

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Krzysztof Liszewski

**Analiza porównawcza regulatora PID oraz regulatorów
wykorzystujących model procesu do sterowania temperaturą procesu
przemysłowego.**

Kierownik pracy:

prof. nzw. dr hab. inż. Wiesław Winiński

Ocena

.....

Podpis Przewodniczącego

Komisji Egzaminu Dyplomowego

Specjalność: Radiokomunikacja i techniki
multimedialne.

Data urodzenia: 25 kwiecień 1987

Data rozpoczęcia studiów: 1 październik 2006

Życiorys

Urodziłem się 25 kwietnia 1987r. w Łomży. W latach 1999-2003 uczęszczałem do Gimnazjum nr 6 w Łomży. Następnie kontynuowałem naukę w I Liceum Ogólnokształcącym w Łomży. W roku 2006 rozpocząłem studia wyższe na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. W roku 2008, po ukończeniu czwartego semestru studiów, wybrałem specjalność Radiokomunikacja i techniki multimedialne.

.....
podpis

Egzamin Dyplomowy

Złożył egzamin dyplomowy w dniu.....

z wynikiem.....

Ogólny wynik studiów.....

Dodatkowe wnioski i uwagi komisji.....

.....

.....

Streszczenie

Celem niniejszej pracy dyplomowej jest wykonanie systemu regulacji wartością temperatury w symulowanym procesie. Aplikacja została zrealizowana za pomocą oprogramowania Proficy HMI/SCADA iFix 4.0 oraz pakietu Matlab. W układzie regulacji zastosowano regulator mikroprocesorowy LB-600 firmy LAB-EL. W dalszej części pracy została przeprowadzona analiza porównawcza regulatorów PID i regulatorów wykorzystujących model procesu. Przedstawione zostały także możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do modelowania obiektu w problemach sterowania.

Comparative analysis of a PID and model based controllers for temperature control of an industrial process.

Summary

The main aim of the diploma thesis was to design a temperature controlling system in a simulated process. The application was developed using Proficy HMI/SCADA iFIX 4.0 and Matlab software. In the regulation system, the microprocessor controller LB-600 produced by LAB-EL company, was used. In the further part of the thesis a comparative analysis of the PID and Model Based Control algorithms was carried out. Additionally, possibilities of artificial neural networks which can be used to modeling of object in controlling systems were presented.

Spis treści

CEL I ZAKRES PRACY	5
WSTĘP	6
1 ANALIZA ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ	8
1.1 REGULACJA DWUSTAWNA	8
1.2 REGULACJA PID	9
1.3 REGULACJA ROZMYTA	10
1.4 REGULACJA Z WYKORZYSTANIEM MODELU PROCESU.....	11
1.5 POSUMOWANIE PRZEPROWADZONEGO PRZEGLĄDU ROZWIĄZAŃ.....	12
2 PODSTAWY TEORETYCZNE	13
2.1 REGULATOR PID.....	13
2.2 REGULACJA IMC (INTERNAL MODEL CONTROL).....	16
2.3 STRUKTURA DWUPĘTLOWA MFC (MODEL FOLLOWING CONTROL).....	18
2.4 IDENTYFIKACJA OBIEKTU ZA POMOCĄ SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH.....	21
3 PRZEBIEG PRZEPROWADZONEJ ANALIZY PORÓWNAWCZEJ	28
4 OPIS ZREALIZOWANEGO UKŁADU REGULACJI	29
5 ANALIZA PORÓWNAWCZA DZIAŁANIA REGULATORÓW PID I MBC (MODEL BASED CONTROL)	36
5.1 WYNIKI ANALIZY	36
5.2 WNIOSKI	45
6 PODSUMOWANIE	47
7 BIBLIOGRAFIA	49

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest realizacja aplikacji i porównanie działania regulatorów PID i MBC (Model Based Control) sterujących temperaturą w symulowanym procesie. Przeprowadzona została także analiza regulatorów na podstawie danych z procesowej bazy danych procesu przemysłowego w rzeczywistym obiekcie. Dodatkowo przedstawiono możliwość wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do modelowania obiektu dynamicznego.

