezentujące odpowiedź układu. Charakterystyki były wyznaczane na podstawie danych pomiarowych z czujnika ST-6 (Rys. 1.5.), umieszczonego na wyjściu obiegu wody ogrzewanej. Na ich podstawie, zbudowano uproszczony, linowy model wymiennika ciepła. Zbudowany model jest traktowany jako obiekt SISO w którym, sygnałem wejściowym jest wartość przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$, a sygnałem wyjściowym jest temperatura wody na wyjściu wymiennika $T_{2out}(t)$.

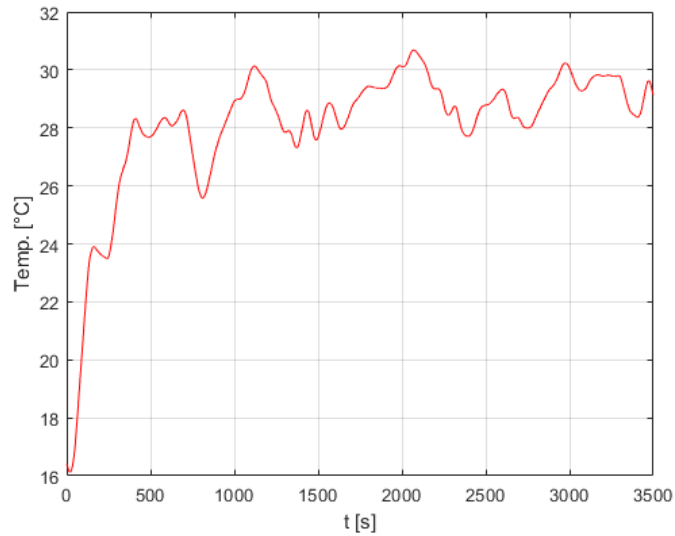
3.1. Identyfikacja obiektu

W pierwszym etapie wodę w zbiorniku, nagrzano do temperatury ok. 60 °C. Dana temperatura była utrzymywana w sposób ciągły, za pomocą wbudowanego regulatora PID. Po osiągnięciu odpowiedniej wartości, uruchomiono przepływ wody ogrzewanej $\dot{V}_2(t)$, a za pomocą pompy wody wymuszono przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ o następujących wartościach:

- a) 1 l/min,
- b) 1.8 l/min.

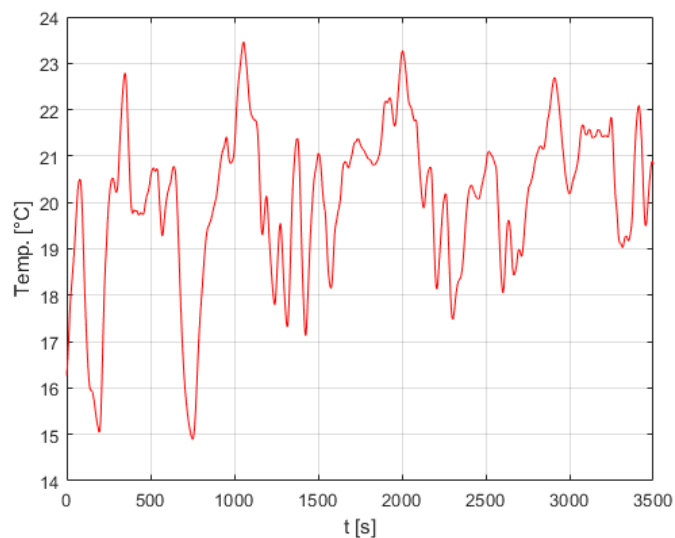
Czas pojedynczego badania wynosił 3500 s, czyli blisko godzinę. Jest to spowodowane tym, że wymiennik ciepła potrzebuje stosunkowo dużo czasu na ustabilizowanie swojej odpowiedzi temperaturowej. Przepływ wody $\dot{V}_2(t)$ wpływającej do wymiennika ciepła ustawiono za pomocą reduktora na wartość 2 l/min.

Na rysunkach 3.1.–3.3. przedstawiono charakterystyki uzyskane dla wartości przepływu z podpunktu a).

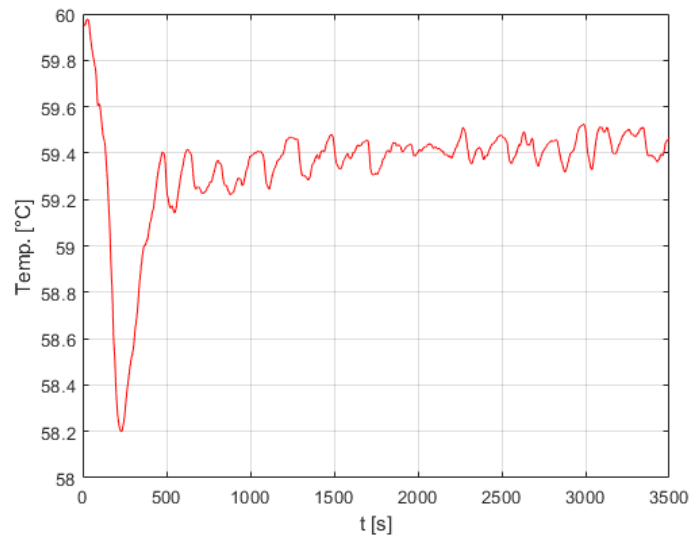


Rys. 3.1. Odpowiedź obiektu $T_{2out}(t)$ dla skokowej zmiany przepływu $\dot{V}_1(t)$ z wartości 0 do 1 l/min

Jak widać na rysunku 3.1., dla przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ o wartości 1 l/min przy stałej wartości przepływu wody ogrzewanej $\dot{V}_2(t)$ wynoszącej 2 l/min, temperatura na wyjściu wymiennika po nagrzaniu się od temperatury początkowej, oscyluje w granicach 29 °C. Oscylacje są spowodowane zakłóceniami w postaci zmian temperatury wody ogrzewanej $T_{2in}(t)$ wpływającej do wymiennika z sieci wodociągowej (Rys. 3.2).



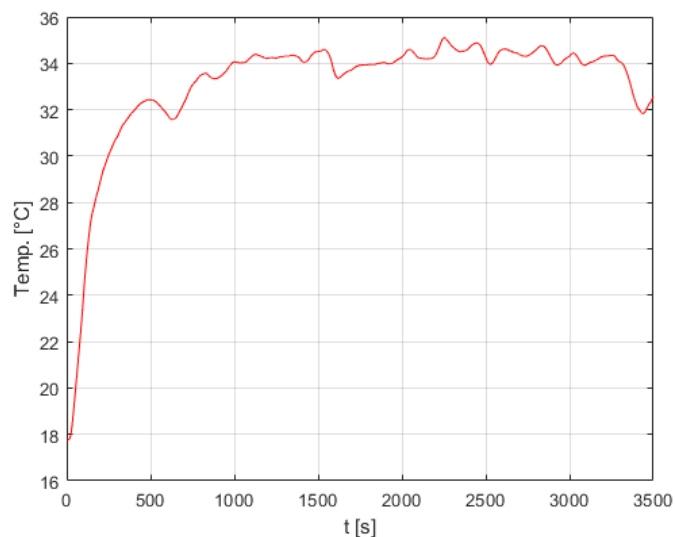
Rys. 3.2. Zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ w czasie badania



Rys. 3.3. Zmiany temperatury T_{zb} w zbiorniku dla skokowej zmiany przepływu $\dot{V}_1(t)$ z 0 do 1 l/min

Na rysunku 3.3. pokazano zmiany temperatury T_{zb} w zbiorniku wody podczas trwania badania. Widać na nim charakterystyczny spadek temperatury po włączeniu obiegu wody ogrzewającej, który z czasem zostaje skompensowany przez regulator PID mający za zdanie utrzymywanie stałej temperatury w zbiorniku.

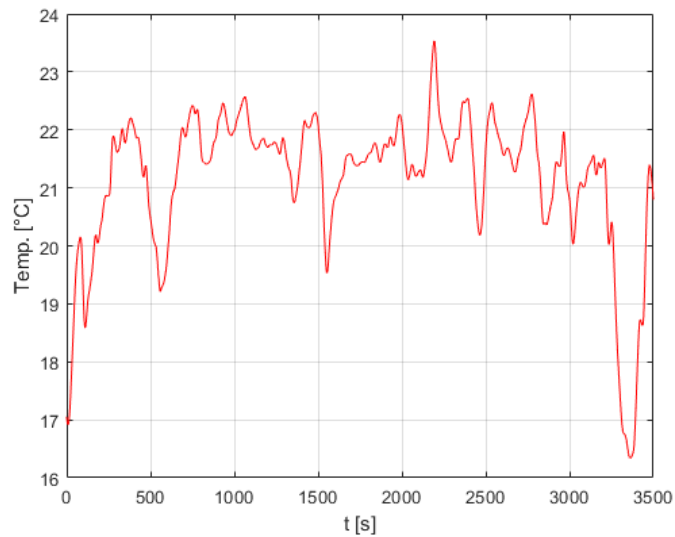
Na rysunkach 3.4.–3.6. przedstawiono charakterystyki uzyskane dla podpunktu b).



Rys. 3.4. Odpowiedź obiektu $T_{2out}(t)$ dla skokowej zmiany przepływu $\dot{V}_1(t)$ z 0 do 1.8 l/min

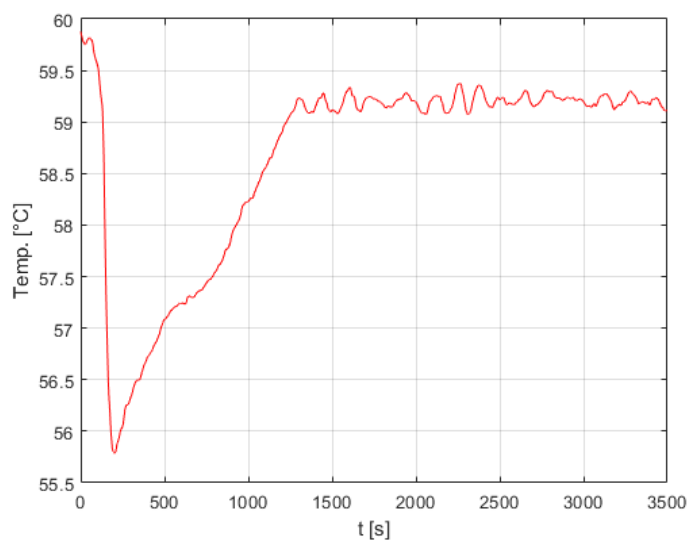
Na rysunku 3.4., temperatura $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika stabilizuje się na poziomie ok. 34 °C przy przepływie wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ wynoszącym 1.8 l/min. Wyższa temperatura $T_{2out}(t)$, wynika z większej wartości przepływu wody $\dot{V}_1(t)$.

Również w tym wypadku występują oscylacje, których powodem są zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, znajdujące się na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Zmiana temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ w czasie badania

Rysunek 3.6. pokazuje zmianę temperatury T_{zb} w zbiorniku wody podczas trwania badania. Także w tym przypadku, występuje początkowy spadek temperatury w zbiorniku, ale w porównaniu z rysunkiem 3.3. spadek ten jest większy i więcej czasu jest potrzebne na powrót temperatury do wartości początkowej. Wynika to z większego przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$, przez co więcej ciepła jest oddawane do obiegu wtórnego.

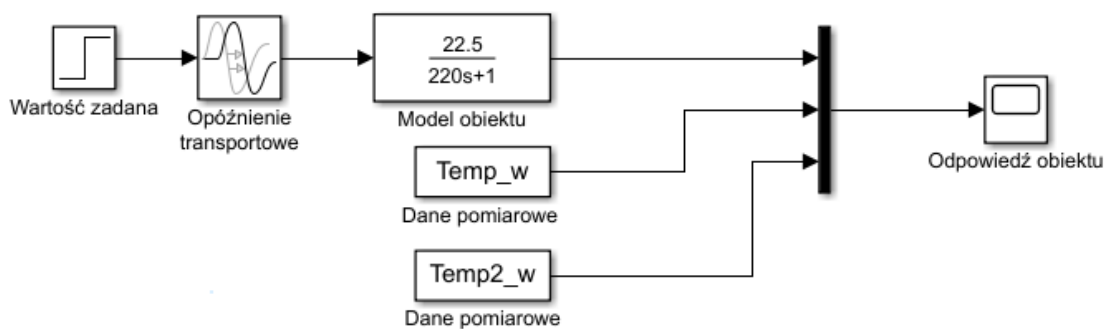


Rys. 3.6. Zmiany temperatury T_{zb} w zbiorniku, dla skokowej zmiany przepływu $\dot{V}_1(t)$ z 0 do 1.8 l/min

Na podstawie przeprowadzonej identyfikacji, można dojść do wniosku, że badany obiekt jest nieliniowy. Wynika to z wartości na których stabilizuje się temperatura $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika, dla obu punktów pracy. Można zauważyć, że rośnie ona w sposób nieliniowy. Dla przepływu $\dot{V}_1(t)$ w podpunkcie a) stabilizuje się ona na poziomie około 29 °C (Rys. 3.1.) i pomimo prawie dwukrotnego zwiększenia jego wartości dla podpunktu b), temperatura na wyjściu wzrosła tylko o parę stopni (Rys. 3.4.) osiągając wartość 34 °C.

3.2. Budowa modelu symulacyjnego

Dzięki znajomości odpowiedzi skokowych układu dla dwóch różnych wartości wymuszeń przepływu $\dot{V}_1(t)$, możliwe stało się zbudowanie uproszczonego modelu transmitancyjnego wymiennika ciepła z użyciem biblioteki *Simulink* programu *Matlab*. Model ten posłużył do późniejszego projektowania regulatorów rozmytych. Założono, że uproszczony model transmitancyjny wymiennika ciepła będzie reprezentowany przez człon inercyjny I rzędu z opóźnieniem. Ma on postać $G(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-\tau s}$. Wartości parametrów wzmocnienia k , stałej czasowej T oraz opóźnienia τ dobrano tak, aby odpowiedź modelu była uśredniona w stosunku do odpowiedzi obiektu dla dwóch badanych punktów pracy w podrozdziale 3.1.



Rys. 3.7. Układ służący do budowy uproszczonego modelu wymiennika ciepła

Rysunek 3.7. pokazuje układ za pomocą którego, wyznaczano parametry modelu symulacyjnego wymiennika ciepła. Pierwszym krokiem było ustawienie wymuszenia w bloku *Wartość zadana*, na poziomie 1.4. Wynika ono z przepływów $\dot{V}_1(t)$ zadanych w czasie badań identyfikacyjnych. Skoro zbadano zachowanie się układu dla punktów pracy wynoszących odpowiednio 1 oraz 1.8 l/min, to parametry modelu zostały dobrane dla

wymuszenia skokowego będącego średnią arytmetyczną tych wartości. Dzięki temu uzyskano wymuszenie, uśrednione w stosunku do zbadanych punktów pracy.

W bloku *Opóźnienie transportowe*, który pełni rolę członu opóźniającego ustawiono jego wartość na poziomie 14 sekund. Do jego wyznaczenia posłużyły dane pomiarowe, dotyczące wartości temperatur dla dwóch wymuszeń przepływu $\dot{V}_1(t)$ z podrozdziału 3.1., znajdujące się w blokach *Temp_w* i *Temp2_w*. Pod uwagę wzięto pierwsze 26 sekund, w czasie których można zaobserwować występowanie opóźnienia w obu przypadkach.

Tab. 3.1. Początkowe dane pomiarowe dla dwóch wymuszeń przepływu $\dot{V}_1(t)$

Czas badania [s]	Temp_w [°C]	Temp2_w [°C]
0	17,75	16,42
2	17,75	16,37
4	17,75	16,32
6	17,75	16,28
8	17,75	16,24
10	17,75	16,21
12	17,76	16,18
14	17,77	16,16
16	17,79	16,14
18	17,81	16,13
20	17,84	16,12
22	17,88	16,13
24	17,95	16,13
26	18,04	16,15

Na podstawie danych umieszczonych w tabeli 3.1. można zaobserwować, że dla pomiarów z bloku *Temp_w*, temperatura $T_{2out}(t)$ zaczyna rosnąć po upływie 10 sekund. Z kolei wartości temperatur $T_{2out}(t)$ z bloku *Temp2_w* zaczynają stale zwiększać się dopiero po upływie 20 sekund badania. Na tej podstawie dobrano opóźnienie τ , którego wartość leży pomiędzy opóźnieniami wyznaczonymi dla danych punktów pracy.

Kolejnym krokiem było określenie wartości wzmocnienia k . Na podstawie danych uzyskanych w podrozdziale 3.1. wiadomo, że dla pierwszego punktu pracy temperatura $T_{2out}(t)$ oscyluje wokół wartości 29 °C (Rys. 3.1.). Z kolei dla drugiego punktu pracy, jej wartość osiąga poziom około 34 °C (Rys. 3.4.). Wyliczona średnia arytmetyczna z tych dwóch temperatur wynosi 31,5 °C. Stanowi ona wartość, na jakiej będzie się stabilizować odpowiedź (sygnał wyjściowy) budowanego modelu dla wymuszenia skokowego równego 1.4. Wartość wzmocnienia k została wyliczona na podstawie równania [15]:

$$y_u = k \cdot U, \quad (3.1)$$

gdzie,

y_u – wartość ustalona sygnału wyjściowego,

U – wartość wymuszenia skokowego.

Przyjmując $U = 1.4$ oraz $y_u = 31,5$ °C wynik równania 3.1 wynosi 22.5.

W ostatnim etapie wyznaczono stałą czasową T . Jej wartość jest obliczana w prosty sposób na podstawie zależności [15]:

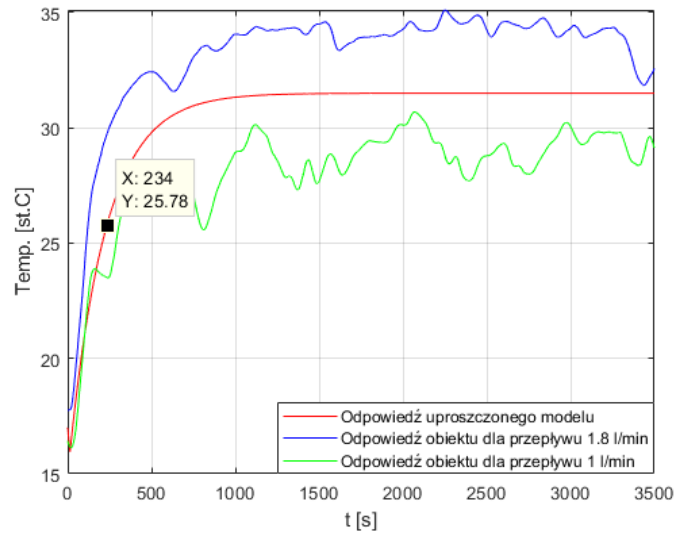
$$T = 0,63 \cdot y_u. \quad (3.2)$$

Trzeba pamiętać, że w danym przypadku wielkość y_u będzie równała się różnicy pomiędzy wartością ustaloną wynoszącą 31,5 °C, a wartością minimalną temperatury wody o wartości 16 °C. Dzięki temu charakterystyka zostanie „przesunięta” w dół tak aby zaczynała się ona od zera (wtedy $y_u = 15,5$ °C). Następnie dla tak przesuniętej charakterystyki obliczono 63% wartości ustalonej zgodnie ze wzorem 3.2:

$$0,63 \cdot 15,5 \text{ °C} = 9,765 \text{ °C}. \quad (3.3)$$

Ostatecznie do wartości otrzymanej w działaniu 3.3 dodano wartość minimalną temperatury wody (działanie 3.4), czyli 16 °C oraz odczytano przybliżoną wartość stałej czasowej dla tej wielkości.

$$16 \text{ °C} + 9,765 = 25,76 \text{ °C} \quad (3.4)$$



Rys. 3.8. Wykres ilustrujący odpowiedź usrednionego modelu $G(s)$ na tle odpowiedzi rzeczywistego obiektu dla dwóch punktów pracy

Od danej wielkości, która została zaznaczona i odczytana z rysunku 3.8., odjęto wartość wyznaczonego wcześniej opóźnienia τ równego 14 sekund i w ten sposób otrzymano stałą czasową T , która wynosi 220 sekund (działanie 3.5).

$$234 \text{ s} - 14 \text{ s} = 220 \text{ s} \quad (3.5)$$

Podsumowując, najważniejsze parametry uproszczonego modelu wymiennika ciepła wynoszą:

- $k = 22.5$,
- $T = 220 \text{ s}$,
- $\tau = 14 \text{ s}$.

Dzięki poprawnie wyznaczonym parametrom odpowiedź skokowa zbudowanego modelu, zgodnie z założeniami jest usredniona w stosunku do odpowiedzi obiektu dla identyfikacyjnych wymuszeń przepływu $\dot{V}_1(t)$ (Rys. 3.8.).

4. Projektowanie rozmytych regulatorów typu P

Wykorzystując wcześniej zbudowany model wymiennika ciepła (Rys. 3.7.), rozpoczęto projektowanie dyskretnych regulatorów rozmytych typu P w wersji podstawowej i rozszerzonej, czyli z podstawową i rozszerzoną bazą reguł. Wielkością wejściową regulatorów rozmytych typu P jest dyskretna wartość uchybu temperatury $e(n)$, a wyjściową wartość przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$. W czasie projektowania sprawdzono, jak liczba reguł oraz liczba funkcji przynależności wpływają na jakość regulacji.

4.1. Podstawowe informacje

Działanie każdego regulatora rozmytego opiera się na operacjach rozmywania, wnioskowania oraz wyostrzania, których działanie zostało opisane w rozdziale pierwszym. Regulatory rozmyte służące do sterowania wymiennikiem ciepła są regulatorami dyskretnymi, ponieważ ich działanie opiera się danych pomiarowych dostarczanych w konkretnych chwilach czasowych ze stałym okresem próbkowania T_s . Dyskretny, linowy regulator typu P można opisać za pomocą zależności [4]:

$$u(n) = K_p \cdot e(n), \quad (4.1)$$

gdzie,

K_p – współczynnik wzmocnienia regulatora,

$u(n)$ – dyskretna wartość sygnału sterującego,

$e(n)$ – dyskretna wartość uchybu regulacji.

Dyskretny regulator typu P w postaci rozmytej, można opisać wzorem [4]:

$$U(n) = f_p(GE \cdot e(n)) \cdot GU, \quad (4.2)$$

gdzie,

$U(n)$ – dyskretna wartość sygnału sterującego,

$e(n)$ – dyskretna wartość uchybu regulacji,

GE – wartość wzmocnienia sygnału uchybu,

GU – wartość wzmocnienia sygnału sterującego,

f_p – wynikowa funkcja przynależności, wyznaczona w procesie wnioskowania.

Jak można zauważyć w zależności 4.2, regulator rozmyty posiada dwie wielkości opisujące wzmocnienie oznaczone jako GE oraz GU, podczas gdy w jego wersji klasycznej opisanej wzorem 4.1, istnieje tylko jeden współczynnik wzmocnienia K_p [4]. Sygnał wyjściowy $U(n)$ widoczny we wzorze 4.2 jest powiązany z uchybem $e(n)$ w sposób nieliniowy. W celu uproszczenia opisu można jednak dokonać jego liniowej aproksymacji zakładając, że [4]:

$$f_p(GE \cdot e(n)) \approx GE \cdot e(n), \quad (4.3)$$

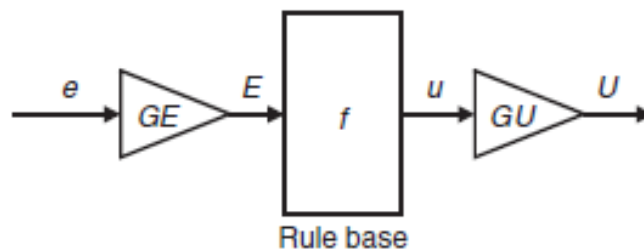
przez co,

$$U(n) = GE \cdot GU \cdot e(n). \quad (4.4)$$

Założenie 4.3. i uzyskany wzór 4.4 pozwoliły na określenie przybliżonego wzmocnienia w regulatorze rozmytym typu P, które zostało przedstawione za pomocą zależności 4.5 [4].

$$GE \cdot GU = K_p. \quad (4.5)$$

Podsumowując, strukturę regulatora rozmytego typu P można zilustrować zgodnie z schematem przedstawionym na rysunku 4.1. Wielkości e oraz E oznaczają odpowiednio wartości uchybu regulacji, przed oraz po wzmocnieniu przez blok GE. Analogiczny opis dotyczy sygnału wyjściowego, gdzie zmienne u oraz U , opisują wartość sygnału sterującego przed i po wzmocnieniu przez blok GU [4].

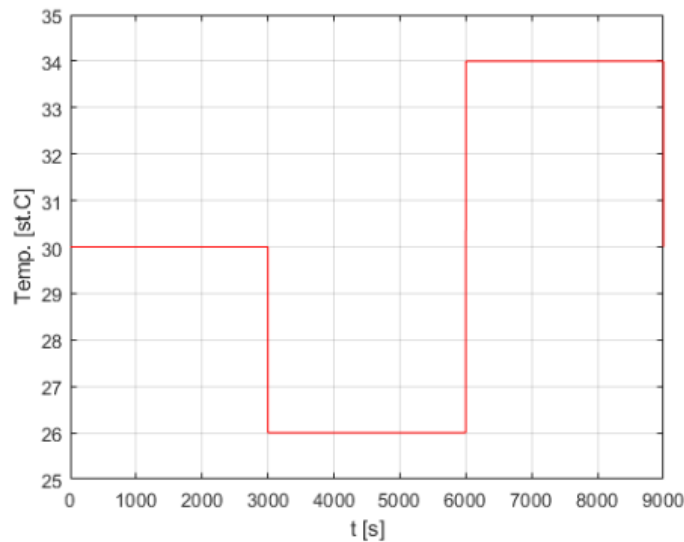


Rys. 4.1. Struktura regulatora rozmytego typu P [4]

Rzeczywiste regulatory rozmyte typu P, są regulatorami nieliniowymi dzięki czemu świetnie sprawdzają się w sterowaniu obiektami tego typu. Powiązanie wzmocnienia z funkcją f_p powoduje, że jego wartość nie jest stała i zmienia się w zależności od aktualnego punktu pracy.