Zakres pracy:

- analiza sposobów regulacji temperatury w pomieszczeniach i procesach przemysłowych
- przedstawienie zasady działania regulatorów PID i MBC (Model Based Control)
- przegląd struktur sztucznych sieci neuronowych do modelowania obiektów
- analiza możliwości zastosowania regulatora LB-600 w realizowanej aplikacji
- wykonanie aplikacji sterującej wartością temperatury z wykorzystaniem regulatora LB-600
- porównanie regulatorów PID i MBC (Model Based Control) na podstawie przygotowanych danych

Wstęp

Sterowanie to oddziaływanie na obiekt w taki sposób, aby doprowadzić do osiągnięcia określonego celu. Celem sterowania może być utrzymanie pożądanej temperatury w pomieszczeniu lub procesie produkcyjnym. Zadanie osiągnięcia określonej temperatury może być realizowane za pomocą różnych rozwiązań.

Najczęściej regulacja temperatury jest realizowana w oparciu o pewną wiedzę i informacje o obiekcie. Parametry opisujące proces umożliwiają dostrojenie regulatora do konkretnego procesu. Należy jednak zaznaczyć, że większość procesów technologicznych wraz z upływem czasu zmienia swoją dynamikę. Zatem raz wyznaczony opis procesu może być nieadekwatny w innych warunkach pracy, ponieważ w rzeczywistości obiekty charakteryzują się niestacjonarnością. Przykładem może być ogrzewanie pomieszczenia w różnych porach roku. Zmienne warunki atmosferyczne w ciągu roku decydują o zmienności modelu termodynamicznego obiektu, czyli ogrzewanego pomieszczenia. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie kilku modeli opisujących sterowany proces. Należy wtedy przeprowadzać przełączanie aktualnego modelu w zależności od warunków pracy. Zmiana opisu sterowanego procesu wiąże się wtedy ze zmianą parametrów regulatora.

Jednak na określony przez użytkownika obiekt wpływa nie tylko zamierzone sterowanie. W projektowaniu systemów sterowania należy także uwzględnić wpływ czynników, które mają charakter przypadkowy i niekontrolowany oraz utrudniają sterowanie. W przypadku sterowania z wykorzystaniem informacji o modelu, istnieje możliwość tłumienia wpływu zakłóceń na obiekt.

Zastosowanie sterowania z uwzględnieniem modelu pozwala na uzyskanie lepszych wskaźników jakości regulacji. Opis liniowy jest jedynie przybliżeniem informacji o procesie. Trudność budowy modelu matematycznego obiektu wynika ze wzajemnego wpływu i zależności pomiędzy zmiennymi opisującymi model. Jedną z metod umożliwiających poprawę jakości regulacji jest wykorzystanie sztucznej inteligencji i sieci neuronowych. Sieci neuronowe pozwalają na aproksymację dowolnej nieliniowej funkcji z określonym kryterium dokładności aproksymacji. Drugą właściwością tego rozwiązania jest zdolność uczenia sieci neuronowej. Trening sieci może być przeprowadzony na podstawie istniejących danych wejściowo-wyjściowych procesu. Można wtedy uzyskać