4.2. Założenia projektowe

W czasie badań, regulatorom rozmytym typu P zadano trzy wartości temperatury wody $T_{zad}(t)$, jaka ma być utrzymywana na wyjściu obiektu. Ich wartości i czasy trwania są widoczne na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Zmiany temperatury zadanej $T_{zad}(t)$

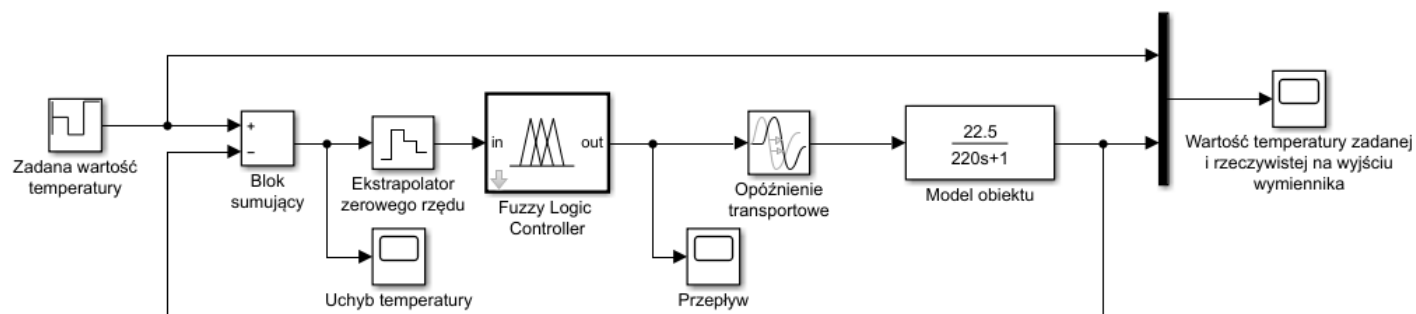
Maksymalny przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ ograniczono do 2 l/min, ponieważ wyższe jego wartości w czasie prób identyfikacyjnych, okazały się niestabilne ze względu na skłonność pompy wody do zapowietrzania się i w konsekwencji obniżenia się przepływu. Założono, że czas próbkowania będzie wynosił 1 sekundę.

Działanie regulatorów badano dla:

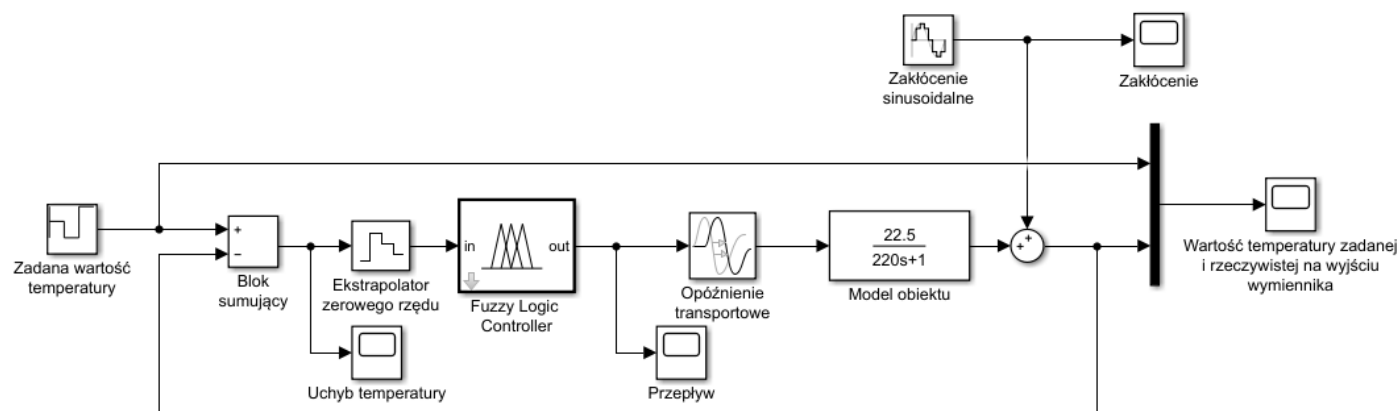
- przypadku idealnego, gdzie nie występują w obiekcie żadne zakłócenia zewnętrzne ani wewnętrzne (Rys. 4.3.),
- przypadku w którym, na wielkość wyjściową obiektu oddziałuje ciągle, zakłócenie sinusoidalne (Rys. 4.4.).

W czasie badań symulacyjnych wzięto pod uwagę przebiegi czasowe:

- wielkości wejściowych i wyjściowych regulatorów,
- odpowiedzi obiektu w porównaniu do wartości zadanej.



Rys. 4.3. Układ do badań regulatora rozmytego typu P w warunkach idealnych

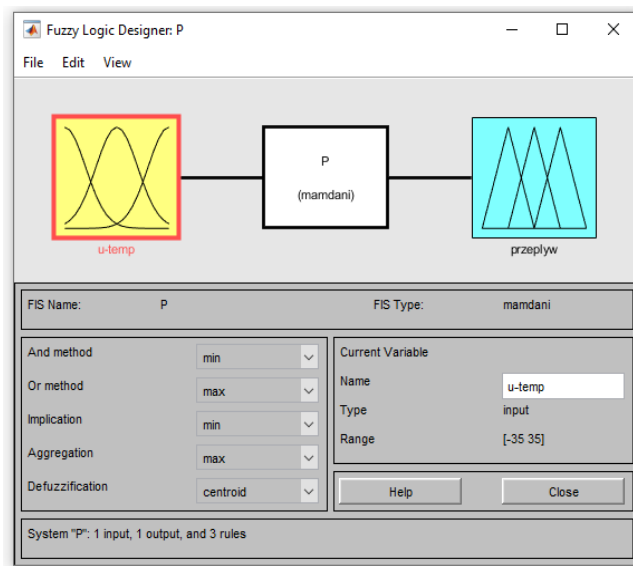


Rys. 4.4. Układ do badań regulatora rozmytego typu P z uwzględnieniem wpływu zakłóceń

4.3. Regulator rozmyty typu P podstawowy – budowa

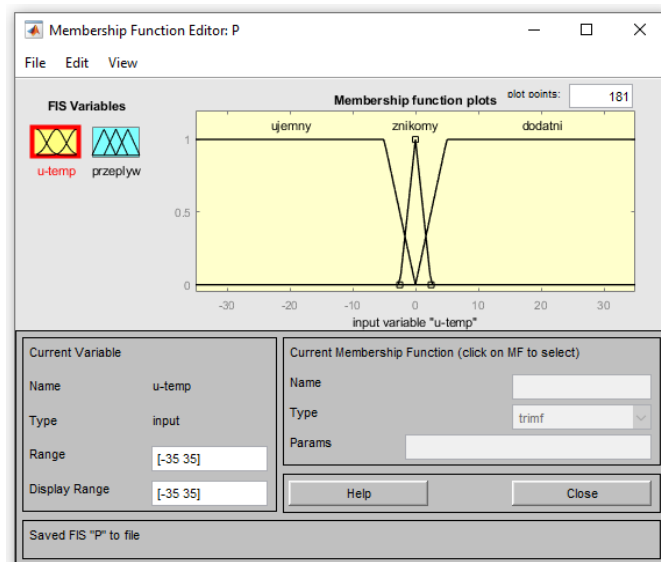
Do zbudowania regulatora rozmytego typu P w wersji podstawowej, wykorzystano przybornik programu *Matlab* o nazwie *Fuzzy Logic Toolbox*. Umożliwia on stworzenie całego systemu rozmytego, z dowolną liczbą wielkości wejściowych i wyjściowych oraz bazą reguł je wiążących.

Za pomocą bloku *Fuzzy Logic Controller*, implementowano różne zbiory rozmyte dla wielkości wejściowych i wyjściowych, aż uzyskano zadowalający efekt regulacji.



Rys. 4.5. Okno główne podstawowego regulatora rozmytego typu P

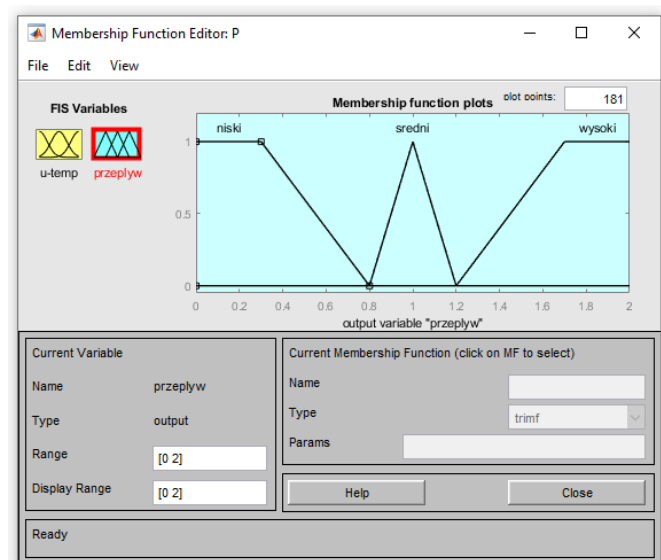
Rysunek 4.5. pokazuje główne okno stworzonego systemu rozmytego. Można na nim zaobserwować, że zaprojektowany regulator rozmyty typu P posiada jedną wielkość wejściową i jedną wielkość wyjściową. Obie wielkości reprezentowane są przez zmienne lingwistyczne o nazwach *u-temp* oraz *przepływ*. Opisują one kolejno uchyb temperatury $e(n)$ oraz przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$.



Rys. 4.6. Wielkość wejściowa podstawowego regulatora rozmytego typu P

Rysunek 4.6. pokazuje kształt trzech funkcji przynależności, opisujących zbiory rozmyte przyporządkowane do zmiennej lingwistycznej $u\text{-temp}$. Reprezentuje ona uchyb $e(n)$ będący różnicą pomiędzy wartością zadaną temperatury $T_{zad}(t)$, a wartością rzeczywistą $T_{2out}(t)$ na wyjściu obiektu. Uchyb dostarcza informacji o temperaturze wody jaka panuje na wyjściu wymiennika ciepła. Wyróżniono trzy funkcje przynależności określające wartość uchybu $e(n)$:

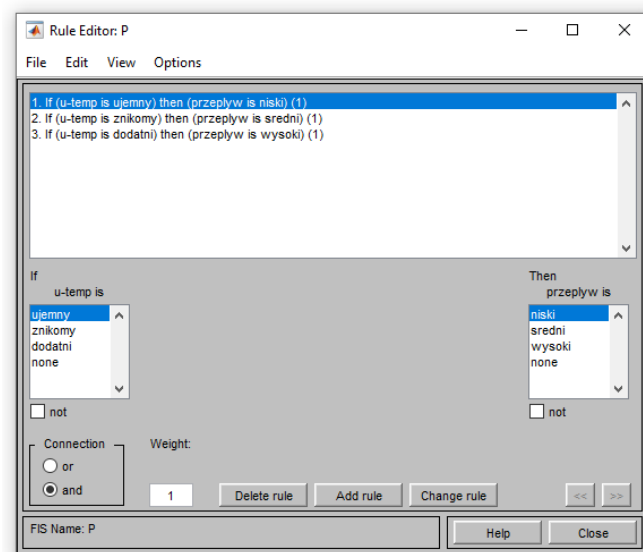
- *ujemny* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[-35 -35 -5 0]$,
- *znikomy* – funkcja trójkątna o parametrach $[-2.5 0 2.5]$,
- *dodatni* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[0 5 35 35]$.



Rys. 4.7. Wielkość wyjściowa podstawowego regulatora rozmytego typu P

Z kolei na rysunku 4.7. przedstawione są zbiory rozmyte opisujące zmienną lingwistyczną *przepływ*. Przedstawia ona wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$, jakie mogą być wymuszone przez pompę wody ogrzewającej. Odpowiednia wartość przepływu, wpływa na zmianę temperatury wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika ciepła. Przepływ $\dot{V}_1(t)$ jest opisany trzema funkcjami przynależności:

- *niski* – funkcja trapezoidalna o zakresie [0 0 0.3 0.8],
- *średni* – funkcja trójkątna o zakresie [0.8 1 1.2],
- *wysoki* – funkcja trapezoidalna o zakresie [1.2 1.7 2 2].



Rys. 4.8. Okno bazy reguł podstawowego regulatora rozmytego typu P

List. 4.1. Baza reguł podstawowego regulatora rozmytego typu P

```
If (u-temp is ujemny) then (przeplyw is niski)

If (u-temp is znikomy) then (przeplyw is sredni)

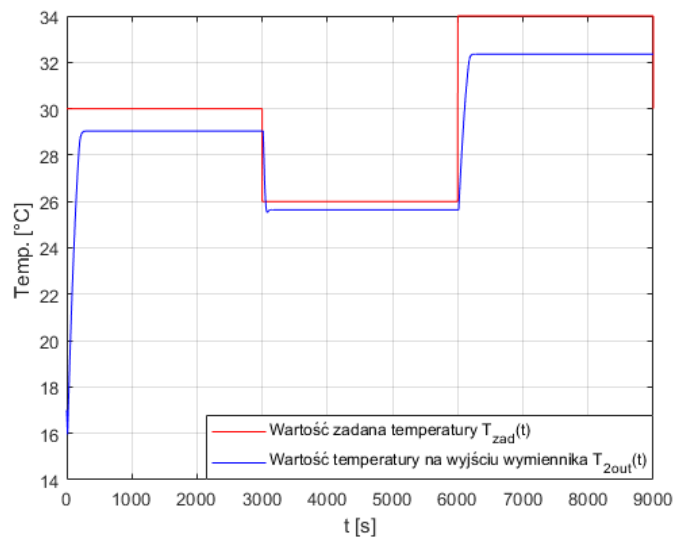
If (u-temp is dodatni) then (przeplyw is wysoki)
```

Wielkość wejściowa i wyjściowa jest ze sobą powiązana za pomocą bazy reguł. Dla przypadku podstawowego regulatora rozmytego typu P, zastosowano minimalną liczbę funkcji przynależności dla obu wielkości, a co za tym idzie baza reguł jest również prosta i zawiera trzy reguły (Rys. 4.8. i List. 4.1.).

Wszystkie reguły są ze sobą połączone za pomocą spójnika AND co oznacza, że wyznaczenie ich poziomów aktywacji odbywa się przy użyciu operacji *min*. Wykorzystanie tej operacji sprawia, że wykorzystywana jest najmniejsza wartość funkcji przynależności wejściowych zbiorów rozmytych, dla aktualnej „ostrej” wartości wejściowej x [1].

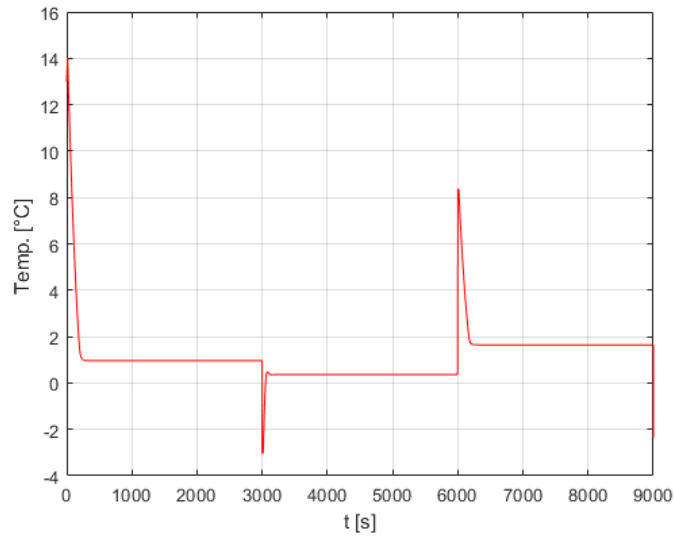
4.4. Regulator rozmyty typu P podstawowy – symulacja działania

Po zbudowaniu regulatora, rozpoczęto etap związany z symulacją jego działania, dla poszczególnych warunków pracy. Dla warunków idealnych, tzn. bez zakłóceń (Rys. 4.3.), otrzymano wyniki widoczne na rysunkach 4.9–4.11.

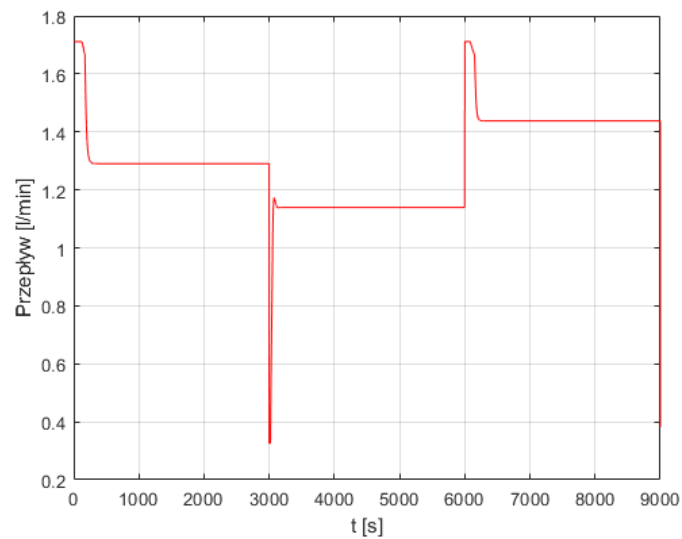


Rys. 4.9. Odpowiedź modelu obiektu na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

Analizując wykres na rysunku 4.9. można zauważyć, że zgodnie z przewidywaniami temperatura $T_{2out}(t)$, nigdy nie osiąga wartości zadanej $T_{zad}(t)$. Wynika to z cechy charakterystycznej dla regulatorów typu P, jaką jest uchyb statyczny $e_s(n)$. W przedstawionym przypadku uchyb statyczny $e_s(n)$, zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury zadanej. Jego wartość można zmniejszyć po przez zwiększenie wartości wzmocnienia K_p .

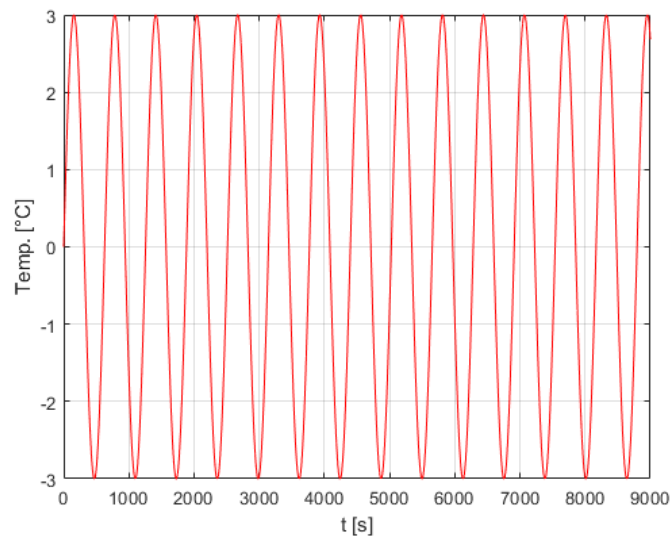
Rys. 4.10. Przebieg zmian uchybu temperatury $e(n)$

Na podstawie rysunku 4.10. można zaobserwować, występowanie uchybu $e(n)$ w miejscach gdzie różnica między wartością zadaną, a rzeczywistą w stanie ustalonym nigdy nie wynosi zero.

Rys. 4.11. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

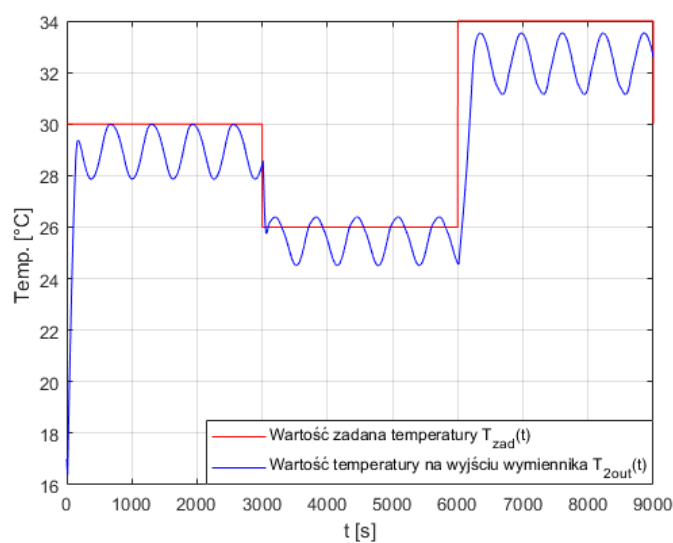
Rysunek 4.11. pokazuje jak zmieniał się sygnał sterujący, czyli wartość przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$. Dla każdej wartości temperatury zadanej $T_{zad}(t)$, dany przepływ osiągał inną wartość.

W kolejnym kroku, sprawdzono jak zachowa się układ w przypadku występowania zakłócenia (Rys. 4.4.).



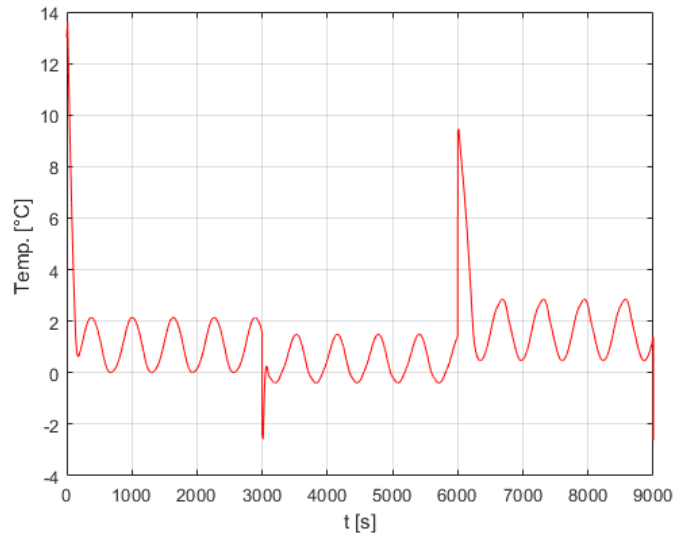
Rys. 4.12. Sygnał zakłócający reprezentujący zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$

Sygnał zakłócający wprowadzony do układu (Rys. 4.12.), ma postać przebiegu sinusoidalnego o amplitudzie wynoszącej 3 °C i okresie około 630 sekund. Ma on odzwierciedlać wpływ wielkości zakłócającej w rzeczywistym obiekcie, jaką są wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ doprowadzanej do wejścia obiegu wody ogrzewanej. Wielkość parametrów dobrano intuicyjnie w oparciu o wykresy na rysunkach 3.2 i 3.5.



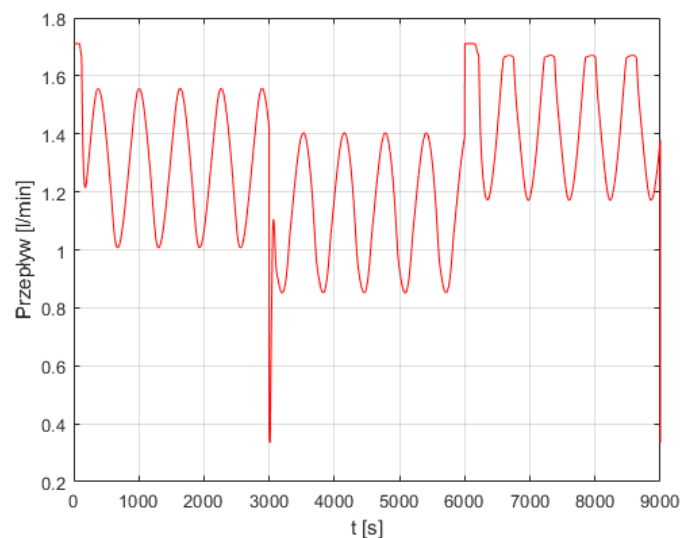
Rys. 4.13. Odpowiedź układu regulacji na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

Rysunek 4.13. przedstawia wpływ wielkości zakłócającej $T_{2in}(t)$, na temperaturę wody wyjściowej wymiennika $T_{2out}(t)$. Również w tym przypadku nie osiąga ona wartości zadanej i oscyluje wokół wartości pomniejszonych o uchyb statyczny $e_s(n)$.



Rys. 4.14. Przebieg zmian uchybu temperatury $e(n)$

Odziaływanie sinusoidalnego zakłócenia $T_{2in}(t)$ wprowadzonego do układu, można zaobserwować w zmianach uchybu temperatury $e(n)$ na rysunku 4.14. Uchyb nie jest stały, tylko zmienia się oscylacyjnie zgodnie ze zmianami zakłócenia z rysunku 4.12.

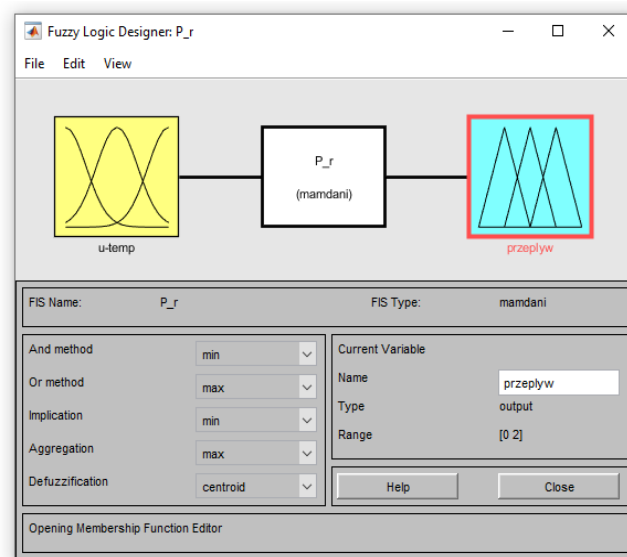


Rys. 4.15. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

Próby zniwelowania wielkości zakłócającej, widać to na rysunku 4.15., gdzie można zaobserwować charakterystyczne, sinusoidalne zmiany przepływu $\dot{V}_1(t)$.

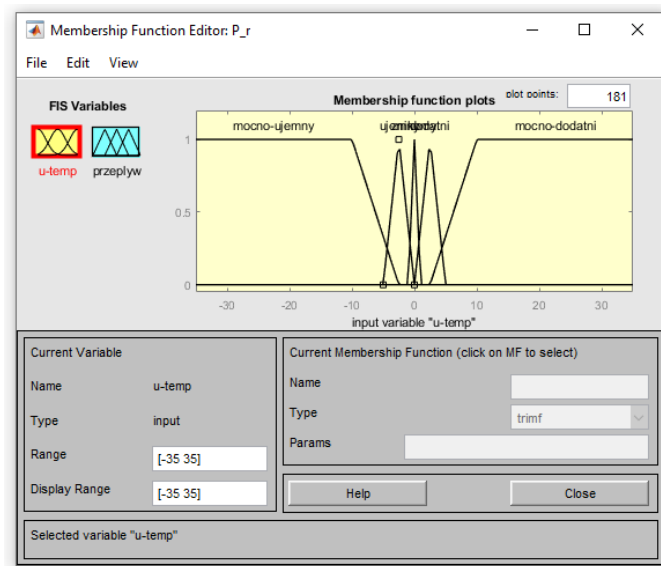
4.5. Regulator rozmyty typu P rozszerzony – budowa

Wykorzystując przybornik *Fuzzy Logic Toolbox* oraz blok *Fuzzy Logic Controller*, w podstawowym regulatorze rozmytym typu P, zwiększono liczbę funkcji przynależności i powiększono bazę reguł. Zbudowano w ten sposób „rozszerzoną” wersję regulatora rozmytego typu P.



Rys. 4.16. Okno główne rozszerzonego regulatora rozmytego typu P

Rysunek 4.16. pokazuje, że regulator rozmyty typu P w wersji rozszerzonej również posiada jedną wielkość wejściową oraz wyjściową, które są powiązane ze sobą za pomocą bazy reguł. Analogicznie jak w przypadku podstawowego regulatora przedstawionego na rysunku 4.5., wielkością wejściową jest uchyb temperatury $e(n)$ reprezentowany jest przez zmienną lingwistyczną o nazwie *u-temp*, natomiast wielkość wyjściową jest przepływ $\dot{V}_1(t)$, który jest określany przez zmienną lingwistyczną *przepływ*.