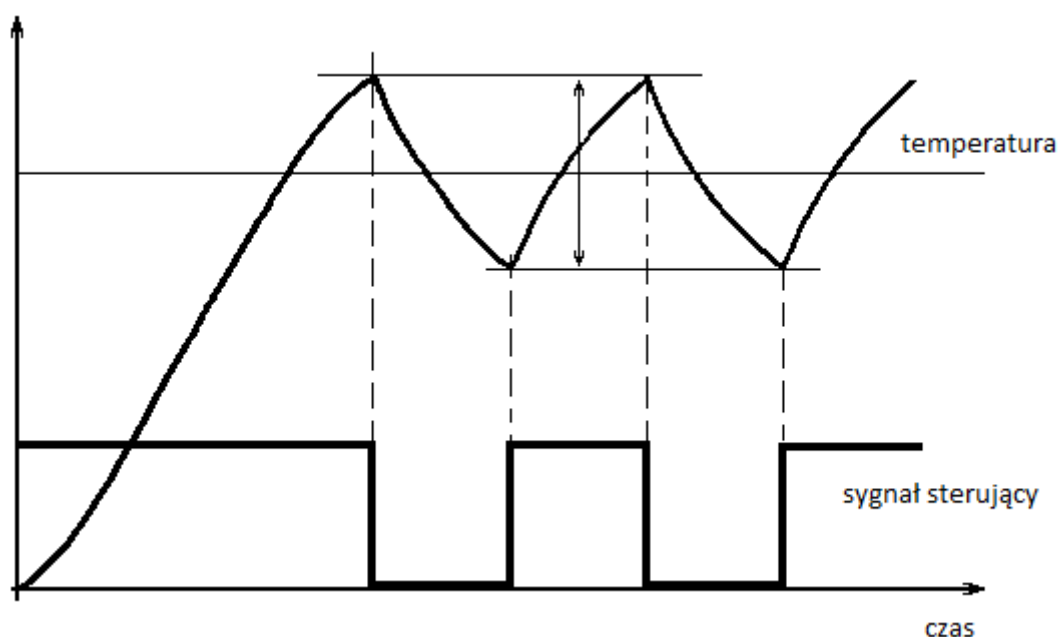
opis modelu w postaci „czarnej skrzynki”. Uczenie sieci neuronowej może być także realizowane w trakcie sterowania, czyli na bieżąco jest realizowane sterowanie i adaptacja do aktualnych warunków pracy.

Sterowanie parametrami termodynamicznymi powietrza, w szczególności temperatury powietrza, w pomieszczeniach i procesach przemysłowych jest ważnym zagadnieniem w zastosowaniach inżynierskich i agrotechnicznych. Modyfikacja i wprowadzanie nowych rozwiązań w regulacji pozwala na optymalizację kosztów produkcji i magazynowania produktów.

1 Analiza istniejących rozwiązań

1.1 Regulacja dwustawna

Jednym z prostszych sposobów automatycznej regulacji temperatury jest regulacja dwustawna. Rozwiązanie to jest stosowane w obiektach, w których należy utrzymać określoną wartość temperatury niezależnie od zakłóceń. Zasada działania regulacji dwustawnej oraz jej modyfikacje zostały opisane w (Skoczowski, 2000) (Visioli, 2006). Sygnał sterujący w regulacji dwupołożeniowej jest nieciągły, ponieważ może przyjmować tylko dwie wartości. Korzyścią ze stosowania tego rodzaju regulacji jest fakt, iż jest to rozwiązanie proste i niezawodne. Zastosowanie regulacji dwustawnej wiąże się z występowaniem oscylacji wielkości regulowanej oraz przełączaniem elementu wykonawczego. Na wyjściu regulatora uzyskujemy ciąg impulsów sterujących dodatnich (jeżeli $e > N$). Gdy różnica między wartością zadaną i aktualnie zmierzoną – e jest mniejsza od szerokości strefy nieczułości to sygnał sterujący ma wartość zerową. Zasada działania regulacji trójstawnej jest identyczna, wyjątkiem jest możliwość przyjmowania przez sygnał sterujący trzech określonych wartości.



Rysunek 1 Przebieg zmian temperatury i sygnału sterującego podczas regulacji dwustawnej.

1.2 Regulacja PID

Regulator PID jest najczęściej wykorzystywany w praktycznych zastosowaniach. W rozwiązaniu tym sygnał sterujący jest sumą trzech bloków funkcyjnych: mnożenia, całkowania i różniczkowania. Stąd też nazwa regulatora Proportional Integral Differential. Argumentem tych operacji jest różnica między wartością zadaną i aktualnie zmierzoną.

Najprostszą konfiguracją jest regulator proporcjonalny, w tym przypadku sterowanie jest proporcjonalne do różnicy temperatury pożądanej i mierzonej. Jednak ten sposób regulacji charakteryzuje się długim czasem regulacji i prowadzi do istnienia określonego uchybu ustalonego, czyli temperatura w stanie ustalonym różni się od zadanej. Rozwiązaniem pierwszego problemu może być zastosowanie operacji różniczkowania. Sumowanie sygnału proporcjonalnego i pochodnej różnicy temperatur zwiększa wzmocnienie sterowania i prowadzi do krótszego czasu regulacji. Zastosowanie regulatora PID w pełnej konfiguracji zapewnia dodatkowo eliminację różnicy temperatur w stanie ustalonym. Funkcja całkowania w stanach ustalonych pozwala na doprowadzenie do równości temperatur pożądanej i ustalonej.

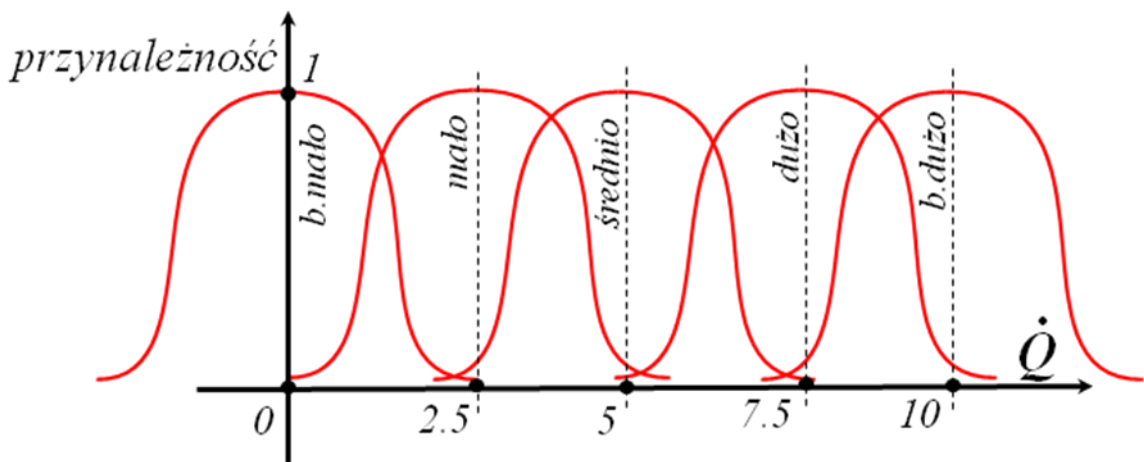
Regulacja PID pozwala osiągnąć dobrą jakość sterowania przy założeniu, że parametry trzech operacji K_P , K_I , K_D są właściwie dobrane. Wybór parametrów wynika z opisu dynamiki danego procesu. Jednak nieprawidłowy dobór parametrów może znacząco pogorszyć jakość sterowania. Pomimo istnienia określonych metod doboru ustawień regulatora, należy metodą prób i błędów sprawdzić jakie będą efekty przy użyciu otrzymanych parametrów. Dodatkowym problemem jest fakt, iż podczas pracy często nie można pozwolić na eksperymentowanie podczas doboru parametrów, ponieważ wpływa to na wymierne straty produkcji.

Najczęściej raz dobrane parametry nie są zmieniane w czasie pracy, nawet przy działaniu w różnych warunkach. Jest to rozwiązanie akceptowalne pod warunkiem stacjonarności obiektu. W rzeczywistości opis obiektu zmienia się z czasem w wyniku pracy w różnych warunkach.

1.3 Regulacja rozmyta

Sterowanie z wykorzystaniem regulatora PID w przypadku przybliżenia modelem liniowym obiektu nieliniowego nie pozwala osiągnąć regulacji optymalnej w szerokim zakresie zmienności. Według (Tatjewski, 2002) rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie logiki i zbiorów rozmytych.

Metoda ta polega na opisie przynależności elementu do zbioru rozmytego za pomocą funkcji przynależności.



Rysunek 2 Funkcja przynależności.