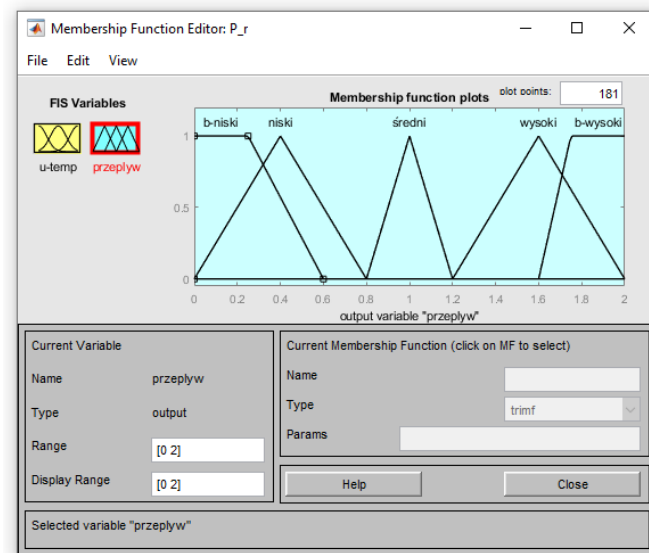


Rys. 4.17. Wielkość wejściowa rozszerzonego regulatora rozmytego typu P

Jak widać na rysunku 4.17., zmienna lingwistyczna $u\text{-temp}$ określająca uchyb temperatury $e(n)$ jest reprezentowana za pomocą pięciu funkcji przynależności:

- *mocno-ujemny* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[-35 \ -35 \ -10 \ -2.5]$,
- *ujemny* – funkcja trójkątna o parametrach $[-5 \ -2.5 \ 0]$,
- *znikomy* – funkcja trójkątna o parametrach $[-1 \ 0 \ 1]$,
- *dodatni* – funkcja trójkątna o parametrach $[0 \ 2.5 \ 5]$,
- *mocno-dodatni* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[2.5 \ 10 \ 35 \ 35]$.

Porównując liczbę funkcji przynależności z rysunkiem 4.6. można zauważyć, że dodano dwie nowe funkcje: *mocno-dodatni* oraz *mocno-ujemny*. Dokładniejsza wiedza na temat odchyłu temperatury wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu obiektu od temperatury zadanej $T_{zad}(t)$, pozwoliła na bardziej precyzyjne sterowanie wielkością wyjściową regulatora.

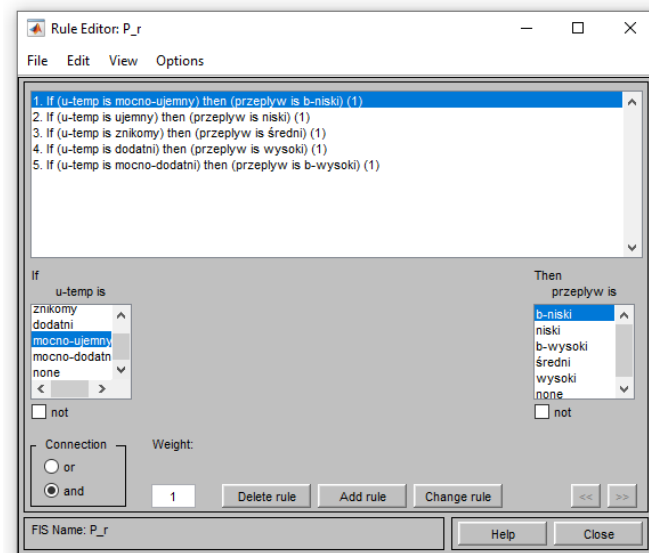


Rys. 4.18. Wielkość wyjściowa rozszerzonego regulatora rozmytego typu P

Rysunek 4.18. pokazuje wielkość wyjściową jaką jest przepływ $\dot{V}_1(t)$, wymuszony przez pompę wody ogrzewającej. Jest on reprezentowany przez zmienną lingwistyczną *przepływ* do której przyporządkowane jest pięć funkcji przynależności:

- *b-niski* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[0 \ 0 \ 0.25 \ 0.6]$,
- *niski* – funkcja trójkątna o parametrach $[0 \ 0.4 \ 0.8]$,
- *średni* – funkcja trójkątna o parametrach $[0.8 \ 1 \ 1.2]$,
- *wysoki* – funkcja trójkątna o parametrach $[1.2 \ 1.6 \ 2]$,
- *b-wysoki* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[1.6 \ 1.75 \ 2 \ 2]$.

Także w tym przypadku, po porównaniu systemu rozmytego z jego poprzednią wersją na rysunku 4.7., widać, że dodano dwie nowe funkcje określające wielkość przepływu wody ogrzewającej: *b-niski* oraz *b-wysoki*. Pozwoliło to na dokładniejsze dobranie wartości sygnału sterującego dla danej wartości sygnału uchybu $e(n)$.



Rys. 4.19. Okno bazy reguł rozszerzonego regulatora rozmytego typu P

List. 4.2. Baza reguł rozszerzonego rozmytego regulatora typu P

```

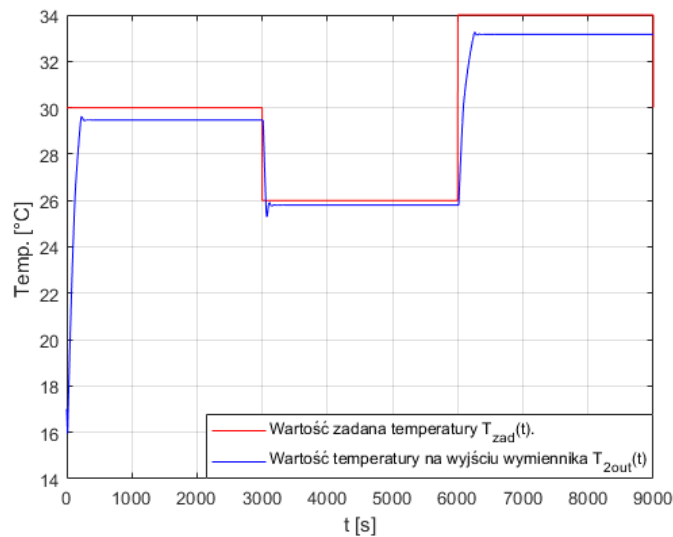
If (u-temp is mocno-ujemny) then (przepływ is b-niski)
If (u-temp is ujemny) then (przepływ is niski)
If (u-temp is znikomy) then (przepływ is średni)
If (u-temp is dodatni) then (przepływ is wysoki)
If (u-temp is mocno-dodatni) then (przepływ is b-wysoki)

```

Dzięki powiększeniu systemów rozmytych na rysunkach 4.17. i 4.18., rozszerzeniu uległa też baza reguł (Rys. 4.19. i List. 4.2.). W rozszerzonej bazie reguł pojawiły się dwie nowe reguły (List. 4.2.). Określają one zależności, znacznego uchybu temperatury $e(n)$ od bardzo wysokiego lub bardzo niskiego przepływu $\dot{V}_1(t)$. W założeniu powinno przyspieszyć to proces regulacji temperatury w początkowych chwilach, po zmianie wartości zadanej $T_{zad}(t)$ o dużą wartość.

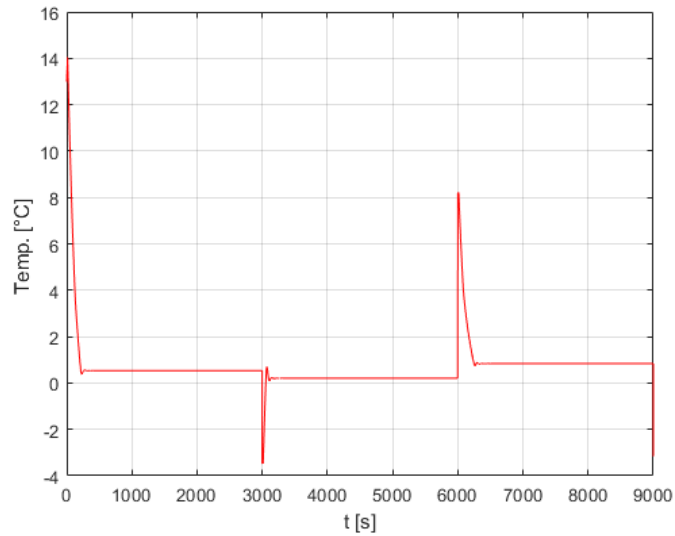
4.6. Regulator rozmyty typu P rozszerzony – symulacja działania

Tak jak w przypadku regulatora rozmytego typu P w wersji podstawowej, zbadano odpowiedź modelu dla warunków idealnych (Rys. 4.3) oraz dla przypadku występowania ciągłego, sinusoidalnego zakłócenia (Rys. 4.4.). Rysunki 4.20.–4.22. przedstawiają wyniki badań dla warunków idealnych, bez występującego zakłócenia.

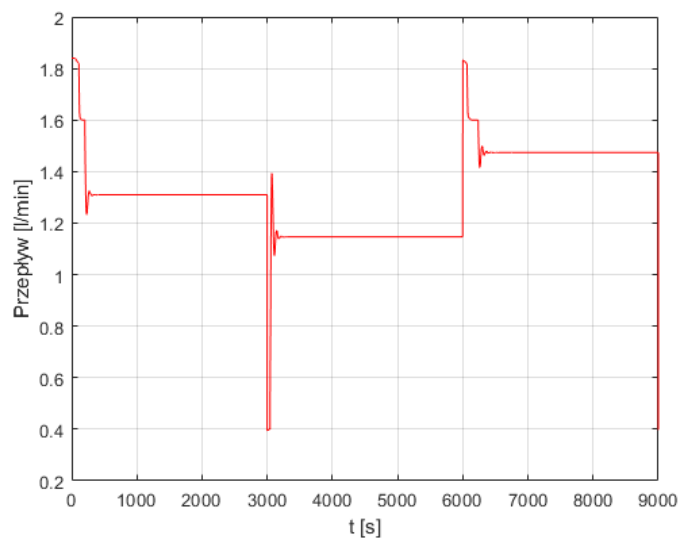


Rys. 4.20. Odpowiedź układu regulacji na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

Analizując wykres 4.20. i 4.9. można dojść do wniosku, że w przypadku rozszerzonego regulatora rozmytego typu P (Rys. 4.20.), regulacja jest widocznie lepsza niż w przypadku regulatora typu P z podstawową bazą reguł (Rys. 4.9.), ponieważ uchyb statyczny $e_s(n)$ osiąga mniejszą wartość. Wynika to prawdopodobnie z postaci bazy reguł widocznej na listingu 4.2. Powiększenie liczby reguł wpłynęło na wzrost współczynnika wzmocnienia K_p w rezultacie czego, uchyb statyczny $e_s(n)$ dla poszczególnych wartości zadanych $T_{zad}(t)$ uległ zmniejszeniu.

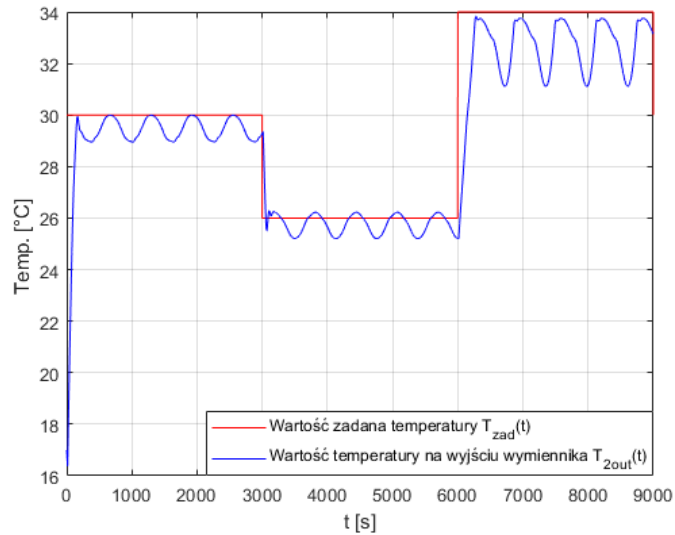
Rys. 4.21. Przebieg zmian uchybu temperatury $e(n)$

Jak można zauważyć na rysunku 4.21., uchyb temperatury $e(n)$ jest niewielki w stosunku do uchybu podstawowej wersji regulatora typu P z rysunku 4.10. Wynika z tego fakt, że powiększenie bazy reguł korzystnie wpłynęło na występujący uchyb $e(n)$, po przez zmniejszenie jego wartości.

Rys. 4.22. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

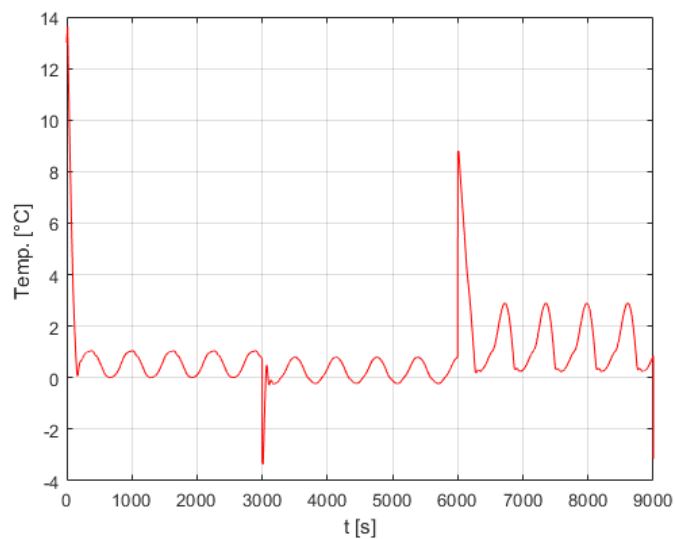
Rysunek 4.22. ukazuje jak zmieniał się przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$, czyli sygnał sterujący w czasie trwania symulacji. Widać, że dla każdej wartości temperatury zdanej $T_{zad}(t)$, mimo początkowych wahań, uzyskiwano określoną i stałą wartość przepływu.

Rozmyty regulator typu P w wersji rozszerzonej, poddano symulacji w układzie z ciągłym, sinusoidalnym zakłóceniem (Rys. 4.4.) o parametrach identycznych jak na rysunku 4.12. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunkach 4.23.–4.25.



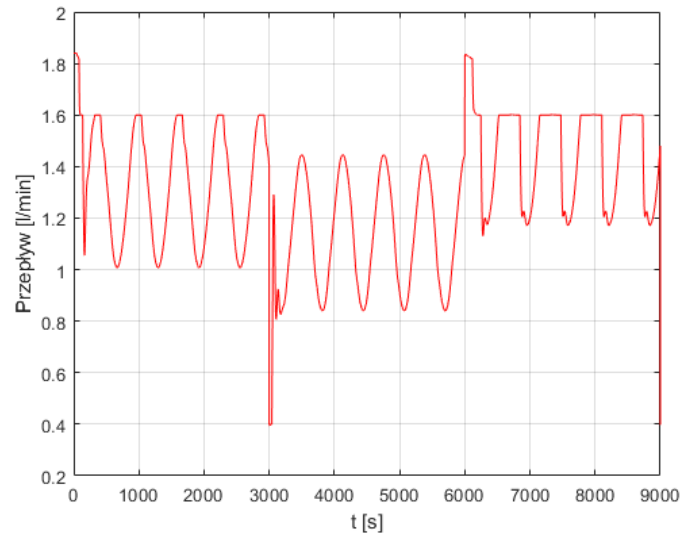
Rys. 4.23. Odpowiedź układu regulacji na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

Na rysunku 4.23. można zauważyć, że pomimo rozszerzenia bazy reguł i zwiększenia liczby funkcji przynależności nie udało się całkowicie wyeliminować wpływu zakłóceń. Jednak w porównaniu z rysunkiem 4.13. zmiany temperatury $T_{2out}(t)$ dla dwóch pierwszych punktów pracy są mniejsze i oscylują wokół wartości bliższych temperatur zadanych $T_{zad}(t)$. Zatem można powiedzieć, że rozszerzony regulator rozmyty typu P jest bardziej odporny na zakłócenia, niż jego wersja podstawowa.



Rys. 4.24. Przebieg zmian uchybu temperatury $e(n)$

Rysunek 4.24. przedstawia zmianę wielkości wejściowej regulatora, czyli zmianę uchybu temperatury $e(n)$. Jak można zaobserwować, uchyb $e(n)$ zmienia się oscylacyjnie i tylko w krótkich momentach osiąga wartość zerową.



Rys. 4.25. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

Widoczny na rysunku 4.25. przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ (sygnał sterujący), wymuszony przez pompę wody, zmienia się oscylacyjnie. Jest to spowodowane wpływem oscylacyjnych zakłóceń $T_{2in}(t)$ i próbą zrekompensowania ich wpływu.

4.7. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych nad regulatorami rozmytymi typu P, można dojść do wniosku, że zwiększenie liczby funkcji przynależności oraz powiększenie bazy reguł, poprawia jakość regulacji oraz zwiększa odporność układu na zakłócenia zewnętrzne.

Można to stwierdzić na podstawie zmniejszenia się wartości uchybu $e(n)$ oraz mniejszych oscylacji temperatury $T_{2out}(t)$ na wyjściu obiektu, dla regulatora z powiększoną bazą reguł. Mniejsza wartość uchybu $e(n)$ jest powiązana ze wzrostem wzmocnienia K_p , którego wielkość można regulować za pomocą liczby reguł zaimplementowanych w bazie wiedzy.

5. Projektowanie rozmytych regulatorów typu PI

Za pomocą przybornika *Fuzzy Logic Toolbox*, zaprojektowano dwa dyskretne regulatory rozmyte typu PI. Zgodnie z ich opisem matematycznym, wielkościami wejściowymi są: uchyb temperatury $e(n)$ oraz przyrost uchybu $\Delta e(n)$. Z kolei wielkością wyjściową jest zmiana przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$ o pewną wartość. W czasie projektowania regulatorów rozmytych typu PI, zbadano wpływ zmiany kształtu funkcji przynależności oraz postaci bazy reguł na jakość regulacji.

5.1. Podstawowe informacje

Regulator typu PI w porównaniu do regulatora typu P zawiera dodatkową część całkującą, która eliminuje uchyb statyczny $e_s(n)$ w układzie. Ten typ regulatora w wersji dyskretnej można opisać wzorem [4]:

$$\Delta u(n) = K_p \left(\frac{\Delta e(n)}{T_s} + \frac{1}{T_i} e(n) \right) \quad (5.1)$$

gdzie,

$\Delta u(n)$ – zmiana sygnału sterującego o pewną dyskretną wartość,

K_p – współczynnik wzmocnienia regulatora,

$e(n)$ – dyskretna wartość uchybu regulacji,

$\Delta e(n)$ – dyskretny przyrost sygnału uchybu równy $e(n) - e(n - 1)$,

T_s – okres próbkowania,

T_i – czas zdwojenia.

Regulator PI (wzór 5.1) przekształcony do postaci regulatora rozmytego, nazywanego także regulatorem przyrostowym opisywany jest następującą zależnością [4]:

$$U(n) = \sum_{j=1}^n (f_p(GE \cdot e(j), GCE \cdot \dot{e}(j)) \cdot GCU \cdot T_s) \quad (5.2)$$

gdzie,

$U(n)$ – dyskretna wartość sygnału sterującego równa sumie wszystkich jej przyrostów,

$e(j)$ – dyskretna wartość uchybu regulacji w danej chwili czasowej,

$\dot{e}(j)$ – dyskretny przyrost wartości uchybu w danej chwili czasowej,

GE – wartość wzmocnienia sygnału uchybu,

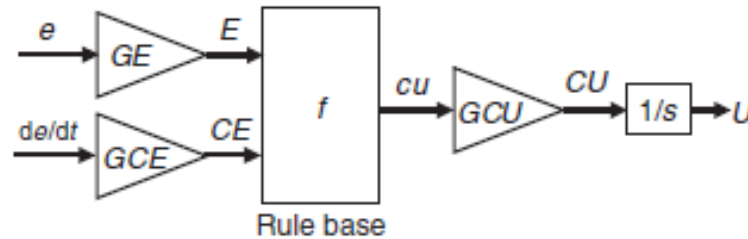
GCE – wartość wzmocnienia sygnału przyrostu uchybu,

GCU – wartość wzmocnienia sygnału sterującego,

T_s – okres próbkowania.

Znak sumy na początku równania 5.2 zapewniający sumowanie kolejnych obliczonych wartości sygnału $U(n)$ wynika z obecności członu całkującego w regulatorze, ponieważ całkowanie jest wykonywane metodą sumowania kolejnych pól prostokątów.

Strukturę regulatora rozmytego typu PI można zilustrować za pomocą schematu na rysunku 5.1. Jak można zauważyć, regulator posiada aż trzy wielkości składające się na całkowite wzmocnienie regulatora K_p . Małymi literami oznaczono wielkości przed wzmocnieniem, a wielkimi opisano je po wzmocnieniu. Sygnał wyjściowy po wzmocnieniu w bloku GCU podlega całkowaniu w członie $1/s$.



Rys. 5.1. Struktura regulatora rozmytego typu PI [4]

Przyjmując, że rozpatrywany regulator rozmyty typu PI jest liniowy, można dokonać jego aproksymacji zgodnie z następującym założeniem [4]:

$$U(n) \approx \sum_{j=1}^n (GE \cdot e(j), GCE \cdot \dot{e}(j)) \cdot GCU \cdot T_s. \quad (5.3)$$

W rezultacie, po przekształceniu wzoru 5.3. otrzymuje się zależność w postaci [4]:

$$U(n) = GCE \cdot GCU \cdot \left[\frac{GE}{GCE} \sum_{j=1}^n (e(j) \cdot T_s) + e(n) \right]. \quad (5.4)$$

Uproszczony wzór 5.4 opisujący działanie regulatora rozmytego typu PI, umożliwia wyznaczenie parametrów takich jak wzmocnienie regulatora K_p oraz czas całkowania (zdwojenia) T_i za pomocą zależności [4]:

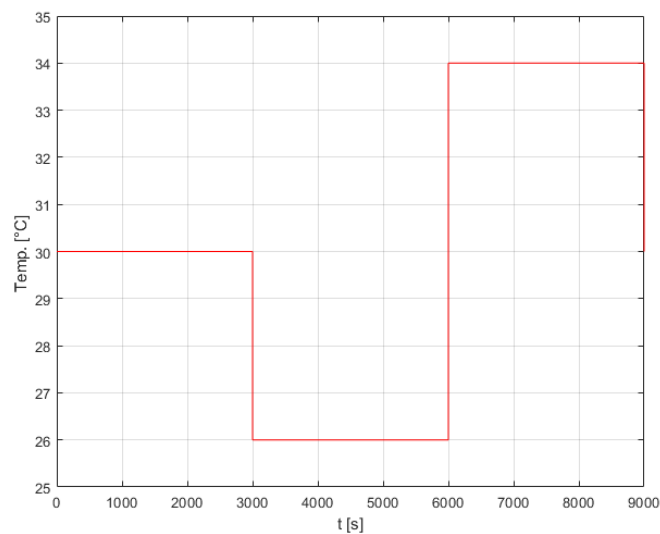
$$GCE \cdot GCU = K_p, \quad (5.5)$$

$$\frac{GE}{GCE} = \frac{1}{T_i}. \quad (5.6)$$

Wyznaczone za pomocą wzorów 5.5 i 5.6 wzmocnienie oraz czas całkowania są wartościami przybliżonymi, wykorzystywanymi dla celów projektowych kiedy to zakłada się liniowość regulatora rozmytego, podczas gdy rzeczywiste regulatory rozmyte są nieliniowe [4].

5.2. Założenia projektowe

Podobnie jak w przypadku regulatorów rozmytych typu P, regulatorom rozmytym typu PI w czasie działania symulacji, zadano trzy temperatury $T_{zad}(t)$ o wartościach i czasach trwania widocznych na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Zmiany temperatury zadanej $T_{zad}(t)$

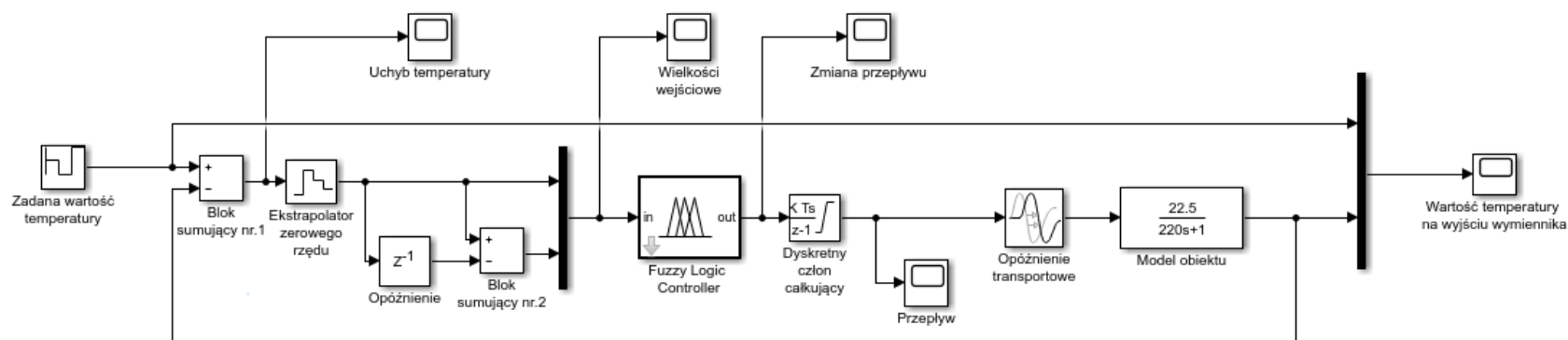
Analogicznie jak w przypadku regulatora rozmytego typu P, maksymalny przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ ograniczono do 2 l/min. Okres próbkowania wynosił 1 sekundę.

Działanie regulatorów badano dla:

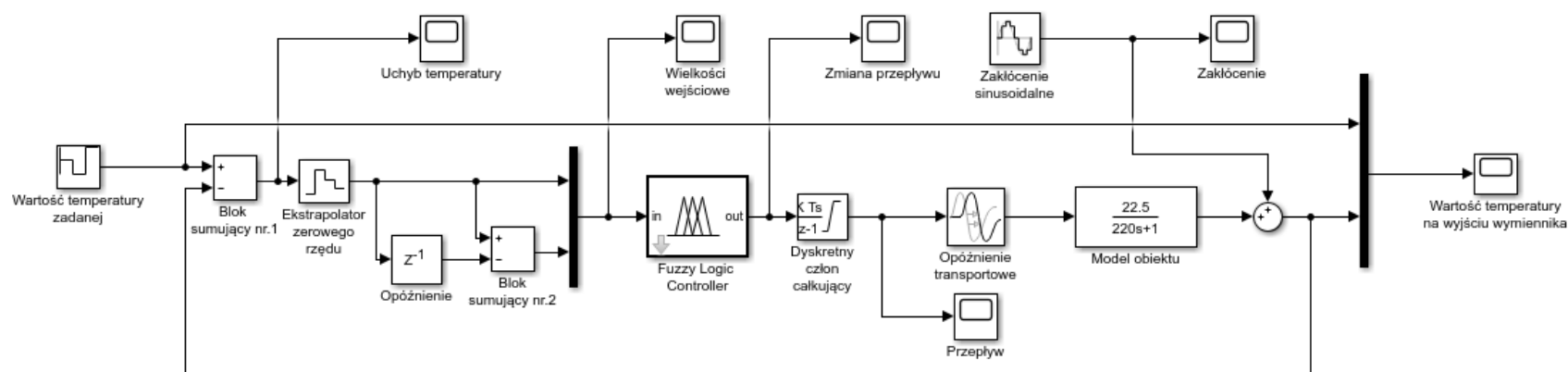
- warunków idealnych, w których nie występują żadne rodzaje zakłóceń (Rys. 5.3.),
- warunków w których, na wielkość wyjściową obiektu oddziałuje ciągłe zakłócenie sinusoidalne (Rys. 5.4.).