Funkcja przynależności przyjmuje wartości z przedziału $\langle 0; 1 \rangle$. Zatem jeden element może należeć do dwóch zbiorów jednocześnie z określonym stopniem przynależności. Operowanie na zbiorach rozmytych umożliwia stosowanie zmiennej lingwistycznej. Przykładowo zmienna temperatura może przyjmować dwie wartości ze zbioru $\{ 'niska'; 'wysoka' \}$. Wartości zmiennej opisują dwa zbiory rozmyte z wykorzystaniem dwóch funkcji przynależności.

Zmienne rozmyte pozwalają opisać procesy w sposób bardziej zrozumiały. Na podstawie opisu za pomocą logiki rozmytej można zbudować zbiór reguł. Regułę można zapisać w następujący sposób:

Jeśli $\langle poprzednik \rangle$ To $\langle następnik \rangle$

Przykładem zastosowania powyższej reguły jest: „Jeśli temperatura jest niska To zwiększ ogrzewanie dużo”. Zbiór tak utworzonych reguł tworzy bazę wiedzy o obiekcie.

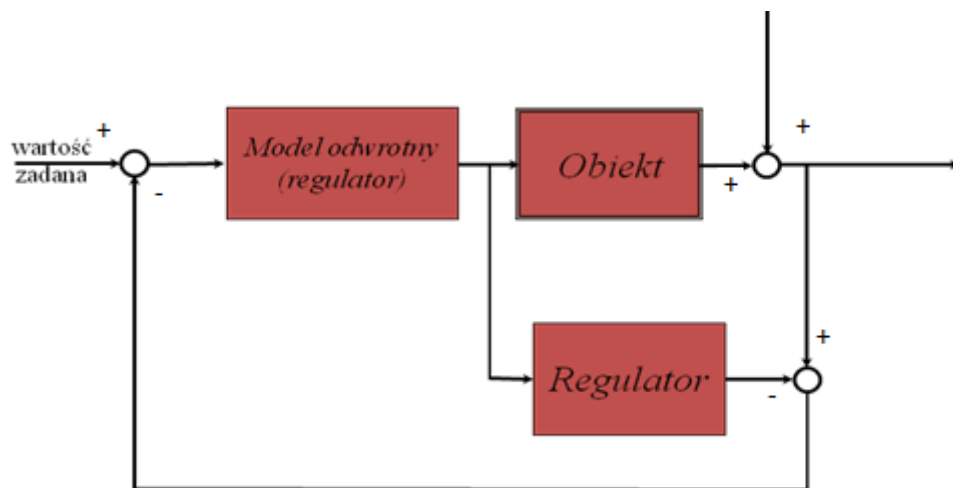
Rozwiązanie to pozwala na sterowanie obiektem nieliniowym za pomocą funkcji liniowych. Można stworzyć zbiór reguł o postaci:

$$\text{Jeśli } \langle x - \text{zmienna lingistyczna} \rangle \text{ To } \langle y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rangle$$

Utworzenie zbioru powyższych reguł umożliwia stosowanie różnych funkcji sterujących lub parametrów regulatora, gdy x należy do poszczególnych zbiorów rozmytych.

1.4 Regulacja z wykorzystaniem modelu procesu

Sterowanie wykorzystujące do wyznaczenia sygnału sterującego informacje o modelu obiektu jest nazywane Model Based Control. Rozwiązanie to umożliwia osiągnięcie pożądanej jakości regulacji przy uwzględnieniu istniejących zakłóceń. Wśród algorytmów sterowania z modelem procesu można wyróżnić Internal Model Control (IMC) oraz Model Following Control. Schemat regulatora z modelem wewnętrznym procesu został przedstawiony poniżej. Zastosowanie modelu obiektu sterowanego umożliwia estymację wpływu zakłóceń. Szczegóły dotyczące regulacji IMC oraz MFC zostaną omówione w następnym rozdziale.



Rysunek 3 Schemat regulatora IMC.