W czasie badań symulacyjnych, analogicznie jak dla regulatorów rozmytych typu P, brano po uwagę przebiegi czasowe:

- wielkości wejściowych i wyjściowych regulatorów,
- odpowiedzi obiektu w porównaniu do wartości zadanej.



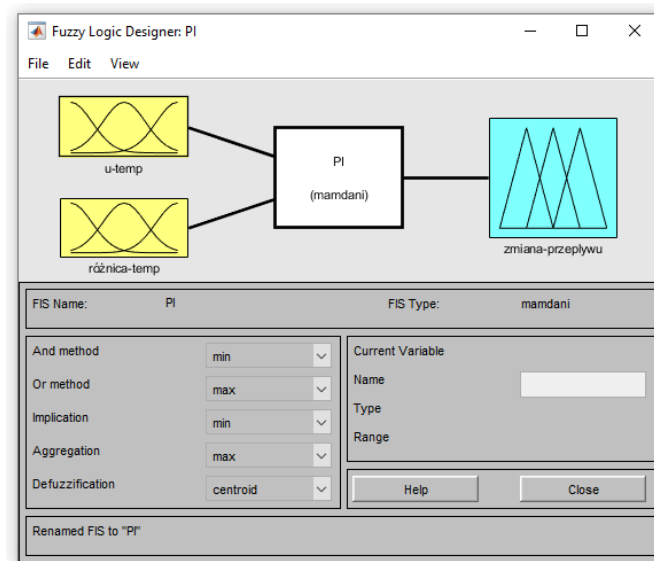
Rys. 5.3. Układ do badań regulatora rozmytego typu PI w warunkach idealnych



Rys. 5.4. Układ do badań regulatora rozmytego typu PI z uwzględnieniem wpływu zakłóceń

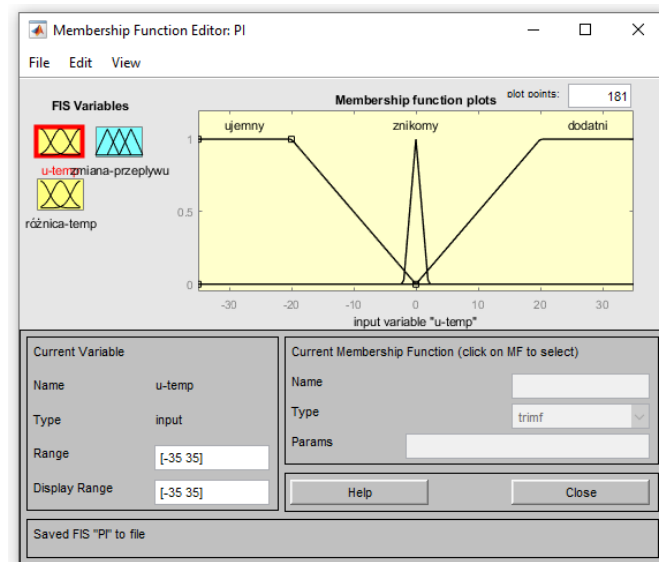
5.3. Regulator rozmyty typu PI podstawowy – budowa

Wykorzystując blok *Fuzzy Logic Controller* dostępny w przyborniku *Fuzzy Logic Toolbox*, zgodnie z założeniami zbudowano podstawowy regulator rozmyty typu PI o eksperymentalnie dobranej liczbie funkcji przynależności i reguł. Podstawowy regulator wykorzystuje funkcje przynależności o kształcie trójkątnym oraz trapezoidalnym. Natomiast baza reguł wiąże wielkości za pomocą spójników AND.



Rys. 5.5. Okno główne podstawowego regulatora rozmytego typu PI

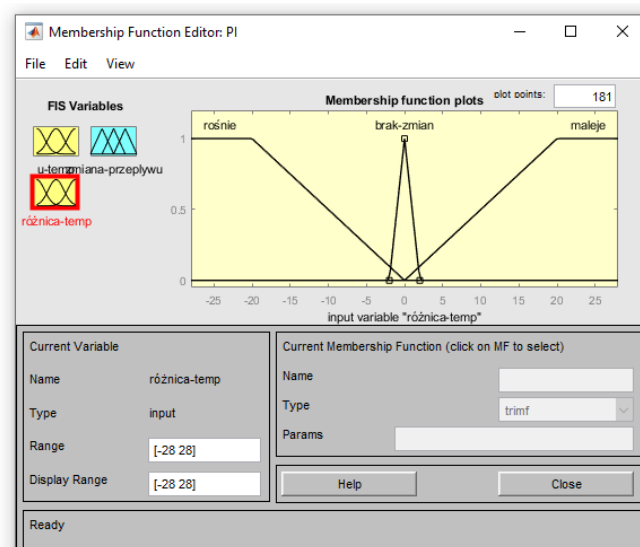
Na rysunku 5.5. widać okno główne zbudowanego regulatora. Zgodnie z założeniami, regulator posiada dwie wielkości wejściowe oraz jedną wielkość wyjściową, które są ze sobą powiązane za pomocą bazy reguł. Wielkości wejściowe są reprezentowane przez zmienne lingwistyczne *u-temp* oraz *różnica-temp.*, opisujące odpowiednio uchyb temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$. Natomiast wielkość wyjściowa jest opisywana przez zmienną lingwistyczną *zmiana-przepływu* reprezentującą jego przyrost o pewną wartość. Wartość przepływu $\dot{V}_1(t)$ jest równa sumie wszystkich jego zmian, zgodnie ze wzorem 5.2.



Rys. 5.6. Funkcje przynależności dla zmiennej lingwistycznej *u-temp* podstawowego regulatora rozmytego typu PI

Rysunek 5.6. pokazuje pierwszą wielkość wejściową regulatora rozmytego typu PI, jaką jest uchyb temperatury $e(n)$ reprezentowany przez zmienną lingwistyczną *u-temp*. Tak jak w przypadku regulatora typu P, pokazuje ona różnice pomiędzy wartością zadaną temperatury $T_{zad}(t)$, a temperaturą rzeczywistą wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu obiektu. Dany system rozmyty, składa się z trzech funkcji przynależności:

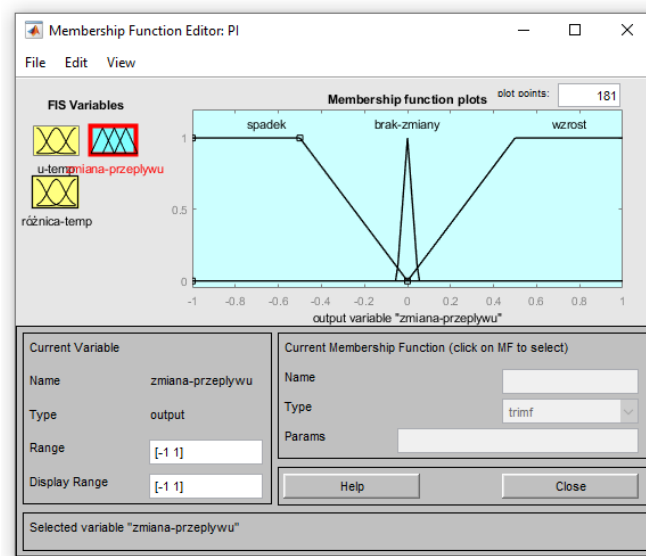
- *ujemny* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[-35 -35 -20 0]$,
- *znikomy* – funkcja trójkątna o parametrach $[-2 0 2]$,
- *dodatni* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[0 20 35 35]$.



Rys. 5.7. Funkcje przynależności dla zmiennej lingwistycznej *różnica-temp* podstawowego regulatora rozmytego typu PI

Z kolei na rysunku 5.7. można zobaczyć drugą wielkość wejściową, opisywaną przez zmienną lingwistyczną *różnica-temp*. Reprezentuje on przyrost uchybu temperatury $\Delta e(n)$ jaki nastąpił w ciągu 1 sekundy. Na jego podstawie można ocenić czy temperatura na wyjściu wymiennika rośnie, maleje bądź pozostaje bez zmian. Zbudowany system rozmyty składa się z trzech funkcji przynależności:

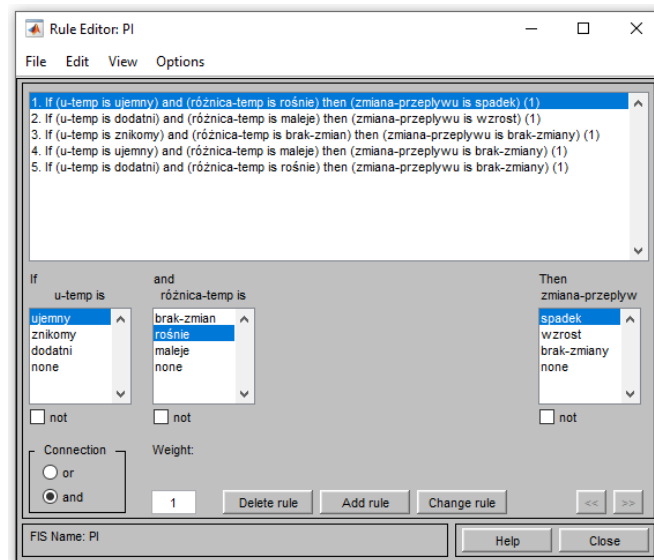
- *rośnie* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[-28 \ -28 \ -20 \ 0]$,
- *brak-zmian* – funkcja trójkątna o parametrach $[-2 \ 0 \ 2]$,
- *maleje* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[0 \ 20 \ 28 \ 28]$.



Rys. 5.8. Wielkość wyjściowa podstawowego regulatora rozmytego typu PI

Rysunek 5.8. pokazuje system rozmyty, prezentujący wielkość wyjściową regulatora rozmytego typu PI, reprezentowaną przez zmienną lingwistyczną *zmiana-przepływu*. Opisuje ona przyrosty przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$. Dzięki temu, wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$ nie znajdują się w sztywnych granicach, tak jak w przypadku regulatora rozmytego typu P. Zmiana przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$ jest reprezentowana za pomocą trzech funkcji przynależności:

- *spadek* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[-1 \ -1 \ -0.5 \ 0]$,
- *brak-zmiany* – funkcja trójkątna o parametrach $[-0.05 \ 0 \ 0.05]$,
- *wzrost* – funkcja trapezoidalna o parametrach $[0 \ 0.5 \ 1 \ 1]$.



Rys. 5.9. Okno bazy reguł podstawowego regulatora rozmytego typu PI

Na rysunku 5.9. można zobaczyć, w jaki sposób powiązано ze sobą poszczególne wielkości wejściowe oraz wyjściowe w wyniku czego stworzono bazę reguł.

List. 5.1. Baza reguł regulatora rozmytego typu PI podstawowego

```
If (u-temp is ujemny) and (róznica-temp is rośnie) then
(zmiana-przepływu is spadek)
```

```
If (u-temp is dodatni) and (róznica-temp is maleje) then
(zmiana-przepływu is wzrost)
```

```
If (u-temp is znikomy) and (róznica-temp is brak-zmian)
then (zmiana-przepływu is brak-zmiany)
```

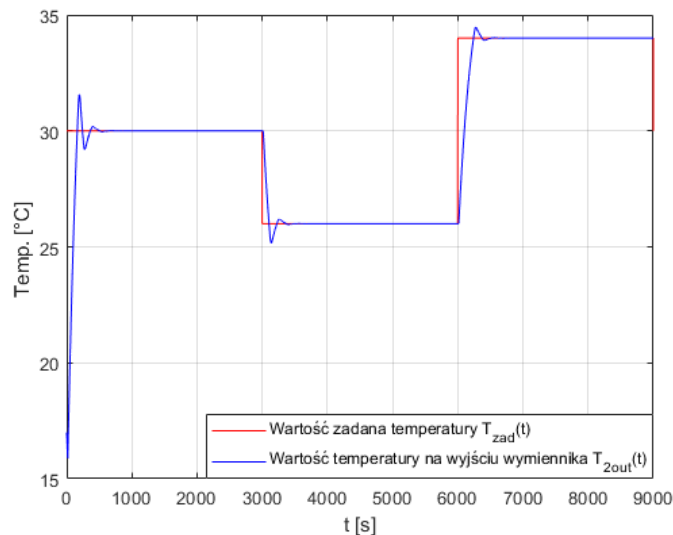
```
If (u-temp is ujemny) and (róznica-temp is maleje) then
(zmiana-przepływu is brak-zmiany)
```

```
If (u-temp is dodatni) and (róznica-temp is rośnie) then
(zmiana-przepływu is brak-zmiany)
```

Jak można zauważyć na listingu 5.1. wszystkie reguły wykorzystują spójnik AND, czyli przy wyznaczaniu ich poziomów aktywacji wykorzystywana jest funkcja *min* [1].

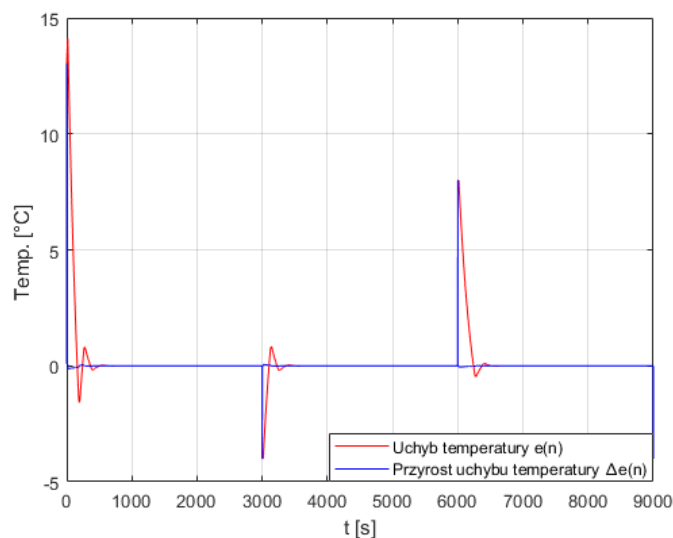
5.4. Regulator rozmyty typu PI podstawowy – symulacja działania

Zaprojektowany regulator rozmyty typu PI, poddano badaniom symulacyjnym. Początkowo zbadano działanie regulatora w układzie bez zewnętrznych zakłóceń znajdującym się na rysunku 5.3. Wyniki symulacji podano na rysunkach 5.10.–5.13.



Rys. 5.10. Odpowiedź układu regulacji na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

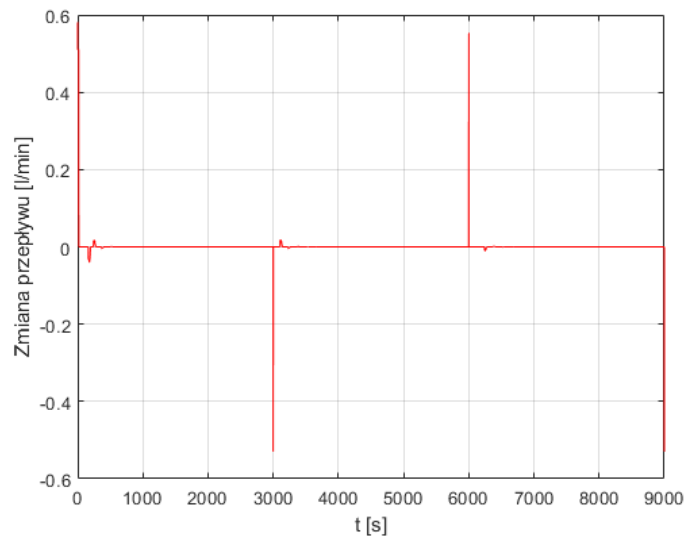
Rysunek 5.10. pokazuje, że regulator rozmyty typu PI w wersji podstawowej, bardzo dobrze radzi sobie z regulacją temperatury $T_{2out}(t)$ na wyjściu obiektu. Temperatura jest szybko stabilizowana na zadanym poziomie, przy niewielkich początkowych oscylacjach oraz braku uchybu statycznego $e_s(n)$ w stanach ustalonych.



Rys. 5.11. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$

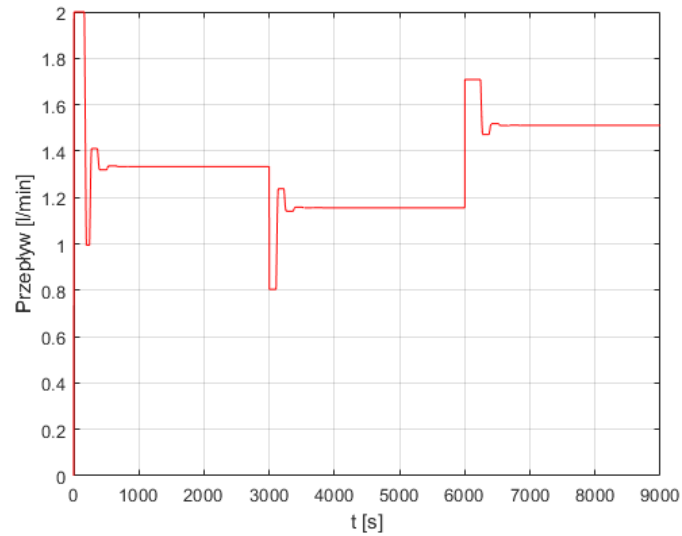
Na rysunku 5.11. można zauważyć, jak zmieniały się wielkości wejściowe regulatora rozmytego typu PI. Uchyb temperatury $e(n)$ szybko osiągał wartość zerową, co jest cechą charakterystyczną regulatorów z członem całkującym.

Przyrost uchybu $\Delta e(n)$, również bardzo szybko osiąga wartość bliską zera. Jednak odgrywa on swoją rolę jedynie w pierwszej sekundzie, po zmianie temperatury zadanej $T_{zad}(t)$. W późniejszym etapie uchyb $e(n)$ zmienia się w ciągu jednej jednostki czasu, o tak małą wartość, że jest to klasyfikowano jako brak zmiany uchybu. Pomimo pozornego braku wpływu na jakość regulacji, przyrost uchybu $\Delta e(n)$ jest niezbędny do prawidłowego działania regulatora ponieważ, w przypadku usunięcia tej wielkości lub zainicjowania ją wartością zerową, regulator przestaje prawidłowo działać.



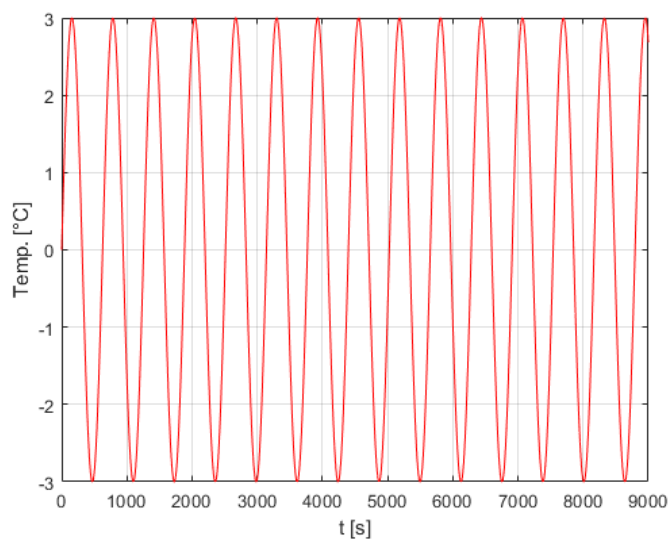
Rys. 5.12. Przyrosty przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$

Na rysunku 5.12. można zobaczyć, wielkość wyjściową regulatora rozmytego typu PI jaką jest zmiana przepływu wody $\Delta \dot{V}_1(t)$. Przyrosty w danych chwilach czasowych mają charakter impulsowy i są wyznaczone w oparciu o aktualny uchyb temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$. Największe wartości osiągają w chwilach zmiany temperatury zadanej $T_{zad}(t)$.

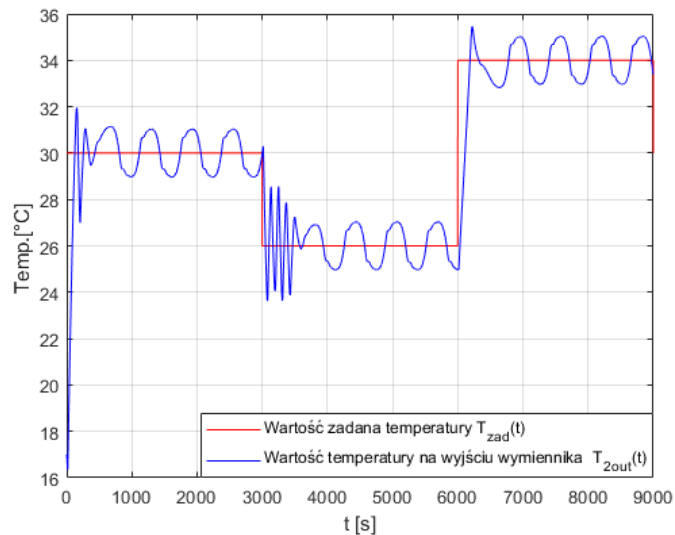
Rys. 5.13. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

Przyrosty $\Delta\dot{V}_1(t)$ po scałkowaniu znalazły odzwierciedlenie na rysunku 5.13., gdzie w bezpośredni sposób wpływają na wartości przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$. Dzięki temu, przepływ $\dot{V}_1(t)$ po zmianach temperatur zadanych jest wyznaczany o wiele dokładniej niż miało to miejsce dla przypadku regulatorów rozmytych typu P.

Kolejnych krokiem było zbadanie działania regulatora przy występowaniu zakłócenia, za pomocą układu znajdującego się na rysunku 5.4. Przebiegi odpowiednich wielkości czasowych pokazano na rysunkach 5.14.–5.18.

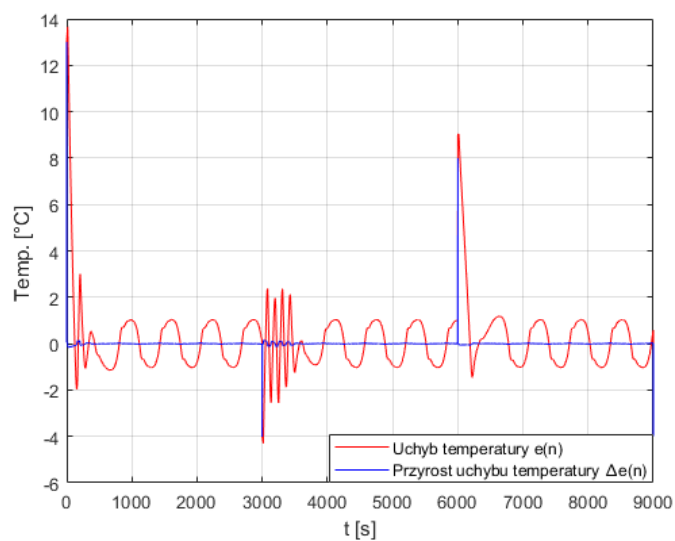
Rys. 5.14. Sygnał zakłócający reprezentujący zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$

Zakłócenie pokazane na rysunku 5.14. podobnie jak w przypadku badań regulatora rozmytego typu P (Rys. 4.12.) ma charakter ciągły i sinusoidalny o amplitudzie 3 °C i okresie około 630 sekund. Również w tym przypadku, ma ono imitować wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$.



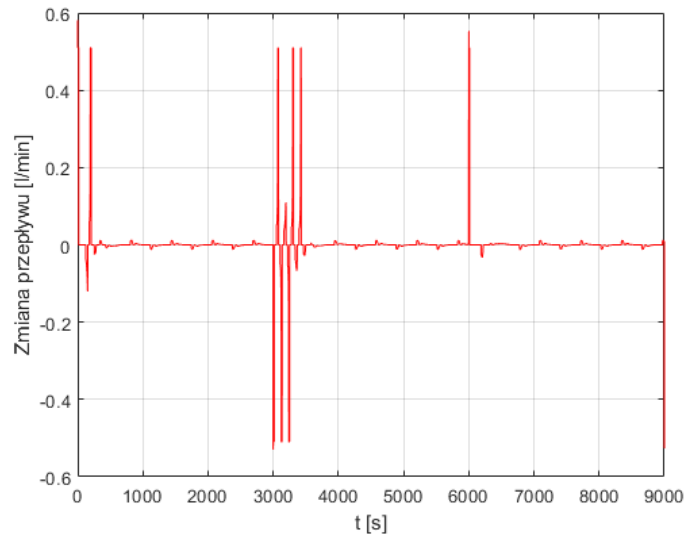
Rys. 5.15. Odpowiedź układu regulacji na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

Rysunek 5.15. pokazuje jak zmieniała się wartość temperatury $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika w stosunku do temperatury zadanej $T_{zad}(t)$. Można zauważyć, że na skutek oddziaływania wielkości zakłócającej $T_{2in}(t)$ (Rys. 5.14.), temperatura na wylocie wymiennika ciepła oscyluje wokół wartości zadanej.



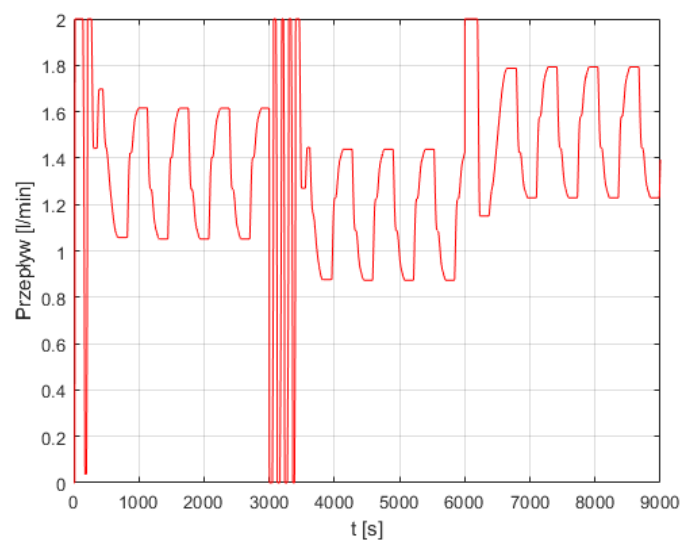
Rys. 5.16. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$

Występujące zakłócenie, powoduje oscylacje uchyb temperatury $e(n)$ co można zobaczyć na rysunku 5.16. Przyrost uchybu $\Delta e(n)$, w większości chwil czasowych jest bardzo bliski zeru.



Rys. 5.17. Przyrosty przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$

Na rysunku 5.17. widać wartości zmian przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$. Podobnie jak w przypadku badań regulatora dla układu bez zakłóceń (Rys. 5.12.) mają one charakter impulsowy z tą różnicą, że niewielkie przyrosty przepływu występują również okresowo zgodnie z zmianami wielkości zakłócającej $T_{2in}(t)$. Scałkowanie tych wartości, pozwoliło na uzyskanie określonych wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$ (Rys. 5.18.).