1.5 Posumowanie przeprowadzonego przeglądu rozwiązań

Podstawowym zadaniem regulacji jest modyfikacja wartości sygnału sterującego na podstawie informacji wynikających ze zmierzonych parametrów opisujących proces. Zastosowanie modelu procesu do celu sterowania pozwala szybciej reagować na zakłócenia (Coleman, i inni, 2002). Dodatkowa wiedza o obiekcie zwiększa efektywność i jakość sterowania. W niniejszej pracy zostaną przedstawione metody tradycyjnej regulacji. Następnie zostanie omówiona regulacja z wykorzystaniem modelu procesu oraz korzyści wynikające z zastosowania tego rozwiązania.

2 Podstawy teoretyczne

2.1 Regulator PID

Mimo ciągłego rozwoju nowych metod sterowania regulator PID jest wciąż stosowany w wielu gałęziach przemysłu. Głównym czynnikiem decydującym o jakości otrzymanej regulacji jest wybór parametrów regulatora PID. Stąd też wynika liczba publikacji dotyczących różnych metod doboru parametrów regulatora. Rozważane są także możliwości rozszerzenia funkcjonalności regulatora w celu osiągnięcia niezawodności działania.

Zasada działania

Regulator to układ o transmitancji $G_C(s)$, który w systemie automatycznej regulacji powinien wytworzyć odpowiedni sygnał $u(t)$ sterujący obiektem. W przypadku regulatora PID sygnał sterujący jest sumą trzech operacji matematycznych, których argumentem jest wartość uchybu czyli różnica między wartością zadaną i aktualną wartością zmiennej regulowanej.

Sygnał sterujący $u(t)$ jest proporcjonalny do aktualnej wartości uchybu. Zatem działanie członu proporcjonalnego można opisać za pomocą wzoru (1).

$$u(t) = K_P * e(t) = K_P * [r(t) - y(t)] \quad (1)$$

Parametr K_P jest wzmocnieniem proporcjonalnym. Działanie regulatora składającego się z członu proporcjonalnego polega na tym, że im większa jest wartość uchybu tym większa jest wartość sygnału sterującego. Przewaga tego regulatora w porównaniu ze sterowaniem dwupołożeniowym wynika z faktu, iż dla małych wartości uchybu amplituda sygnału sterującego jest także mniejsza. Wadą regulatora składającego się z członu proporcjonalnego jest brak reakcji na istnienie uchybu w stanie ustalonym.

Rozwiązaniem pozwalającym wyeliminować powyższą wadę jest wprowadzenie członu całkującego, który opisuje wzór (2).

$$u(t) = K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2)$$

Wartość sygnału sterującego dla członu całkującego jest zależna od wartości uchybu w chwilach poprzedzających dany moment czasowy. Operacja całkowania pozwala zredukować do zera wartość uchybu w stanie ustalonym. Wykorzystanie dwóch członów proporcjonalnego i całkującego nazywane jest regulatorem PI. Transmittancję operatorową powyższego regulatora można opisać wzorem (3).

$$G_R(s) = K_P * \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3)$$

Regulacja PI rozwiązuje problem istnienia uchybu ustalonego w stanach ustalonych.

Ostatnim członem wykorzystanym w regulacji PID jest człon różniczkujący. Operację tą można opisać równaniem (4).

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Aby wyjaśnić wpływ operacji różniczkowania w regulacji można przedstawić pierwsze dwa wyrazy rozwinięcia wartości uchybu w szereg Taylora (Visioli, 2006).

$$e(t + T_d) \cong e(t) + T_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Można więc stwierdzić, że operacja różniczkowania uwzględnia estymowane w chwilach następnycy wartości uchybu. Umożliwia to reakcje regulatora na nieprawidłowe trendy w przebiegu uchybu. Człon ten realizuje kompensację wysokoczęstotliwościową przy skokach wartości zadanej oraz w stanach przejściowych.

Idealny i ciągły regulator PID działa zgodnie z równaniem (6).

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

Podany zapis można przedstawić także w formie transmittancji (7).