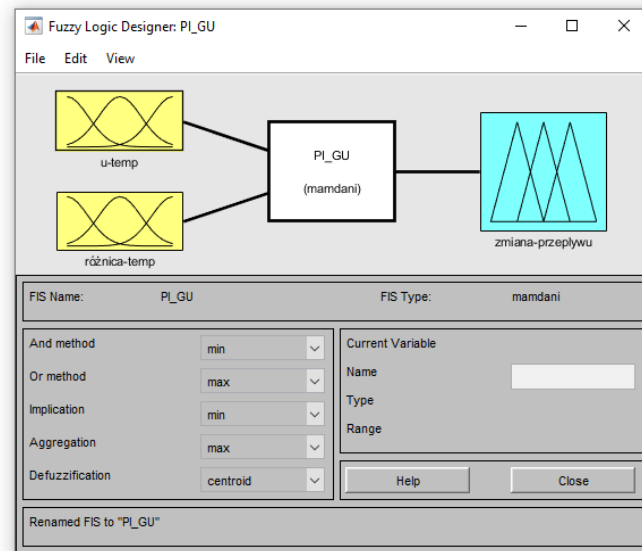


Rys. 5.18. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

Z kolei na rysunku 5.18. można już zaobserwować konkretne wartości przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$, która zmieniają się w sposób oscylacyjny, co jest przyczyną oscylacji temperatury wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika ciepła (Rys. 5.16.).

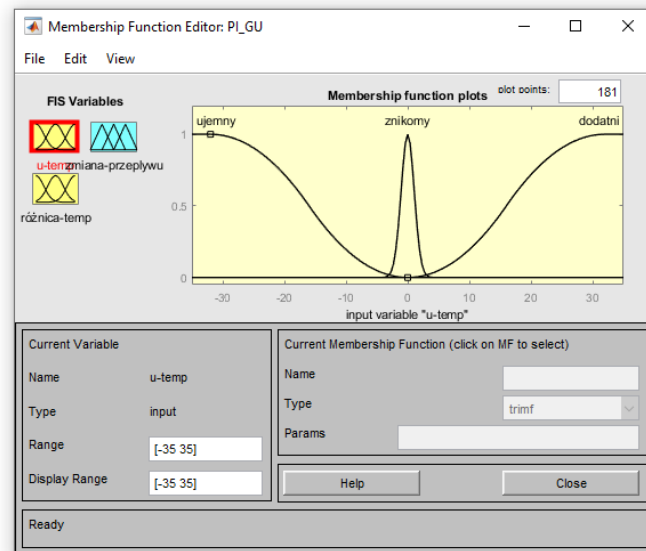
5.5. Regulator rozmyty typu PI zmodyfikowany – budowa

Wykorzystując zbudowany regulator rozmyty typu PI w wersji podstawowej, dokonano w nim modyfikacji funkcji przynależności oraz bazy reguł. Modyfikacje polegały na tym, że zmieniono kształt części systemów rozmytych z funkcji „ostrych” takich jak funkcja trapezoidalna oraz trójkątna na funkcje o przebiegu „łagodnym” np.: funkcja Gaussa. Natomiast modyfikacja bazy reguł, obejmowała zmianę w niektórych regułach, spójnika AND na spójnik OR.



Rys. 5.19. Okno główne zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI

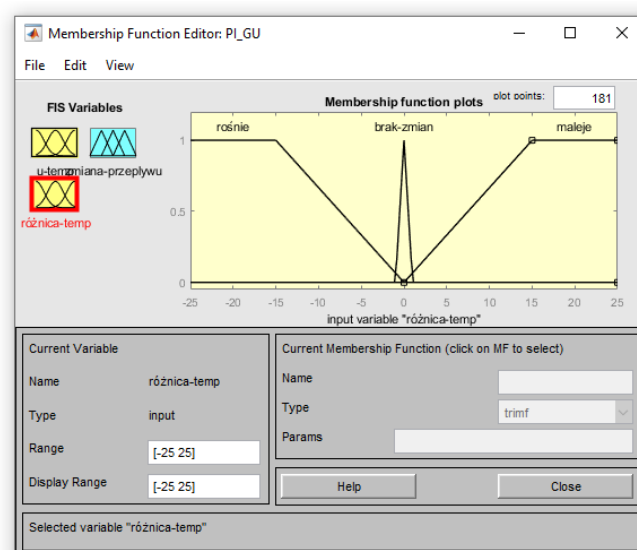
Rysunek 5.19. przedstawia zmodyfikowany regulator rozmyty typu PI. Jak można zauważyć liczba oraz rodzaj wielkości wejściowych i wyjściowych w stosunku do regulatora w wersji podstawowej pozostała bez zmian. Wielkości wejściowe są reprezentowane przez zmienne lingwistyczne $u-temp$ oraz $różnica-temp$ opisujące odpowiednio uchyb temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$. Natomiast wielkością wyjściową jest zmiana przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$.



Rys. 5.20. Funkcje przynależności dla zmiennej lingwistycznej $u\text{-temp}$ zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI

Rysunek 5.20. przedstawia, wielkość wejściową danego regulatora rozmytego reprezentowaną przez zmienną lingwistyczną $u\text{-temp}$ jaką jest uchyb temperatury $e(n)$. Jak można zauważyć w porównaniu do wersji podstawowej regulatora typu PI (Rys. 5.6.), zmieniono kształt funkcji przynależności:

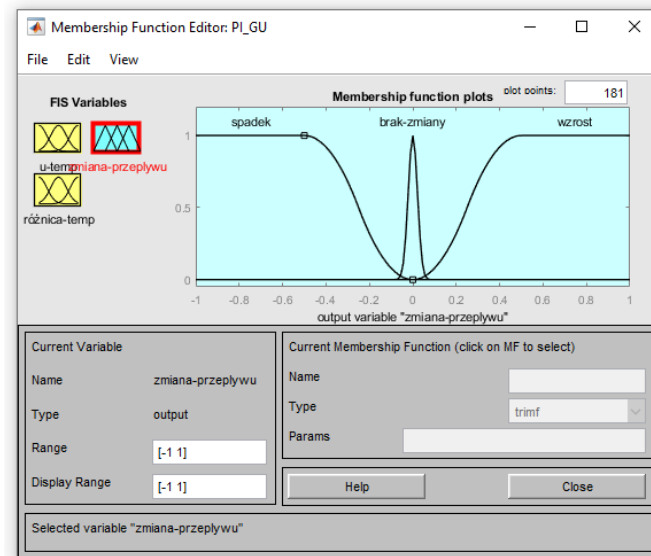
- $ujemny$ – funkcja z-kształtna o parametrach $[-32\ 0]$,
- $znikomy$ – funkcja Gaussa o parametrach $[1.062\ -2.776e-17]$,
- $dodatni$ – funkcja s-kształtna o parametrach $[0\ 32]$.



Rys. 5.21. Funkcje przynależności dla zmiennej lingwistycznej $różnica\text{-temp}$ zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI

Na rysunku 5.21. znajdują się funkcje przynależności, reprezentujące zmienną lingwistyczną *różnica-temp*, określającą przyrost uchybu temperatury $\Delta e(n)$. W tym wypadku nie zmieniono ich kształtu, a jedynie ustalono inne zakresy:

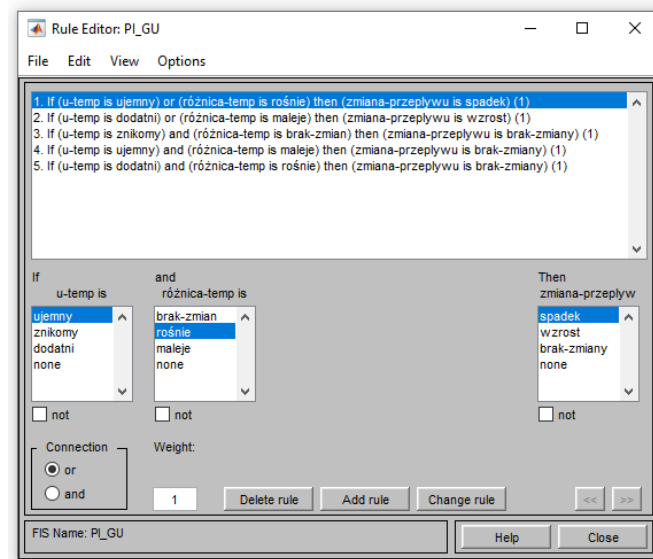
- *rośnie* – funkcja trapezoidalna o parametrach [-25 -25 -15 0],
- *brak-zmian* – funkcja trójkątna o parametrach [-1 0 1],
- *maleje* – funkcja trapezoidalna o parametrach [0 15 25 25].



Rys. 5.22. Wielkość wyjściowa zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI

Rysunek 5.22. pokazuje zmienną lingwistyczną *zmiana-przeplywu* reprezentującą przyrosty przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$ na wyjściu regulatora. Analogicznie jak w wersji podstawowej regulatora typu PI (Rys. 5.8.) jest ona opisywana przez trzy funkcje przynależności o zmienionym kształcie:

- *spadek* – funkcja z-kształtna o parametrach [-0.5 0],
- *brak-zmiany* – funkcja Gaussa o parametrach [0.02123 0],
- *wzrost* – funkcja s-kształtna o parametrach [0 0.5].



Rys. 5.23. Okno bazy reguł zmodyfikowanego rozmytego regulatora typu PI

List. 5.2. Baza reguł regulatora rozmytego typu PI zmodyfikowanego

If (u-temp is ujemny) or (różnica-temp is rośnie) then
(zmiana-przepływu is spadek)

If (u-temp is dodatni) or (różnica-temp is maleje) then
(zmiana-przepływu is wzrost)

If (u-temp is znikomy) and (różnica-temp is brak-zmian)
then (zmiana-przepływu is brak-zmiany)

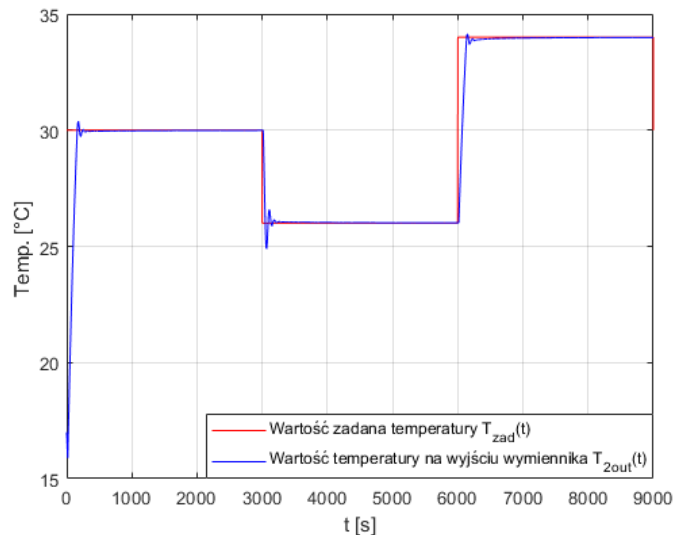
If (u-temp is ujemny) and (różnica-temp is maleje) then
(zmiana-przepływu is brak-zmiany)

If (u-temp is dodatni) and (różnica-temp is rośnie) then
(zmiana-przepływu is brak-zmiany)

Baza reguł widoczna na listingu 5.2. i rysunku 5.23. stanowi modyfikację reguł, podstawowego regulatora rozmytego typu PI (List. 5.1.). Modyfikacja ta, polega na zmianie w regule 1 i 2 spójnika AND na spójnik OR. W wyniku tego zabiegu, w celu wyznaczania poziomu aktywacji tej reguły stosuje się operację *max* podczas której pod uwagę bierze się największą wartość funkcji przynależności do zbiorów rozmytych dla danej „ostrej” wartości wejściowej [1].

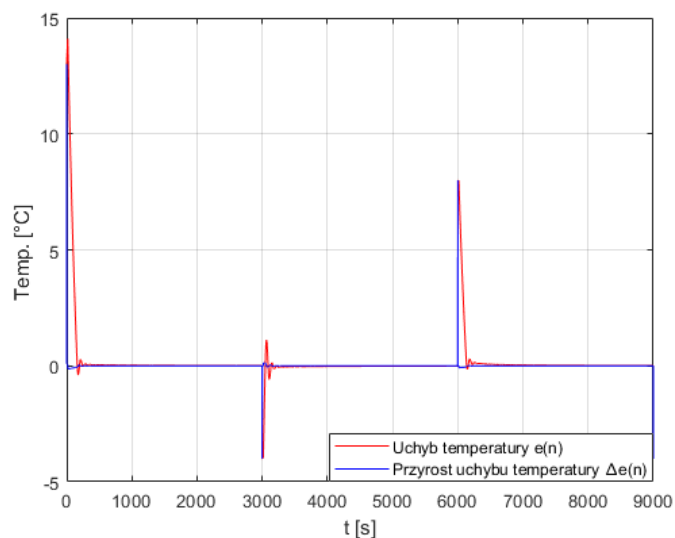
5.6. Regulator rozmyty typu PI zmodyfikowany – symulacja działania

Wyniki symulacji działania regulatora rozmytego typu PI zmodyfikowanego w warunkach idealnych (Rys. 5.3.), zostały przedstawione na rysunkach 5.24.–5.27.



Rys. 5.24. Odpowiedź układu regulacji na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

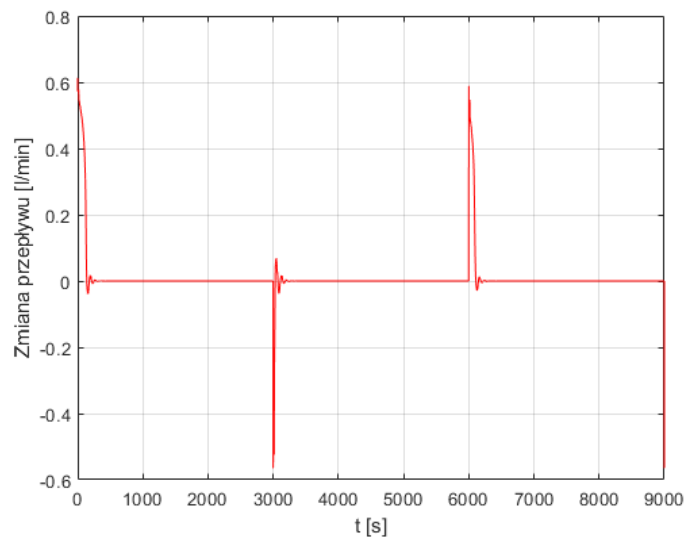
Jak można zaobserwować na rysunku 5.24. temperatura wody $T_{2out}(t)$ bardzo szybko stabilizuje się na wartości zadanej. W porównaniu z wykresem na rysunku 5.10., oscylacje przy ustalaniu się temperatury są znacznie mniejsze. Z uzyskanej odpowiedzi wynika, że w warunkach idealnych zmiana kształtu funkcji przynależności oraz modyfikacja bazy reguł, poprawia jakość regulacji regulatora rozmytego typu PI.



Rys. 5.25. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$

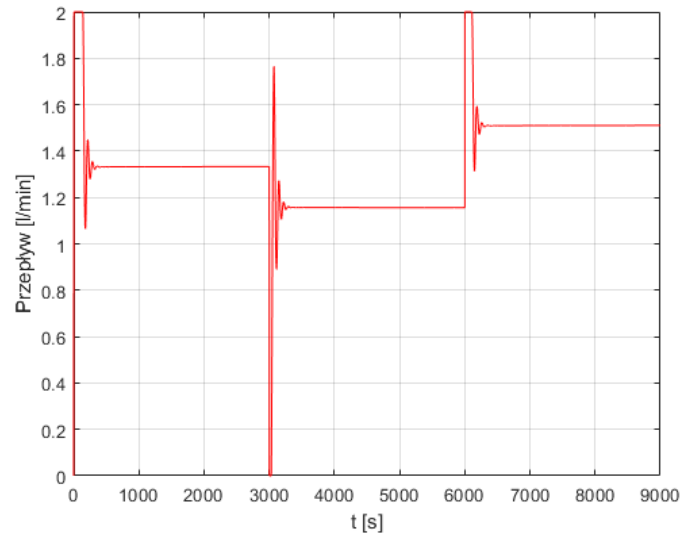
Rysunek 5.25. pokazuje jak zmieniał się uchyb temperatury $e(n)$ oraz wartość jego przyrostu $\Delta e(n)$. Można zauważyć, że w porównaniu z podstawowym regulatorem rozmytym typu PI (Rys. 5.11.), uchyb $e(n)$ dla wersji zmodyfikowanej, o wiele szybciej osiąga poziom zerowy.

Natomiast wykres przyrostu uchybu $\Delta e(n)$ jest bliski zeru oraz jest bardzo podobny do wykresu uzyskanego dla wersji podstawowej regulatora co świadczy o tym, że również w tym przypadku odgrywa on mniejszą rolę niż początkowo zakładano.



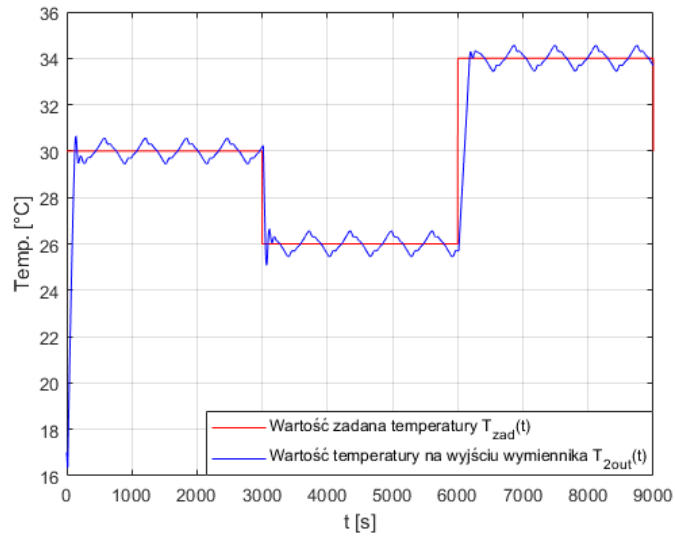
Rys. 5.26. Przyrosty przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$

Analizując wykres 5.26. można dojść do wniosku, że w porównaniu z wykresem 5.12. dla wersji podstawowej regulatora PI, zmiana kształtu funkcji przynależności wpłynęła na wartości zmian przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$ na wyjściu regulatora. Przyrosty narastają impulsowo, ale wydłużeniu uległ czas ich opadania. Taki przebieg wartości wyjściowej regulatora, bezpośrednio wpływa na wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$ po scałkowaniu danych zmian.

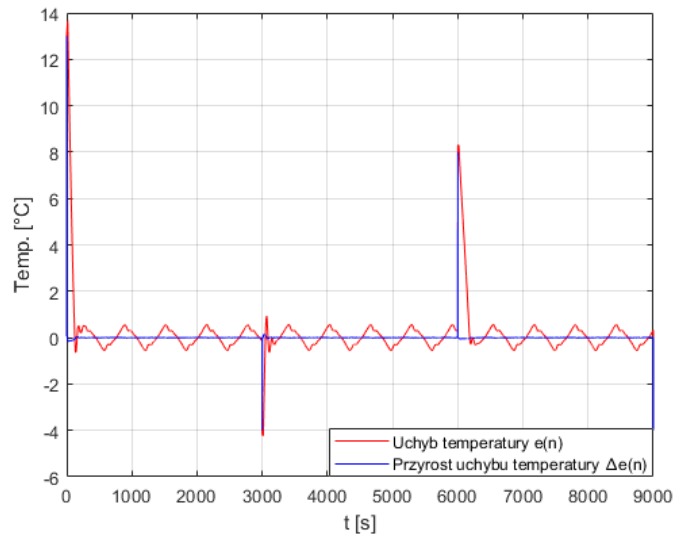
Rys. 5.27. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

Na podstawie wykresu 5.27. można zauważyć, że przy zmianie wartości zdanej temperatury $T_{zad}(t)$, pojawiły się oscylacje wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$. Ich wielkość jest o wiele większa niż miało to miejsce dla regulatora w wersji podstawowej na rysunku 5.13. Jak wspomniano wcześniej, wynika to z przebiegu przyrostów $\Delta\dot{V}_1(t)$ na rysunku 5.26. Takie oscylacje w przypadku obiektu rzeczywistego mogą niekorzystnie wpłynąć na jakość regulacji i uniemożliwić ustalenie się przepływu $\dot{V}_1(t)$ na odpowiednim poziomie. Jednak w przypadku danej symulacji oscylacje ustają i przepływ $\dot{V}_1(t)$ stabilizuje się na odpowiedniej wartości.

.Zmodyfikowany regulator typu PI zgodnie ze schematem z rysunku 5.4. zbadano, pod kątem odporności na sygnał zakłócający $T_{2in}(t)$, jaki z pewnością pojawi się na rzeczywistym obiekcie. Parametry wielkości zakłócającej $T_{2in}(t)$ nie uległy zmianie i są takie same jak na rysunku 5.14. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 5.28. – 5.31.

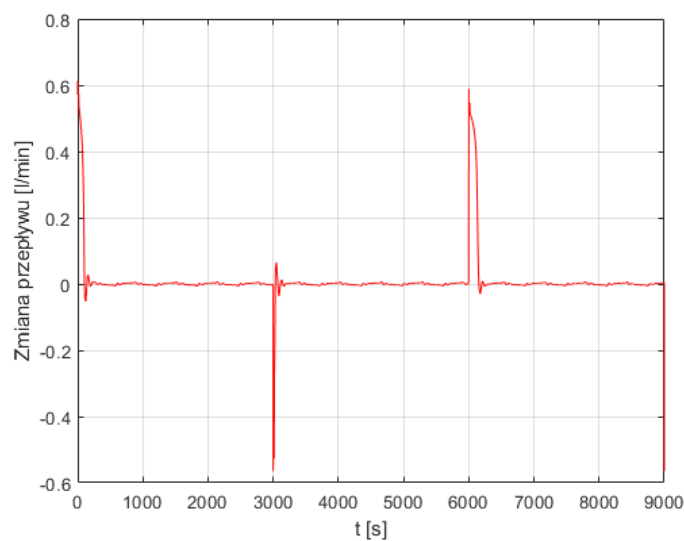
Rys. 5.28. Odpowiedź układu regulacji na zmiany wartości zadanej $T_{zad}(t)$

Na rysunku 5.28. można zaobserwować odpowiedź modelu obiektu na zadaną wartość temperatury $T_{zad}(t)$. Na skutek występujących zakłóceń $T_{2in}(t)$, zmiany wartości temperatury $T_{2out}(t)$ przebiegają wokół wartości zadanej, jednak są one mniejsze niż w przypadku podstawowego regulatora typu PI (Rys. 5.15.). Wynika z tego wniosek, że zmiana kształtu funkcji przynależności oraz modyfikacja bazy reguł zwiększyła odporność układu regulacji na zakłócenia.

Rys. 5.29. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$

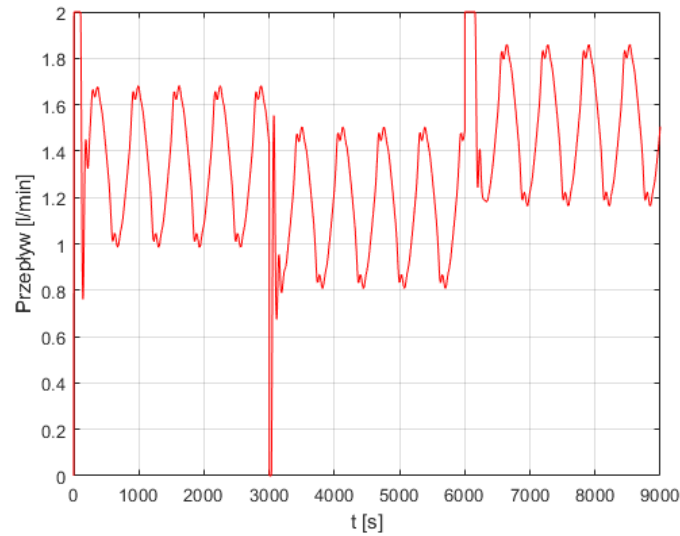
Wprowadzone do układu zakłócenie $T_{2in}(t)$ ma bezpośredni wpływ na zmiany wartości uchybu temperatury $e(n)$. Widać to w przebiegu jego zmian na rysunku 5.29., gdzie uchyb nigdy nie osiąga wartości zerowej tylko oscyluje wokół niej.

Porównując sygnał przyrostu uchybu w warunkach idealnych (Rys. 5.25.) z przyrostem uchybu $\Delta e(n)$ dla warunków z występującym zakłóceniem (Rys. 5.29.) można stwierdzić, że zakłócenie (Rys. 5.14) nie wpływa na niego w znaczącym stopniu. Wynika to z zbyt małych zmian przyrostu uchybu $\Delta e(n)$ w ciągu jednej jednostki czasu, tak że nawet w obecności zakłócenia $T_{2in}(t)$ dane zmiany są zbyt małe aby zostały wykryte.



Rys. 5.30. Przyrosty przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$

Sygnał widoczny na rysunku 5.30. odzwierciedla wielkość wyjściową regulatora, jaką jest zmiana przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$. Podobnie jak w warunkach idealnych, dane przyrosty $\Delta \dot{V}_1(t)$ charakteryzują się dłuższym czasem opadania niż narastania. Można także zauważyć, że oprócz występujących co 3000 sekund znaczących przyrostów przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$, występują także bardzo niewielkie jego zmiany w pozostałych chwilach czasowych. Ich występowanie jest skutkiem oddziaływania zakłócenia $T_{2in}(t)$, kiedy to regulator stara się zmniejszać jego wpływ.

Rys. 5.31. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$

Jak widać na rysunku 5.31. sygnał sterujący jakim jest przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$, nie jest stały tylko zmienia się w sposób oscylacyjny. Oscylacje są wynikiem oddziaływania sinusoidalnego zakłócenia $T_{2in}(t)$, a w konsekwencji niewielkich, scałkowanych zmian przepływu, widocznych na rysunku 5.30.

5.7. Wnioski

Zbudowane regulatory rozmyte typu PI, subiektywnie charakteryzują się lepszą jakością regulacji niż regulatory rozmyte typu P. W warunkach idealnych, w stanie ustalonym nie występuje zjawisku uchybu statycznego $e_s(n)$, a w warunkach z występującym zakłóceniem, układy regulacji z regulatorami rozmytymi typu PI charakteryzują się większą odpornością na siłę zakłócającą.

Podczas budowania regulatorów typu PI, wystąpił problem z dobraniem odpowiednich przedziałów liczbowych dla wielkości wejściowej reprezentującej przyrostu uchybu $\Delta e(n)$, tak aby miała ona większe znaczenie w czasie całej symulacji. Po wielu próbach, zdecydowano się zastosować obecne rozwiązanie, przy którym układ regulacji pracuje stabilnie, a dana wielkość wejściowa odgrywa mniejszą rolę niż początkowo zakładano.

Porównując regulator rozmyty typu PI podstawowy i zmodyfikowany, można wywnioskować, że zmiana kształtu funkcji przynależności oraz zmiana funkcji aktywacji części reguł, może korzystnie wpłynąć na jakość regulacji.

6. Implementacja regulatorów rozmytych w obiekcie rzeczywistym

Za pomocą zaprojektowanych w rozdziałach 4 i 5 regulatorów rozmytych, podjęto się sterowania laboratoryjnym układem wymiennika ciepła hiszpańskiej firmy *Edibon*. Wykorzystując możliwość sterowania obiektem za pomocą biblioteki programu Matlab o nazwie *Simulink*, zadano odpowiednie wartości temperatury i uzyskano wyniki z dostępnych czujników pomiarowych oraz dokonano ich analizy.

6.1. Przebieg badań

Omówione i zbadane w rozdziałach 4 i 5 regulatory rozmyte podłączono do wymiennika ciepła (Rys. 6.2. i Rys. 6.3.), za pomocą interfejsu pomiarowo–sterującego opracowanego przez promotora pracy przy wykorzystaniu elementów biblioteki *Real Time Workshop* programu *Matlab*. Umożliwia ona sterowanie obiektami w czasie rzeczywistym zgodnie ze schematem stworzonym za pomocą biblioteki *Simulink*.

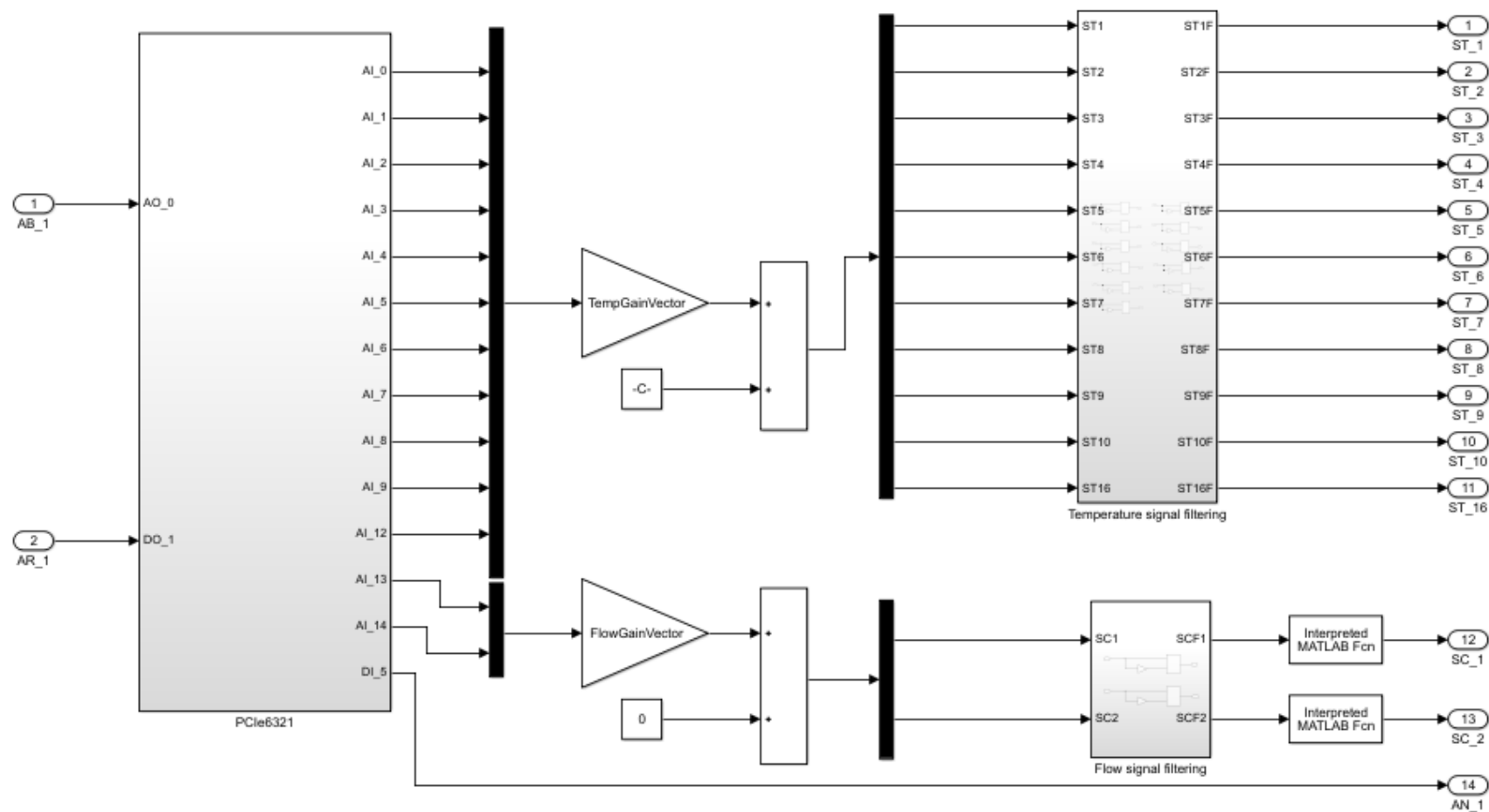
Dany interfejs posiada dwa wejścia:

- AB_1 – wejście do którego podłączony jest regulator, zamieniający uchyb przepływu na odpowiednią wartość napięcia z zakresu 0–10 V. Im większe napięcie, tym większe obroty pompy i przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$.
- AR_1 – wejście, które jest sterowane za pomocą sygnału PWM i odpowiada za utrzymywanie określonej temperatury wody T_{zb} , w zbiorniku wody ogrzewającej.

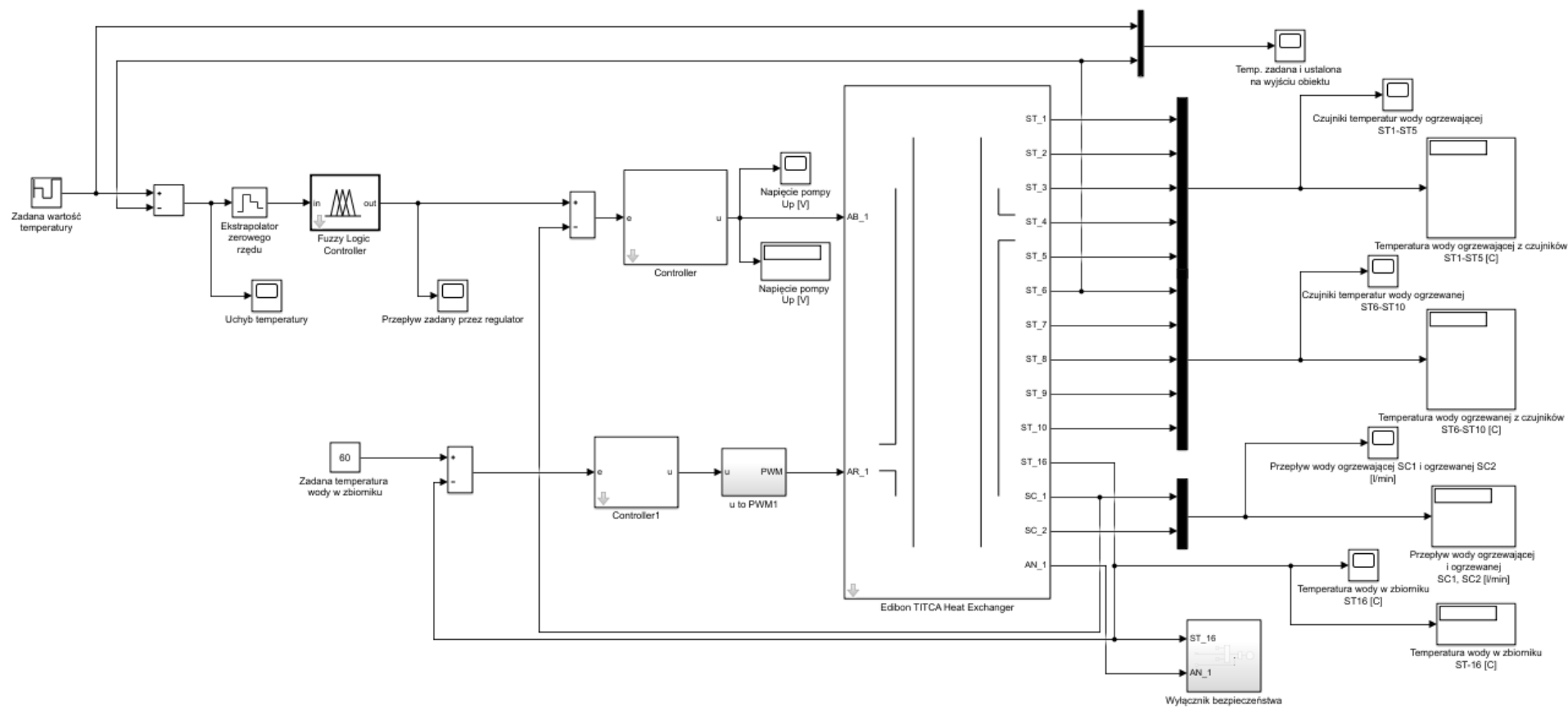
Wyjściami interfejsu są:

- ST1–ST5 – czujniki temperatury wody ogrzewającej,
- ST6–ST10 – czujniki temperatury wody ogrzewanej,
- SC1 i SC2 – czujniki przepływu wody ogrzewającej i ogrzewanej,
- AN–1 – termostat odpowiedzialny za ograniczenie maksymalnej temperatury wody w zbiorniku.

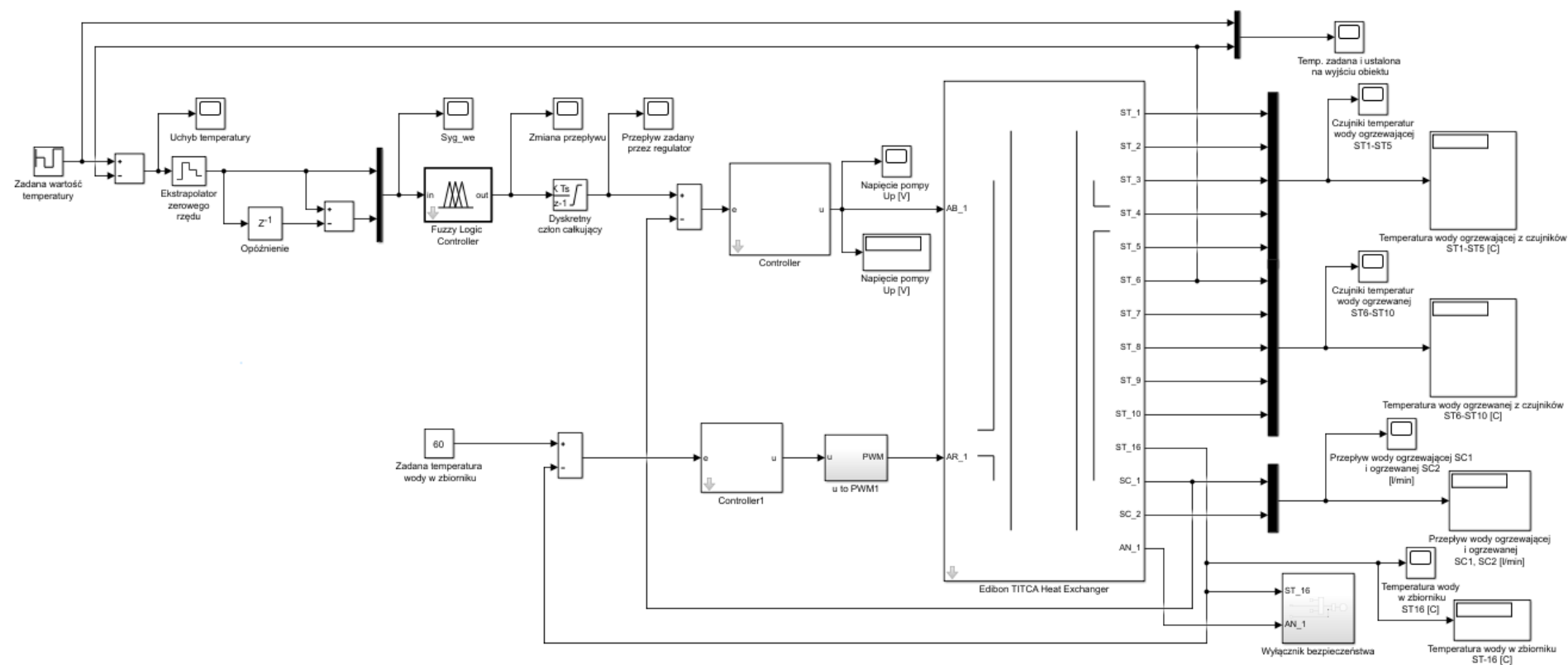
Dzięki udostępnionemu interfejsowi pomiarowo–sterującemu, którego budowę wewnętrzną można zobaczyć na rysunku 6.1., możliwe stało się wykorzystanie programu *Matlab* z bibliotekami *Simulink* oraz *Real Time Workshop* do bezpośredniego sterowania obiektem.



Rys. 6.1. Budowa wewnętrzna interfejsu pomiarowo–sterowniczego

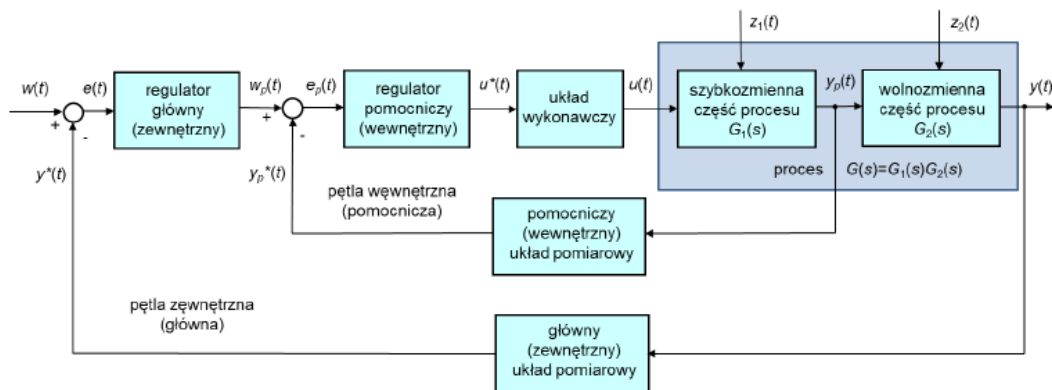


Rys. 6.2. Układ wymiennika ciepła z podłączonym regulatorem rozmytym typu P



Rys. 6.3. Układ wymiennika ciepła z podłączonym regulatorem rozmytym typu PI

Układy na rysunkach 6.2. i 6.3. za pomocą których, sterowano rzeczywistym wymiennikiem ciepła są przykładem regulacji kaskadowej. Regulacja kaskadowa jest stosowana w celu szybkiego zniwelowania wpływu wielkości zakłócającej na szybkozmienną część procesu. Warunkiem koniecznym jest istnienie takiej wielkości $y_p(t)$ na której szybciej uwidacznia się wpływ zakłócenia $z_1(t)$ niż na głównej wielkości regulowanej $y(t)$. W budowie tego typu układów stosuje się dwa regulatory, główny oraz pomocniczy. Regulator główny działa w zewnętrznej pętli regulacji. Na podstawie pomiaru wielkości wolnozmiennnej $y(t)$, wystawia sygnał $w_p(t)$ odpowiedzialny za szybkozmienną, wielkość sterującą. Z kolei regulator pomocniczy działa w wewnętrznej pętli sprzężenia zwrotnego. Na podstawie aktualnego pomiaru szybkozmiennnej wielkości sterującej $y_p(t)$ dokonuje on niezbędnych korekt jej wartości np.: w przypadku wystąpienia zakłócenia $z_1(t)$. Dzięki temu wpływ danego zakłócenia zostanie zniwelowany, zanim uwidoczni się w wolnozmiennnej wielkości regulowanej $y(t)$. Zostało to zobrazowane na rysunku 6.4. [2].



Rys. 6.4. Schemat ogólny układu regulacji kaskadowej [2]

Odnosząc dany opis do układów regulacji z rysunków 6.2. i 6.3., regulatorami głównymi są badane regulatory rozmyte typu P i PI, a regulatorem pomocniczym jest regulator klasyczny PID opisany jako *Controller*, podłączony do wejścia AB_1. Regulatory rozmyte regulują wolnozmienną część procesu jaką jest temperatura wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika ciepła za pomocą odpowiedniej wartości zadanej przepływu $\dot{V}_1(t)$. Z kolei regulator PID na podstawie sygnału uchybu będącego różnicą pomiędzy przepływem zadany przez regulator rozmyty, a uzyskanym z odpowiedniego czujnika, wystawia odpowiedni sygnał napięciowy na sterownik pompy wody. Wielkością zakłócającą $z_1(t)$ są w tym wypadku spadki przepływu $\dot{V}_1(t)$.

Charakterystykami układu wymiennika, które wzięto pod uwagę w czasie jego badania są przebiegi:

- zmian uchybu $e(n)$ i przyrostu uchybu temperatury $\Delta e(n)$,
- przyrostów przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$
- przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$, zadawanego przez regulator rozmyty oraz wymuszanego przez pompę wody,
- zmian temperatury wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ wymiennika ciepła, w stosunku do temperatury zadanej $T_{zad}(t)$,
- zmian temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ (wielkość zakłócająca).

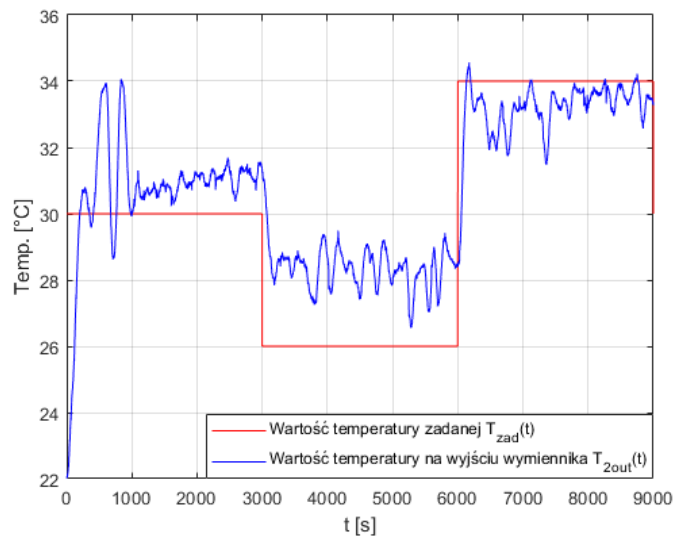
W czasie badań, zadano analogiczne wartości temperatur, jak w przypadku badań symulacyjnych, czyli kolejno 30, 26 i 34 °C. Każda z tych temperatur była utrzymywana przez 3000 sekund, czyli całkowity czas każdego badania wyniósł dwie godziny i trzydzieści minut. Tak duże czasy są niezbędne w przypadku obiektu jakim jest wymiennik ciepła, ze względu na długi czas ustalania się temperatury na jego wyjściu.

Podobnie jak w przypadku badań symulacyjnych, przepływ maksymalny $\dot{V}_1(t)$ wymuszane przez pompę wody został ograniczony do 2 l/min. Przepływ wody $\dot{V}_2(t)$ wpływającej do wymiennika ciepła, ustawiono na wartość 1 l/min.

W przypadku badań regulatorów rozmytych typu P w przeciwieństwie do regulatorów typu PI, dla etapu chłodzenia pompa nie ulega całkowitemu zatrzymaniu, a jedynie utrzymuje najmniejsze możliwe obroty, zapewniając w ten sposób najmniejszy możliwy przepływ $\dot{V}_1(t)$. Jest to zabieg celowy służący sprawdzeniu, czy w czasie chłodzenia należy całkowicie wyłączyć pompę, czy równie skutecznie może ona działać z minimalną prędkością wydłużając w ten sposób jej żywotność.

6.2. Wyniki badań dla podstawowego regulatora rozmytego typu P

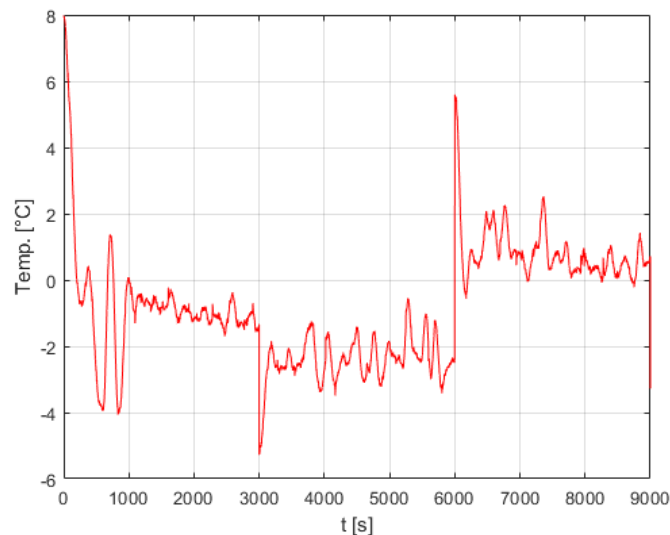
Zaprojektowany w podrozdziale 4.3. regulator rozmyty typu P, podłączono za pomocą biblioteki *Simulink* do rzeczywistego wymiennika ciepła, zgodnie z rysunkiem 6.2. wykorzystując udostępniony przez promotora pracy układ kontrolno–pomiarowy. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 6.5.–6.8.



Rys. 6.5. Efekt sterowania temperaturą wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ wymiennika ciepła

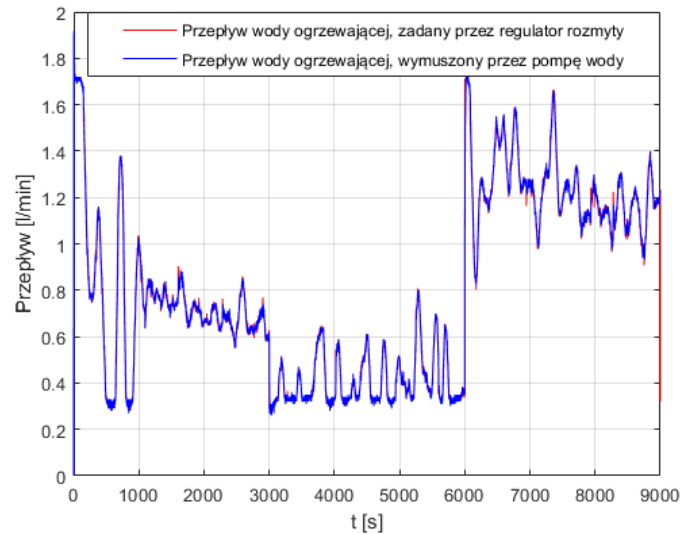
Jak można zauważyć na rysunku 6.5., wartość temperatury $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika, w stosunku do wartości zadanej $T_{zad}(t)$, różni się o pewną wartość uchybu $e(n)$. Największy bo wynoszący około 2,5 °C uchyb, jest widoczny dla etapu chłodzenia, kiedy to pompa wymusza najmniejszy możliwy przepływ $\dot{V}_1(t)$. Ponadto wymiennik charakteryzuje się słabą zdolnością do aktywnego chłodzenia, ponieważ nie posiada on chłodnicy lub innych elementów zdolnych do szybkiego obniżania temperatury wody na jego wyjściu. Z kolei dla temperatury zadanej o wartości 30 i 34 °C, uchyb $e(n)$ jest znacznie mniejszy. Dla przedziału czasowego 0–3000 s, pomimo początkowych dużych oscylacji, wynikających z wpływu zakłóceń $T_{2in}(t)$, temperatura $T_{2out}(t)$ charakteryzuje się niewielkimi wahaniami i małym uchybem. Podobna sytuacja ma miejsce dla przedziału czasowego 6000–9000 s, gdzie co prawda występują większe jej wahania, wynikające z wpływu zakłóceń, ale subiektywnie można stwierdzić, że uchyb $e(n)$ ma również niewielką wartość.

Różnice w wartościach uchybu $e(n)$, mogą wynikać z charakteru obiektu jakim jest wymiennik ciepła, ponieważ jest on obiektem nieliniowym, a regulatory rozmyte były projektowane dla uproszczonego, liniowego modelu. Z tego powodu niemożliwe było dobranie parametrów regulatora w taki sposób, aby były one optymalne dla każdego punktu pracy wymiennika.



Rys. 6.6. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ dla podstawowego regulatora rozmytego typu P

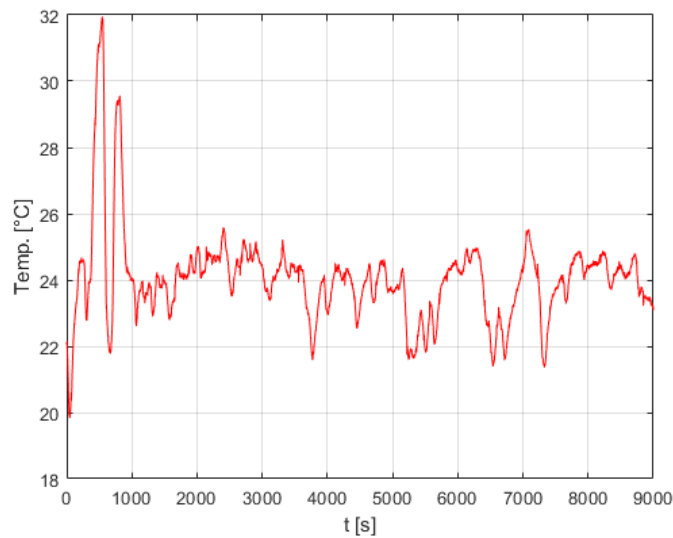
Rysunek 6.6. pokazuje zmiany uchybu temperatury $e(n)$, czyli różnice pomiędzy wartością zadaną $T_{zad}(t)$, a rzeczywistą $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika ciepła. Jak można było się spodziewać, uchyb tylko w krótkich momentach osiąga wartość zerową. W pozostałych chwilach czasowych wartości uchybu temperatury $e(n)$ są niezerowe i mają charakter oscylacyjny, na wskutek oddziaływania wielkości zakłócającej $T_{2in}(t)$. Najmniejsze wartości uchyb osiąga dla temperatury zadanej równej 34 °C (przedział czasowy 6000–9000 s) oraz 30 °C (przedział czasowy 0–3000 s), a największe dla temperatury 26 °C (przedział czasowy 3000–6000 s).



Rys. 6.7. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ dla podstawowego regulatora rozmytego typu P

Na rysunku 6.7. zbadano skuteczność sygnału sterującego zadawanego przez regulator rozmyty. Jak można zauważyć, przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ zadany przez regulator, prawie całkowicie pokrywa się z przepływem, wymuszonym w obiekcie przez pompę wody. Świadczy to o skuteczności zastosowanego układu regulacji kaskadowej, dzięki któremu przepływ $\dot{V}_1(t)$ jest utrzymywany na zadanym poziomie, pomimo nieliniowej charakterystyki pracy pompy oraz możliwych spadków przepływu wynikających z pojawienia się niewielkich zakłóceń, mających związek z oporami pracy wirnika pompy wody lub jej zapowietrzaniem.

Przepływ zmienia się oscylacyjnie, co jest reakcją regulatora na wpływ zakłóceń $T_{2in}(t)$. Dla etapu chłodzenia (przedział czasowy 3000–6000 s), pompa nie ulega całkowitemu zatrzymaniu, tylko zgodnie z założeniami pracuje na najmniejszych możliwych obrotach., przez co przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ jest cały czas różny od zera. Wpływa to pozytywnie na żywotność pompy wody, ale jak można zauważyć na rysunku 6.5. i 6.6. zwiększa dodatkowo uchyb $e(n)$.