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (7)$$

Metoda Zieglera Nicholosa – strojenie regulatora PID

Najistotniejszym problemem, który należy rozwiązać przy projektowaniu regulatora PID jest optymalny dobór parametrów dla danego procesu. Efektem poprawnie dobranych wartości K_p K_i K_d jest prawidłowe działanie regulatora. Istnieją metody

strojenia polegające na obliczeniu wartości, które minimalizują określony wskaźnik jakości regulacji.

Jednym z najbardziej popularnych sposobów strojenia regulatora PID jest metoda Zieglera – Nicholasa. Istnieją dwie wersje tej metody oparte na identyfikacji obiektu (Horla, 2003).

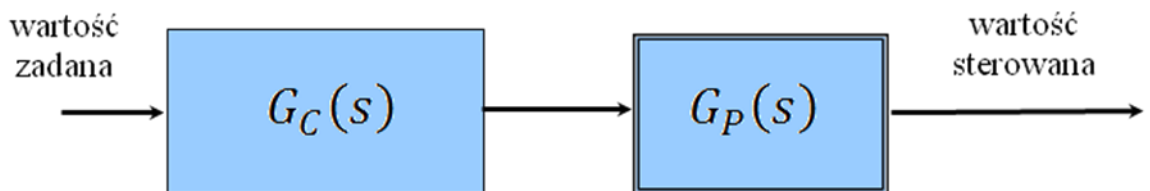
- Pierwszy sposób wykorzystuje odpowiedź obiektu regulacji na skok jednostkowy. Dysponując odpowiedzią obiektu można wykreślić styczną w punkcie o największym nachyleniu przebiegu oraz wyznaczyć stałą czasową opóźnienia. Określenie powyższych parametrów czyli wartość kąta nachylenia stycznej oraz stałej czasowej opóźnienia umożliwia wyznaczenie parametrów.
- Druga metoda polega na badaniu układu regulacji wykorzystującego tylko człon proporcjonalny. Należy stopniowo zwiększać wzmocnienie do momentu, gdy w układzie wystąpią drgania niegasnące. Układ podczas wystąpienia drgań niegasnących jest w stanie granicy stabilności. Następnie na podstawie ustawionego wzmocnienia, dla którego wystąpiły drgania niegasnące oraz okresu oscylacji wyznacza się parametry regulatora.

2.2 Regulacja IMC (Internal Model Control)

Zasada działania

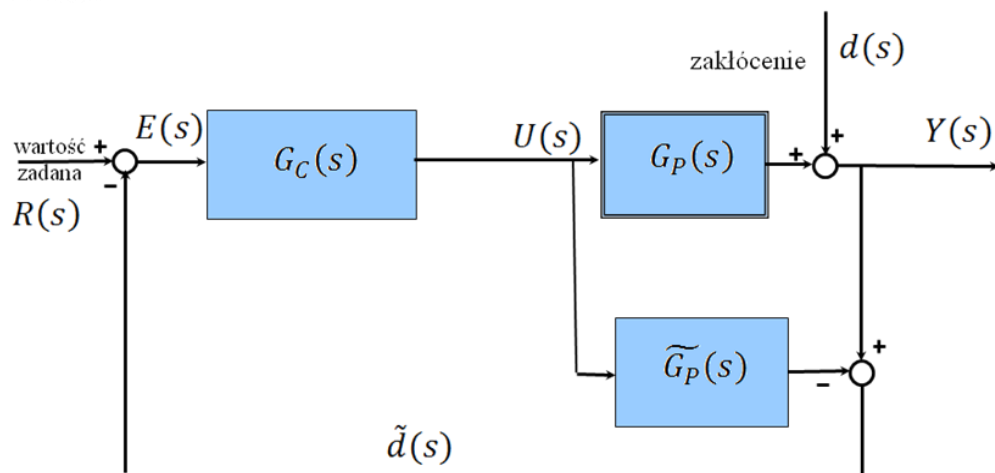
Internal Model Control (IMC) to sterowanie wykorzystujące wewnętrzny model procesu. Przy założeniu, że regulator jest dokładną aproksymacją odwrotności rzeczywistego procesu, wyjście układu będzie zawsze równe wartości zadanej. Jednak zaprojektowanie regulatora, który jest dokładną odwrotnością procesu jest nie zawsze nierealizowalne (Skoczowski, i inni, 2006).

$$G_C(s) = G_P(s)^{-1} \quad (8)$$



Rysunek 4 Regulator w postaci modelu odwrotnego.