Rys. 6.8. Zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$

Przyczyną wahań temperatur widocznych na rysunkach 6.5. i 6.6. oraz zmian przepływu widocznych na rysunku 6.7., są wahania temperatury wody $T_{2in}(t)$ wpływającej do wymiennika ciepła.

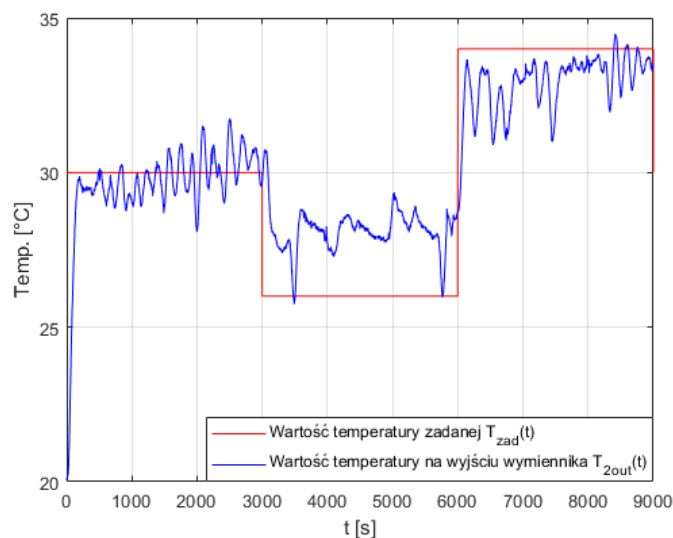
Jak można zauważyć na rysunku 6.8., temperatura wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ w początkowym czasie pomiaru (przedział czasowy 0–1000 s), ulega dosyć gwałtownym wahaniom sięgającym nawet 10 °C. Reakcją na te zakłócenia, są równie duże wahania temperatury wody na wyjściu wymiennika $T_{2out}(t)$, widoczne na rysunku 6.5. oraz wahania przepływu $\dot{V}_1(t)$ na rysunku 6.7. W późniejszym czasie, zmiany wielkości zakłócającej $T_{2in}(t)$ są mniejsze, co można natychmiast zauważyć w lepszym stabilizowaniu danych wartości.

Na tej podstawie można zaobserwować, jak silnie temperatura wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, dostarczanej do wymiennika ciepła wpływa na wielkość wyjściową, jaką jest temperatura wylotowa wody $T_{2out}(t)$. Można wysnuć także wniosek, że poprawę jakości regulacji można by osiągnąć poprzez zminimalizowanie widocznych na rysunku 6.8. oscylacji, dzięki zastosowaniu elementu stabilizującego temperaturę wody wodociągowej lub dodatkowej kompensacji zakłóceń.

Zastosowany regulator rozmyty typu P słabo radzi sobie z niwelowaniem wpływu zakłóceń $T_{2in}(t)$, ponieważ wymiennik jest obiektem o dużej bezwładności cieplnej, przez co regulator nie jest w stanie odpowiadać wystarczająco szybko.

6.3. Wyniki badań dla rozszerzonego regulatora rozmytego typu P

Następnym krokiem było wykorzystanie zbudowanego w podrozdziale 4.5., rozszerzonego regulatora rozmytego typu P. Również w tym przypadku sterowanie wymiennikiem ciepła, odbywało się za pomocą układu pomiarowo–sterującego, udostępnionego przez promotora pracy (Rys. 6.1.) w bibliotece *Simulink*, zgodnie ze schematem z rysunku 6.2. Wyniki zastosowania danego regulatora omówiono na rysunkach 6.9.–6.12.

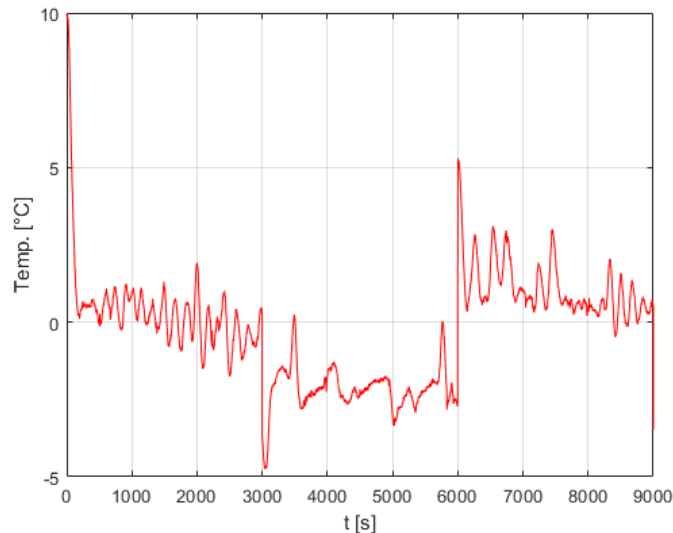


Rys. 6.9. Efekt sterowania temperaturą wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ wymiennika ciepła

Rysunek 6.9. przedstawia wykres zmian temperatury wody $T_{2out}(t)$ wpływającej z wymiennika ciepła, dla rozszerzonego regulatora rozmytego typu P. Jak można zauważyć temperatura wody w tym przypadku jest bardziej zbliżona do wartości zadanych $T_{zad}(t)$, niż dla wersji podstawowej regulatora (Rys. 6.5.).

Dla temperatury zadanej wynoszącej 30 °C, temperatura wyjściowa wody $T_{2out}(t)$ charakteryzuje się niewielkimi oscylacjami wokół wartości zadanej oraz bardzo małym uchybem $e(n)$. Analogicznie jak w przypadku podstawowego regulatora rozmytego typu P, dla etapu chodzenia (przedział czasowy 3000–6000 s) regulator radzi sobie najslabiej, a uchyb wynosi ok. 2,5 °C. Z kolei w ostatnim etapie regulator stara się stabilizować temperaturę z podobną dokładnością, jak dla temperatury zadanej 30 °C, ale nie jest w stanie równie dobrze skompensować wpływu zakłóceń $T_{2in}(t)$, czego skutkiem są widoczne oscylacje.

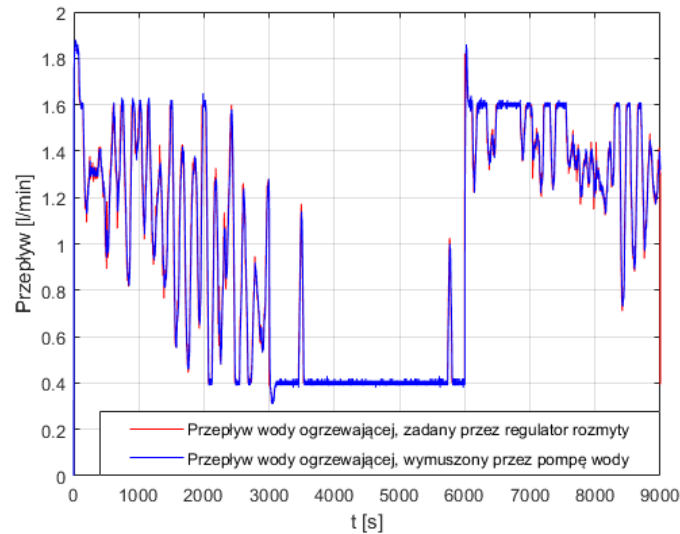
Różnica w niwelowaniu wpływu zakłóceń dla poszczególnych temperatur zadanych (punktów pracy), wynika z nieliniowego charakteru wymiennika ciepła, podczas gdy regulator był projektowany w oparciu o uproszczony, liniowy model obiektu.



Rys. 6.10. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ dla rozszerzonego regulatora rozmytego typu P

Widoczny na rysunku 6.10. wykres zmian uchybu $e(n)$ pokazuje, że w porównaniu z jego zmianami dla podstawowej wersji regulatora rozmytego (Rys. 6.6.), uchyb w wersji rozszerzonej, oscyluje wokół nieco mniejszych wartości.

Dla temperatury $T_{zad}(t)$ o wartości 30 °C (przedział czasowy 0–3000 s), uchyb $e(n)$ oscyluje wokół bardzo małych wartości, a momentami wokół wartości zadanej. Jak można było się spodziewać dla etapu chłodzenia, czyli temperatury 26 °C (przedział czasowy 3000–6000 s), osiągał on większe wartości, rzędu około 2,5 °C wynikające z podtrzymywania przez pompę wody, minimalnej wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$. Z kolei dla ostatniego etapu, kiedy temperatura zadana wynosiła 34 °C (przedział czasowy 6000–9000 s), uchyb $e(n)$ stopniowo malał, ale charakteryzował się znacznymi oscylacjami, wynikającymi z wpływu wielkości zakłócającej $T_{zin}(t)$.



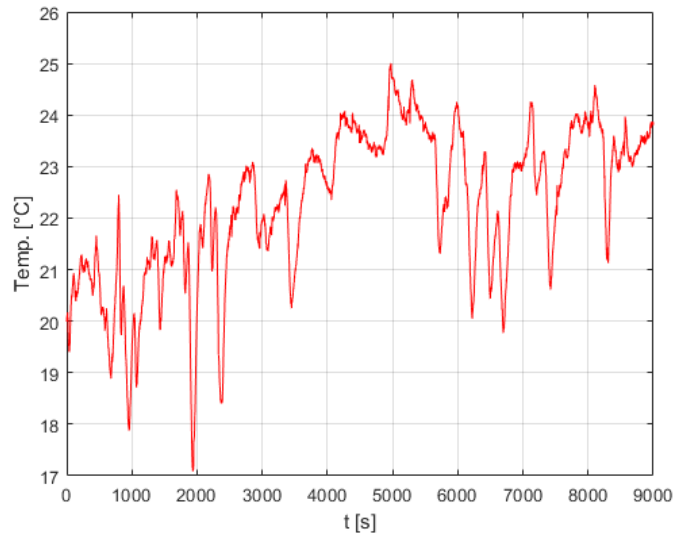
Rys. 6.11. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ dla rozszerzonego regulatora rozmytego typu P

Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ widoczny na rysunku 6.11. charakteryzuje się znacznymi oscylacjami, dla temperatury zadanej $T_{zad}(t)$ w przedziale czasowym wynoszącym 0–3000 s. Dane oscylacje, charakteryzują się większą częstotliwością niż w przypadku podstawowego regulatora rozmytego typu P (Rys. 6.7.). Wynika to z mniejszej wartości uchybu $e(n)$ w danym przedziale czasowym (Rys. 6.10.), przez co regulator aby utrzymać temperaturę jak najbliższą wartości zadanej, gwałtownie i często zmienia wartość przepływu $\dot{V}_1(t)$. Naturalnie wpływ na dane wahania, ma prawdopodobnie także wielkość zakłócająca $T_{2in}(t)$.

Dla etapu chłodzenia (przedział czasowy 3000–6000 s) wartość przepływu $\dot{V}_1(t)$ stabilizuje się na bardzo niskim poziomie wynoszącym ok. 0.4 l/min, dzięki czemu woda na wyjściu wymiennika $T_{2out}(t)$ stopniowo się obniża i zbliża do temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$.

Z kolei dla wartości temperatury zadanej $T_{zad}(t)$ z przedziału czasowego wynoszącego 6000–9000 s, przepływ $\dot{V}_1(t)$ również charakteryzuje się pewnymi oscylacjami, jednak są one mniejsze niż dla początkowych chwil czasowych badania.

Po dużej zgodności wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$ zadanego przez regulator rozmyty z przepływem wymuszonym przez pompę wody, można dojść do wniosku że układ regulacji kaskadowej poprawnie spełnia swoją rolę w układzie regulacji.



Rys. 6.12. Zmiana temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$

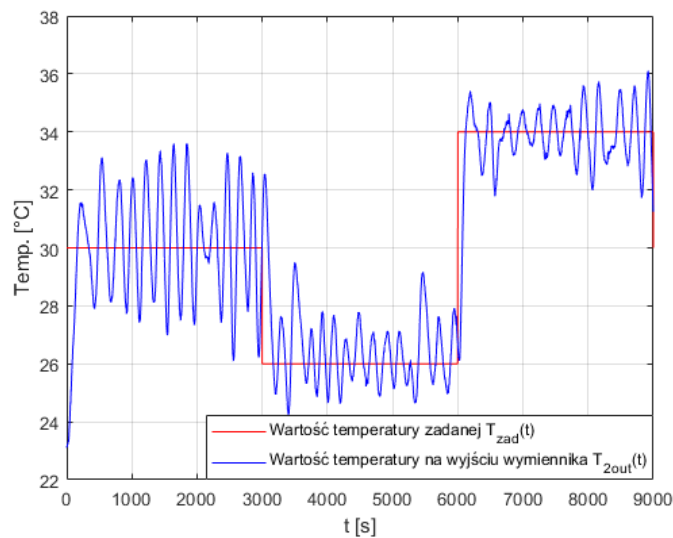
Jak można zaobserwować na rysunku 6.12., temperatura wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ w czasie badania ulegała ciągłym wahaniom, co wpływało na jakość regulacji widoczną na rysunku 6.9.

Szczególne duże spadki temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ są widoczne w przedziale czasowym 0–3000 s. Jednak można zauważyć, że dla tego punktu pracy na rysunku 6.9., oscylacje temperatury wody wyjściowej wymiennika $T_{2out}(t)$ są mniejsze, niż można by przypuszczać po obserwacji wpływu takich zakłóceń, na stabilizowanie temperatury $T_{2out}(t)$ dla podstawowej wersji regulatora rozmytego typu P (Rys. 6.5.). Prawdopodobnie dla tej wartości temperatury zadanej $T_{zad}(t)$, regulator osiąga optymalny punkt pracy, co w połączeniu z rozszerzoną bazą reguł znacząco wzmacnia odporność układu regulacji na zakłócenia.

Mimo wszystko, również w tym przypadku zalecana jest dokładana stabilizacja temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ dostarczanej do wymiennika, ponieważ powiększona baza reguł nie jest w stanie całkowicie zniwelować wpływu jej wahań na jakość regulacji.

6.4. Wyniki badań dla podstawowego regulatora rozmytego typu PI

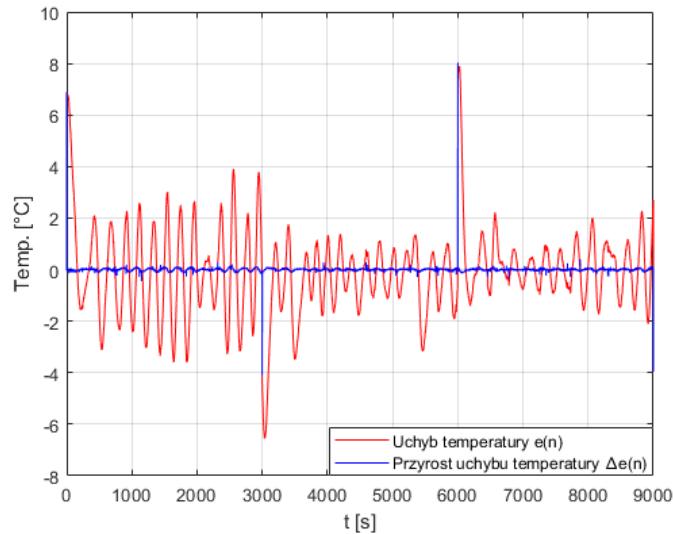
Zaprojektowany w podrozdziale 5.3. regulator rozmyty typu PI w wersji podstawowej, podłączono do laboratoryjnego układu wymiennika ciepła za pomocą interfejsu kontrolno–pomiarowego udostępnionego przez promotora, zgodnie z układem na rysunku 6.3. Wyniki uzyskane w czasie badań umieszczona na rysunkach 6.13.–6.17.



Rys. 6.13. Efekt sterowania temperaturą wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ wymiennika ciepła

Wykres na rysunku 6.13. pokazuje jak zmieniała się temperatura wody wylotowej $T_{2out}(t)$ wymiennika ciepła w stosunku do aktualnej wartości zadanej $T_{zad}(t)$. Pierwszą istotną rzeczą na jaką należy zwrócić uwagę jest fakt, że dla badanego regulatora rozmytego typu PI, temperatura wody wyjściowej wymiennika ciepła, oscyluje wokół temperatury zadanej, a nie wokół wielkości od niej odchylonej o pewną wartość uchybu $e(n)$, tak jak to miało miejsce dla regulatorów typu P (Rys. 6.5. i Rys. 6.9.). Wynika to z zastosowania członu całkującego, który eliminuje uchyb statyczny $e_s(n)$ w układzie.

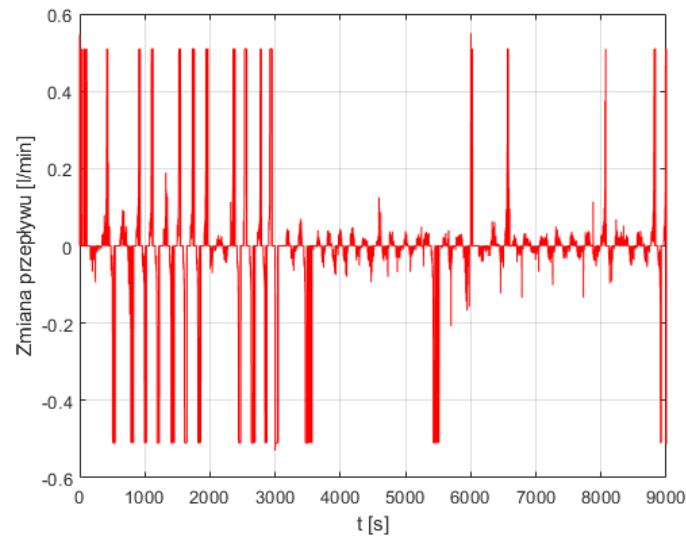
W przedziale czasowym 0–3000 s, temperatura wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ oscyluje wokół wartości zadanej, przy wartości międzyszczytowej równej około 5 °C. Wahania te są reakcją na znaczące zmiany temperatury wody $T_{2in}(t)$ wpływającej do wymiennika ciepła. Dla pozostałych wartości temperatur zadanych, oscylacje są widocznie mniejsze, co wynika prawdopodobnie z tego, że w tych punktach pracy podstawowy regulator rozmyty typu PI, posiada lepiej dobrane funkcje przynależności oraz bazę reguł je aktywujących, przez co w lepszym stopniu ogranicza wpływ zakłóceń i w efekcie lepiej stabilizuje temperaturę $T_{2out}(t)$.



Rys. 6.14. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ oraz jego przyrostu $\Delta e(n)$

Na rysunku 6.14. przedstawiono wielkości wejściowe podstawowego regulatora rozmytego typu PI. Jak można zauważyć, uchyb $e(n)$ nie oscyluje wokół wartości różnych od zera tak jak miało to miejsce dla regulatorów typu P (Rys. 6.6. i Rys. 6.10.), tylko wokół zera co oznacza poprawę jakości regulacji. Oscylacje wokół zera, wynikają z cechy charakterystycznej regulatorów z członem całkującym, jaką jest brak uchybu statycznego $e_s(n)$ w układzie. Można także zauważyć, że dla etapu chłodzenia wody wylotowej (przedział czasowy 3000 – 6000 s), wartość uchybu $e(n)$ jest bardzo mała. Wynika to z faktu, że w przypadku danego regulatora, w czasie chłodzenia następuje całkowite wyłączenie pompy wody, dzięki czemu woda wylotowa $T_{2out}(t)$ może wychłodzić się do temperatury zadanej.

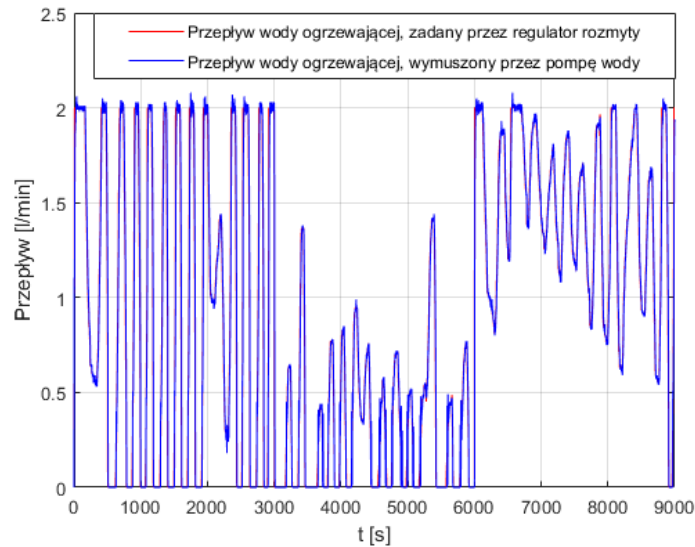
Z kolei analizując przyrost uchybu $\Delta e(n)$ można zauważyć, że podobnie jak w przypadku badań symulacyjnych z występującym zakłóceniem (Rys. 5.16.), w większości chwil czasowych oscyluje on wokół bardzo małych wartości. Dana wielkość odgrywa mniejszą rolę niż początkowo zakładano, ale jest niezbędna do prawidłowego działania danego układu regulacji. Jej wartości są szczególnie ważne w chwilach zmian wartości temperatury zadanej $T_{zad}(t)$, gdzie aktywuje ona odpowiednie reguły w bazie reguł regulatora rozmytego typu PI i w efekcie umożliwia poprawną regulację.



Rys. 6.15. Przyrosty przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$

Rysunek 6.15. przedstawia wielkość wyjściową podstawowego regulatora rozmytego typu PI jaką są zmiany wartości przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$. Jak można zaobserwować na rysunku 6.15., zmiany wartości przepływu mają charakter impulsowy o różnym czasie trwania i wartości każdego z impulsów. Obserwowane w przedziale czasowym 0–3000 s, duże przyrosty wartości przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$ są odzwierciedleniem dużych oscylacji uchybu $e(n)$ na rysunku 6.15. w tych samych chwilach czasowych. W chwilach ustabilizowania uchybu na mniejszych wartościach, zmiany przepływu na rysunku 6.16. są odpowiednio mniejsze np.: w chwilach czasowych 3500–5500 s.

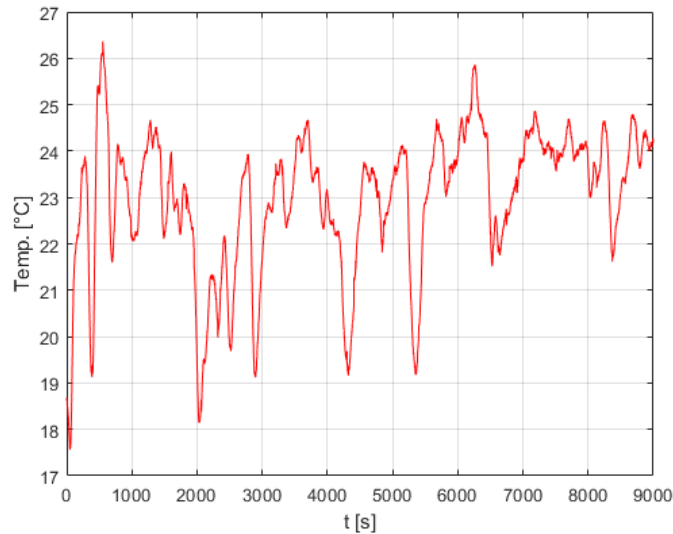
Zmiany przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$, pozwalają regulatorowi lepiej ustalić jego wielkość, dla danej wartości temperatury zadanej $T_{zad}(t)$, niż miało to miejsce dla regulatorów rozmytych typu P, gdzie dane wielkości przepływu $\dot{V}_1(t)$ znajdują się w bardziej sztywnych ramach.



Rys. 6.16. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ dla podstawowego regulatora rozmytego typu PI

Na rysunku 6.16. można zaobserwować wielkość przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ w badanym wymienniku ciepła. Na podstawie przedstawionych wykresów widać, że przepływ $\dot{V}_1(t)$ zadany przez regulator, pokrywa się z wartością przepływu $\dot{V}_1(t)$ wymuszonego przez pompę wody. Na tej podstawie można stwierdzić, że układ regulacji kaskadowej działa prawidłowo.

Wartość przepływu $\dot{V}_1(t)$, w czasie badania zmienia się w dużym zakresie. Dla przedziału czasowego 0–3000 s, waha się ona od wartości zerowej (pompa wyłączona) do wartości maksymalnej. W dalszych chwilach czasowych zmienia się on w mniejszym zakresie. Jest to spowodowane mniejszymi oscylacjami uchybu $e(n)$ na rysunku 6.14. przez co regulator stara się utrzymywać zadaną wartość temperatury $T_{zad}(t)$ i nie zmienia przepływu $\dot{V}_1(t)$ w tak dużym zakresie.

Rys. 6.17. Zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$

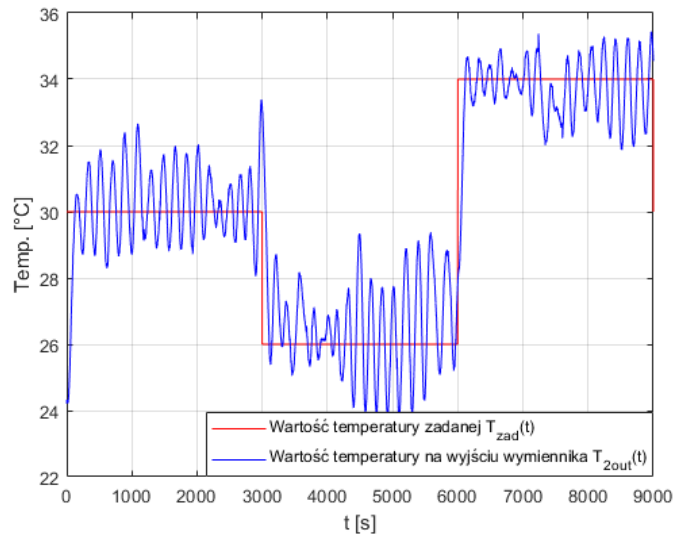
Na rysunku 6.17. przedstawiono zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ przy badaniu podstawowego regulatora rozmytego typu PI. Jak można zauważyć, jej temperatura w ciągu badania wielokrotnie ulegała zmianom, co miało bezpośredni wpływ na efekt regulacji temperatury wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ przedstawiony na rysunku 6.13.

Można zauważyć, że w przedziale czasowym 0–3000 s zmiany temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, mają znacznie większy wpływ na jakość regulacji temperatury $T_{2out}(t)$ (Rys. 6.14.), niż w pozostałych chwilach czasowych. Wynika to z projektowania regulatora w oparciu o prosty linowy model obiektu, czego skutkiem jest lepsze dobranie parametrów systemu rozmytego dla temperatury zadanej $T_{zad}(t)$, w przedziale czasowym 0–3000s, niż dla jej wartości w chwilach 3000–6000 s. Lepiej dobrane parametry w danym punkcie pracy, zwiększyły odporność układu regulacji na zakłócenia. Wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, zmniejszyły się dopiero w przedziale czasowym 6000–9000 s., co naturalnie wpłynęło pozytywnie na jakość regulacji dla danej temperatury zadanej $T_{zad}(t)$ (Rys. 6.13.).

Duże wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ na rysunku 6.17. wymagają stabilizacji na odpowiednim poziomie, w celu poprawy jakości regulacji.

6.5. Wyniki badań dla zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI

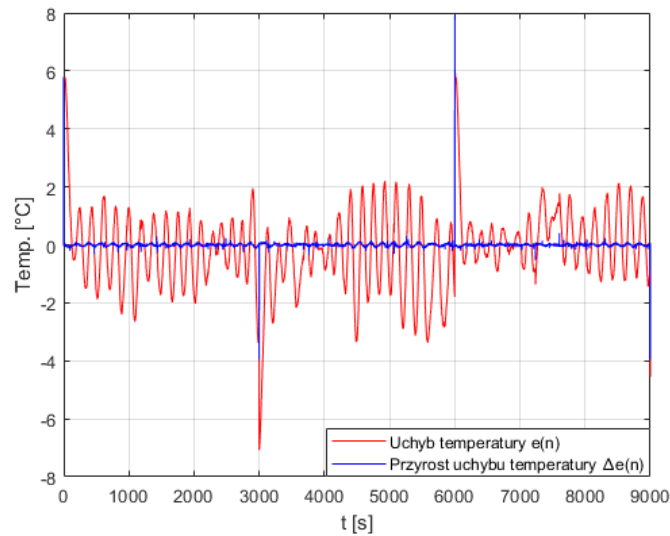
Zmodyfikowany regulator rozmyty typu PI, zaprojektowany w podrozdziale 5.5., zaimplementowano w bibliotece *Simulink* będącego częścią pakietu *Matlab*, zgodnie z rysunkiem 6.3. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunkach 6.18.–6.22.



Rys. 6.18. Efekt sterowania temperaturą wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ wymiennika ciepła

Na rysunku 6.18. przedstawiono zmiany temperatury wody wylotowej $T_{2out}(t)$ wymiennika, w stosunku do wartości temperatury zadanej $T_{zad}(t)$. Można zauważyć, że dana temperatura oscyluje wokół wartości zadanej dla każdej chwili czasowej.

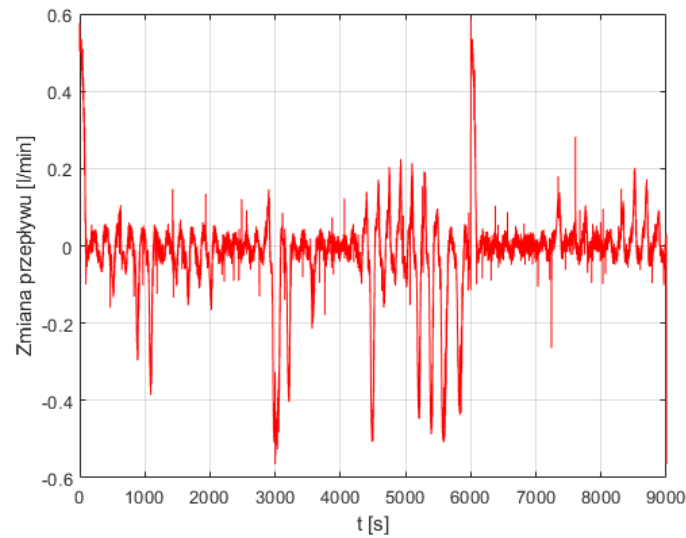
Dla temperatury zadanej $T_{zad}(t)$ równej 30 °C, wartość międzyszczytowa oscylacji, wynosi około 3 °C. Zatem można stwierdzić, że oscylacje w tym przedziale czasowym, mają mniejszą wartość, niż w przypadku podstawowej wersji regulatora rozmytego typu PI (Rys. 6.13.). W etapie chłodzenia (od 3000 do 6000 s), można zauważyć gwałtowny ich wzrost od około 4000 sekundy badania. Wynika to prawdopodobnie ze wzrostu wielkości zakłócającej, jaką są wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$. Z kolei dla ostatniego etapu regulacji (od 6000 do 9000 s), oscylacje temperatury wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika są bardzo małe, w stosunku do wartości zadanej $T_{zad}(t)$. Na tej podstawie można stwierdzić, że dla temperatury zadanej równej 34 °C, badany regulator pracuje w optymalnym punkcie pracy, gdzie poziom oscylacji temperatury $T_{2out}(t)$ jest najmniejszy.



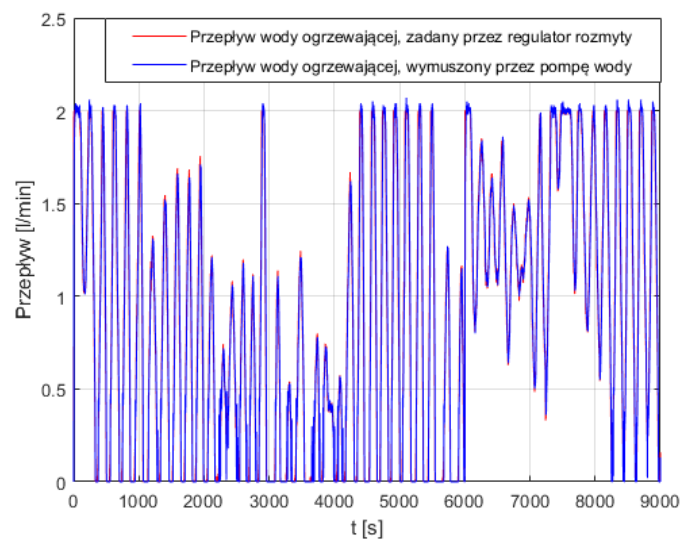
Rys. 6.19. Zmiana uchybu temperatury $e(n)$ oraz jego przyrostu $\Delta e(n)$

Przedstawiony na rysunku 6.19. uchyb temperatury $e(n)$ oraz jego przyrost $\Delta e(n)$, zmieniają się w analogiczny sposób, jak w wersji podstawowej regulatora (Rys. 6.14.). Uchyb temperatury $e(n)$ oscyluje wokół zera, a jego wahania uzależnione są od wpływu wielkości zakłócającej $T_{2in}(t)$ oraz aktualnej temperatury zadanej $T_{zad}(t)$. Dla temperatury zadanej w przedziale czasowym 0–3000 s, oscylacje uchybu są małe i stopniowo maleją. W przypadku chwil czasowych z przedziału 3000–6000 s, oscylacje początkowo również są niewielkie, ale w pewnym momencie gwałtownie rosną. Wynika to prawdopodobnie z zwiększenia się wpływu zakłócenia $T_{2in}(t)$ oddziałującego na układ. Dla etapu regulacji w chwilach czasowych 6000–7000 s, można zauważyć że oscylacje wokół zera są już bardzo małe. Niestety, ponowne zwiększenie się wielkości zakłócającej, spowodowało wzrost oscylacji aż do końca badania.

Przyrost uchybu $\Delta e(n)$ w czasie trwania badania oscyluje wokół zera na bardzo niskim poziomie. Jedynie w chwilach zmian wartości zadanej $T_{zad}(t)$ osiąga znaczące wartości. Podobnie jak w przypadku wersji podstawowej regulatora, pomimo mniejszego wpływu na regulację, wciąż jest istotną wielkością.

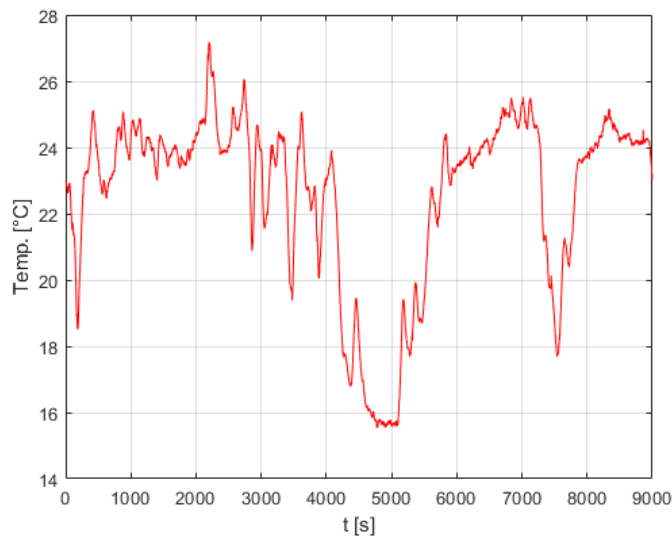
Rys. 6.20. Przyrosty przepływu wody ogrzewającej $\Delta \dot{V}_1(t)$

Jak widać na rysunku 6.20. dla zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI, zmiany przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$ w większości chwil czasowych były mniejsze niż dla podstawowej wersji regulatora (Rys. 6.15.). Mniejsze oscylacje uchybu $e(n)$ wokół zera (Rys. 6.19.), oznaczają lepszą jakość regulacji, a co za tym idzie regulator nie musi zmieniać wartości przepływu $\dot{V}_1(t)$ w tak dużym zakresie. Jedynie od około 4500 sekundy badania, występują większe jego zmiany. Wynika to prawdopodobnie z wystąpienia gwałtownego wzrostu zakłócenia $T_{2in}(t)$, którego wpływ próbuje zniwelować regulator. W przedziale czasowym 6000–9000 s, zmiany przepływu $\Delta \dot{V}_1(t)$ ponownie zmniejszają się do niewielkich wartości, czyli wartość temperatury wody $T_{2out}(t)$ jest bliska zadanej.

Rys. 6.21. Przepływ wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ dla zmodyfikowanego regulatora rozmytego typu PI

Na rysunku 6.21. zaprezentowano zmiany przepływu wody ogrzewającej $\dot{V}_1(t)$ w czasie badania. Ponownie można stwierdzić, bardzo dobre odwzorowanie przepływu zadanego przez regulator rozmyty, w stosunku do przepływu wymuszonego przez pompę wody, co świadczy o poprawnym działaniu układu regulacji kaskadowej.

Podobnie jak w przypadku podstawowej wersji regulatora rozmytego typu PI na rysunku 6.16., przepływ $\dot{V}_1(t)$ w większości chwil czasowych charakteryzował się oscylacjami o dużej amplitudzie. Jedynie w przedziale czasowym około 6000–8000 s, zmieniał się on w mniejszym zakresie co oznacza, że temperatura wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika musiała mieć wartość bardzo bliską, aktualnej wartości zadanej.



Rys. 6.22. Zmiana temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$

Rysunek 6.22., przedstawia wykres zmian temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, czyli wielkości zakłócającej działającej na układ regulacji. W czasie badania wystąpiły dwa znaczące spadki temperatury, które miały wpływ na jakość regulacji.

Pierwszy spadek temperatury miał miejsce w przedziale czasowym 4000–6000 s, gdzie temperatura spadła o około 8 °C. Jest on bezpośrednią przyczyną wzrostu oscylacji temperatury wody $T_{2out}(t)$ w tym przedziale czasowym (Rys. 6.19.)

Drugi spadek temperatury, miał miejsce w przedziale 7000–8000s. Temperatura wody wodociągowej $T_{2in}(t)$ spadła o około 6 °C i była przyczyną niewielkiego wzrostu oscylacji w czasie stabilizowania się temperatury wody ogrzewanej $T_{2out}(t)$, dla ostatniej wartości temperatury zadanej $T_{zad}(t)$ (Rys. 6.18.).

6.6. Wnioski

Na podstawie porównania efektu sterowania wymiennikiem, za pomocą regulatora rozmytego typu P w wersji podstawowej i rozszerzonej, można subiektywnie stwierdzić, że zwiększona baza reguł oraz powiększone systemy rozmyte, nieznacznie wpłynęły na poprawę jakości regulacji.

Podobne wnioski, można wyciągnąć analizując wyniki sterowania wymiennikiem, z użyciem regulatorów rozmytych typu PI, gdzie również subiektywnie można powiedzieć, że zmiana kształtu funkcji przynależności oraz częściowa modyfikacja bazy reguł, wpłynęła na poprawę jakości regulacji.

Wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, mają duży wpływ na stabilizowanie się temperatury wody $T_{2out}(t)$ na wyjściu wymiennika. Powiększenie bazy reguł w przypadku regulatorów rozmytych typu P oraz zmiana kształtu funkcji przynależności w przypadku regulatorów rozmytych typu PI, nie jest w stanie całkowicie zniwelować wpływu danej wielkości zakłócającej. Wynika to z charakteru wymiennika ciepła, który odpowiada dosyć wolno na zmiany przepływu wody ogrzewającej $\Delta\dot{V}_1(t)$, przez co regulator nie jest w stanie odpowiednio szybko zareagować na zmiany temperatury wody wodociągowej.

Punkt pracy (wartość temperatury zadanej $T_{zad}(t)$), ma wpływ na jakość regulacji danego regulatora rozmytego. Dla niektórych wartości, temperatura wylotowa wody $T_{2out}(t)$ charakteryzuje się mniejszym uchybem $e(n)$ (regulatory typu P) lub mniejszymi oscylacjami wokół wartości zadanej (regulatory typu PI). Przyczyną tego stanu rzeczy, jest prawdopodobnie fakt projektowania regulatorów w oparciu o uproszczony, liniowy model wymiennika, podczas gdy rzeczywisty wymiennik ciepła jest obiektem nieliniowym o parametrach rozłożonych. Dobrane w ten sposób parametry regulatora, okazują się lepiej dobrane dla jednego, a gorzej dobrane dla innego punktu pracy.

W przypadku danego wymiennika ciepła, dla etapu chłodzenia lepiej sprawdza się całkowite zatrzymanie pompy (regulatory typu PI) niż podtrzymywanie jej działania na najmniejszych możliwych obrotach (regulatory typu P).

7. Ocena jakości regulacji

Jakość regulacji, zastosowanych regulatorów rozmytych można ocenić na podstawie określonych kryteriów jakości regulacji takich jak np.: wskaźniki częstotliwościowe (charakterystyki Nyquista i Bodego) lub wskaźniki wynikające z odpowiedzi skokowej (czas regulacji, przeregulowanie). Często wykorzystywanymi kryteriami są kryteria całkowite, oparte w główne mierze na zmianach sygnału uchybu.

7.1. Całkowe kryteria jakości regulacji

Wyniki badań w rozdziale 6, należy ocenić pod względem jakości regulacji. Występujące do tej pory analizy, nie pozwalały jednoznacznie stwierdzić, które z zastosowanych regulatorów charakteryzują się lepszą jakością regulacji w czasie trwania całego badania.

Do oceny jakości regulacji, wykorzystano dwa popularne kryteria całkowite [12]:

- całka z kwadratu sygnału uchybu:

$$I_2 = \int_0^{\infty} [\varepsilon_n(t)]^2 dt, \quad (7.1)$$

- całka z bezwzględnej wartości sygnału uchybu:

$$I_3 = \int_0^{\infty} |\varepsilon_n(t)| dt, \quad (7.2)$$

gdzie,

$\varepsilon_n(t)$ – wartość sygnału uchybu.

Im mniejsza wartość wskaźnika 7.1 lub 7.2, tym układ charakteryzuje się lepszą jakością regulacji. W badaniach oceny jakości regulacji, wykorzystano także zmodyfikowaną wersję wskaźnika całkowitego 7.1., gdzie wzięto pod uwagę także zmiany sygnału sterującego, czyli funkcję kosztu sterowania pod postacią [6]:

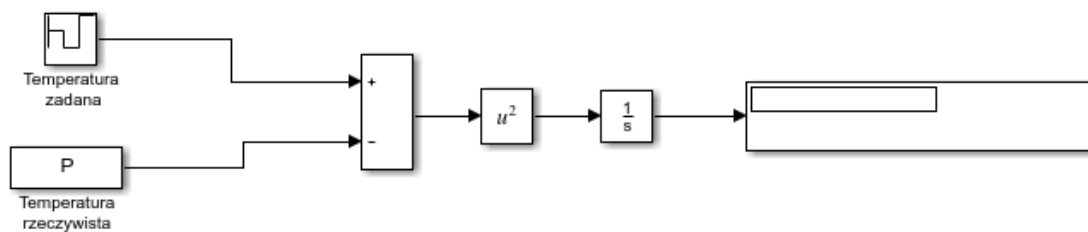
$$I_{ES} = \int_0^{\infty} [\varepsilon_n^2(t) + \alpha^2 u^2(t)] dt, \quad (7.3)$$

gdzie,

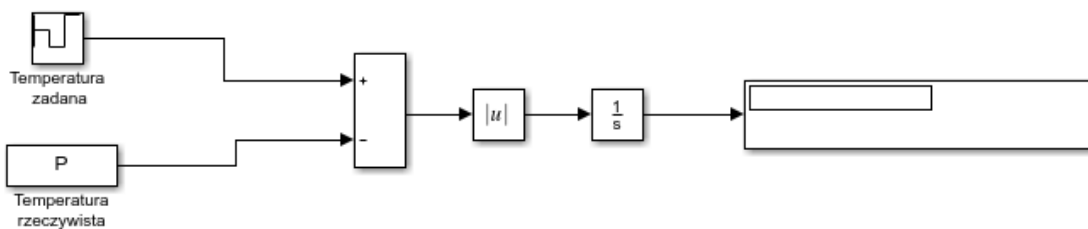
α – parametr reprezentujący wpływ sygnału sterującego na jakość regulacji,

$u(t)$ – funkcja sterująca, gdzie $t \in [0, \infty]$.

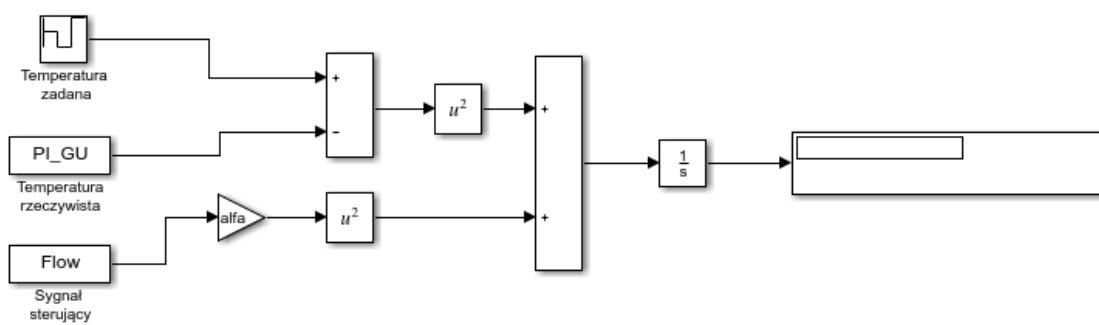
Funkcja kosztu sterowania oznacza, że przy ocenie jakości regulacji uwzględniana jest również ilość zużytej energii dla uzyskania danego efektu sterowania.



Rys. 7.1. Układ do badania jakości regulacji
na podstawie całki z kwadratu sygnału uchybu



Rys. 7.2. Układ do badania jakości regulacji
na podstawie całki z wartości bezwzględnej sygnału uchybu



Rys. 7.3. Układ do badania jakości regulacji
na podstawie całki z sumy kwadratu sygnału uchybu i kwadratu sygnału sterującego.

Wartości poszczególnych kryteriów jakości regulacji, były obliczane za pomocą układów na rysunkach 7.1., 7.2. i 7.3. zbudowanych w bibliotece *Simulink* będącego częścią programu *Matlab*. Dla wskaźnika całkowego 7.3, parametr α zainicjalizowano wartością 1.

Tab. 7.1. Wyniki oceny jakości regulacji

Typ regulatora \ Kryterium	$\int_0^{\infty} [\varepsilon_n(t)]^2 dt$	$\int_0^{\infty} \varepsilon_n(t) dt$	$\int_0^{\infty} (\varepsilon_n^2(t) + \alpha^2 u^2(t)) dt$
Regulator rozmyty typu P podstawowy	34209	13775	41537
Regulator rozmyty typu P rozszerzony	29297	11989	39801
Regulator rozmyty typu PI podstawowy	25902	9477	38410
Regulator rozmyty typu PI zmodyfikowany	17710	7779	30417

Tabela 7.1. zawiera obliczone wskaźniki jakości regulacji dla poszczególnych regulatorów rozmytych. Na ich podstawie można stwierdzić, że najslabszą jakością regulacji, charakteryzuje się regulator rozmyty typu P w wersji podstawowej. Dla wszystkich wykorzystywanych kryteriów, wartość wskaźników jest dla niego największa. Jakość regulacji regulatora rozmytego typu P w wersji rozszerzonej, gdzie powiększono bazę reguł w stosunku do wersji podstawowej, uległa poprawie (wszystkie wskaźniki uległy zmniejszeniu). Z kolei, zastosowanie regulatora rozmytego typu PI w wersji podstawowej, ze względu na człon całkujący, zlikwidowało występowanie zjawiska uchybu statycznego w procesie regulacji, przez co jakość regulacji uległa znacznej poprawie (mniejsze wskaźniki dla wszystkich kryteriów, niż w przypadku regulatorów rozmytych typu P). Najlepszą jakością regulacji charakteryzuje się regulator rozmyty typu PI zmodyfikowany, gdzie wskaźniki jakości regulacji mają najmniejszą wartość w całym zestawieniu. Wynika to ze zmiany kształtu funkcji przynależności, w systemach rozmytych oraz zastosowania spójników OR zamiast AND w wybranych regułach, dzięki czemu zmniejszono wielkość oscylacji dla wielkości sterowanej.

8. Podsumowanie

Uzyskane w pracy wyniki automatycznej regulacji wymiennikiem ciepła pokazały, że na podstawie jego uproszczonego modelu, można zbudować skutecznie działające regulatory rozmyte. Na podstawie wyników badań oraz oceny jakości regulacji, jednoznacznie stwierdzono, że powiększenie bazy reguł, zmiana funkcji aktywacji niektórych z nich oraz zmiana kształtu funkcji przynależności, może wpłynąć na poprawę jakość regulacji temperatury wody wyjściowej $T_{2out}(t)$ wymiennika ciepła.

Zastosowane regulatory rozmyte charakteryzują się lepszą jakością regulacji dla obiektów nieliniowych, niż regulatory klasyczne. Raz ustawione, parametry danego regulatora klasycznego są stałe i niezmiennie dla każdego punktu pracy układu regulacji. Z kolei parametry regulatora rozmytego są zmienne i w przypadku danego wymiennika ciepła, zależą od aktualnej temperatury zadanej wody $T_{zad}(t)$ mającej być utrzymywanej na jego wyjściu. Dzięki temu regulatory rozmyte są bardziej elastyczne i pomimo drobnych różnic w danych punktach pracy wynikających z uproszczonych metod projektowania, skutecznie dostosowują dla nich wartość sterującą i uzyskują podobną jakość regulacji dla każdej wartości zadanej.

Niestety, jakość regulacji jest silnie uzależniona od wpływu wielkości zakłócającej, jaką są wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$, doprowadzanej do wymiennika ciepła. Wymiennik ciepła, który jest obiektem o dużej bezwładności cieplnej odpowiada zbyt wolno, aby regulator na podstawie udostępnionych mu wielkości, odpowiednio szybko zmieniał sygnał sterujący i zniwelował oddziaływanie zakłócenia. W obecnej sytuacji, w celu uzyskania znaczącej poprawy jakości regulacji, należy zastosować element stabilizujący temperaturę wody wodociągowej.

Nie w każdym przypadku istnieje możliwość zastosowania elementu lub układu, który zapewniał by idealną temperaturę wlotową cieczy do wymiennika ciepła. Dalszy rozwój pracy można oprzeć o zmodyfikowanie układu regulacji w taki sposób, aby odpowiednio wcześniej uwzględnione zostały wahania temperatury wody wodociągowej $T_{2in}(t)$. Można to zrealizować po przez zbudowanie dodatkowego regulatora pomocniczego, podłączonego równolegle w stosunku do regulatora głównego. Sygnałem wejściowym byłyby wahania temperatury wody wlotowej $T_{2in}(t)$ wymiennika ciepła, uzyskiwane z czujnika temperatury umieszczonego bezpośrednio na wejściu obiegu wody ogrzewanej.

Wielkością wyjściową, byłaby korekta wartości przepływu o pewną wartość, zależną od aktualnej temperatury wody wpływającej do wymiennika ciepła. Uzyskana korekta przepływu, byłaby sumowana z wartością przepływu, zadawaną przez główny regulator. W ten sposób układ regulacji odpowiednio szybko uzyskiwałby informacje, o występującym zakłóceniu i mógłby zareagować z pewnym wyprzedzeniem, dzięki czemu rola bezwładności obiektu, a co za tym idzie wpływ zakłóceń zostałby zmniejszony, a jakość regulacji uległaby poprawie.

Taki układ regulacji w literaturze występuje pod nazwą *Feed-Forward Control*. Jest on stosowany w przypadku, gdy główny regulator nie jest w stanie zapewnić odpowiedniej jakości regulacji na wskutek znacznych zakłóceń jego wielkości wejściowej [16].

Pomimo czasochłonnego projektowania regulatorów rozmytych, ich prawidłowe zbudowanie z pewnością gwarantuje odpowiednią jakość regulacji w procesach, których przebieg jest silnie nieliniowych i występują duże trudności z dobraniem optymalnych nastaw dla regulatorów klasycznych. Jeśli taki system zostanie zrealizowany w oparciu o sterownik PLC, możliwość jego wykorzystania gwałtownie rośnie, dzięki czemu może znaleźć zastosowanie w wielu procesach przemysłowych.

Literatura

- [1] Bartecki K.: *Metody sztucznej inteligencji w automatyce – wykłady*. <https://k.bartecki.po.opole.pl/> – październik 2019.
- [2] Bartecki K.: *Sterowanie procesami ciągłymi – wykłady*. <https://k.bartecki.po.opole.pl/> – styczeń 2020.
- [3] Brodowicz K.: *Teoria wymienników ciepła i masy*. PWN, Warszawa, 1982.
- [4] Jantzen J.: *Foundations of Fuzzy Control*. John Wiley & Sons, 2007.
- [5] Jaworowska M.: *Logika rozmyta*. <https://automatykab2b.pl/technika/39502-logika-rozmyta> – styczeń 2020.
- [6] Larminat P., Thomas Y.: *Automatyka – układy liniowe. Tom 3, Sterowanie*. WNT, Warszawa, 1983.
- [7] Piekarski M., Poniewski M.: *Dynamika i sterowanie procesami wymiany ciepła i masy*. WNT, Warszawa, 1994.
- [8] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Łódź, 1997.
- [9] Rykaczewski K.: *Systemy rozmyte i ich zastosowania*. <https://fulmanski.pl/zajecia/ssn/materialy/duszek.pdf>, – maj 2019.
- [10] *Computer Controlled Heat Exchangers Training System*. Katalog firmy Edibon, 2019.
- [11] <https://www.secespol.com/produkty/wymienniki-ciepła/plaszczowo-rurowe/struktura-w-rurze.html> – listopad 2019.
- [12] <http://home.agh.edu.pl/~pautom/pliki/wyklady/przykladowe/09.pdf> – listopad 2019.
- [13] <https://stalesia.com/u-rury> – grudzień 2019.
- [14] http://www.cs.put.poznan.pl/rklaus/logika_rozmyta/pliki/struktura.htm – styczeń 2020.
- [15] <http://automatyka.kia.prz.edu.pl/attachments/article/9/Identyfikacja%20obiekt%C3%B3w.pdf> – styczeń 2020.
- [16] <http://home.agh.edu.pl/~pautom/pliki/wyklady/przykladowe/01.pdf> – styczeń 2020.