Zastosowanie pętli sprzężenia zwrotnego jest konieczne w przypadku, gdy model procesu jest niedokładny lub niekompletny. Układ z pętlą zwrotną eliminuje w pewnym zakresie skutki niedokładnego modelu oraz zwiększa odporność układu na zakłócenia oraz szum wpływające na obiekt sterowania.



Rysunek 5 Regulator IMC z pętlą sprzężenia zwrotnego.

Opis oznaczeń zastosowanych na Rys.5:

$d(s)$ – nieznane zakłócenie wpływające na obiekt

$U(s)$ – sygnał sterujący

$Y(s)$ – odpowiedź układu

$\tilde{d}(s)$ – różnica odpowiedzi układu oraz modelu układu.

Sygnał $\tilde{d}(s)$ niesie informację, która została pominięta w modelu procesu oraz wpływ zewnętrznych zakłóceń działających na sterowany obiekt. W przypadku gdy odpowiedź układu i modelu są jednakowe $\tilde{d}(s)$ pozwala na eliminację zakłóceń w układzie sterowania. Na podstawie schematu regulatora IMC można zapisać równanie (9) (Skoczowski, i inni, 2006).

$$y = r \frac{G_c G_P}{1 + G_c(G_P - \tilde{G}_P)} + d \frac{1 - G_c \tilde{G}_P}{1 + G_c(G_P - \tilde{G}_P)} \quad (9)$$

Zastosowanie filtra dolnoprzepustowego

Filtr dolnoprzepustowy w regulacji IMC jest stosowany w celu ograniczenia wzmocnienia szumu oraz zmniejszenia skutków błędów wynikających z modelowania procesu. Aby uniknąć nadmiernego wzmocnienia szumu należy ograniczyć wzmocnienie regulatora dla dużych częstotliwości. Można dobrać dodatkowy parametr regulatora, dla którego wzmocnienie dla dużych częstotliwości regulatora będzie co najwyżej 20 razy większe niż dla niskich częstotliwości (Coleman, i inni, 2002).

$$\frac{G_c(\infty)}{G_c(0)} \leq 20 \quad (10)$$

Równanie (10) wynika z zasady ograniczenia wzmocnienia dla wyższych częstotliwości stosowanej przy projektowaniu tradycyjnej regulacji PID. Załóżmy, że transmitancja określonego procesu ma postać (11).

$$G_p(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (11)$$

Niech $N(s)$ nie posiada zer w prawej połówce wykresu zespolonego lub posiada zera występujące blisko osi urojonej. Dodatkowo założmy, że model procesu jest odwracalny oraz stabilny. Wtedy można zapisać równanie (12) określające transmitancję regulatora IMC.

$$G_c(s) = \frac{D(s)}{N(s)(\lambda s + 1)^n} \quad (12)$$

Równanie (13) opisujące regulator składa się z czynnika określającego model odwrotny procesu oraz filtra dolnoprzepustowego.

$$G_c(s) = G_p(s)^{-1}F(s) \quad (13)$$

Wybór filtra o postaci (14) wynika z faktu, iż jest to filtr o prostej postaci oraz posiada jeden parametr wymagający strojenia. Filtr ten zapewnia także realizowalność regulatora. Należy dobrać parametr n w taki sposób, by rząd $D(s)$ był większy o rząd $N(s)$.

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (14)$$

Parametr wymagający strojenia można dobrać zgodnie z zasadą, aby wzmocnienie regulatora było nie większe niż 20 razy od wzmocnienia dla małych częstotliwości. Stosując to wymaganie otrzymujemy nierówność (15) określającą stałą czasową filtra.

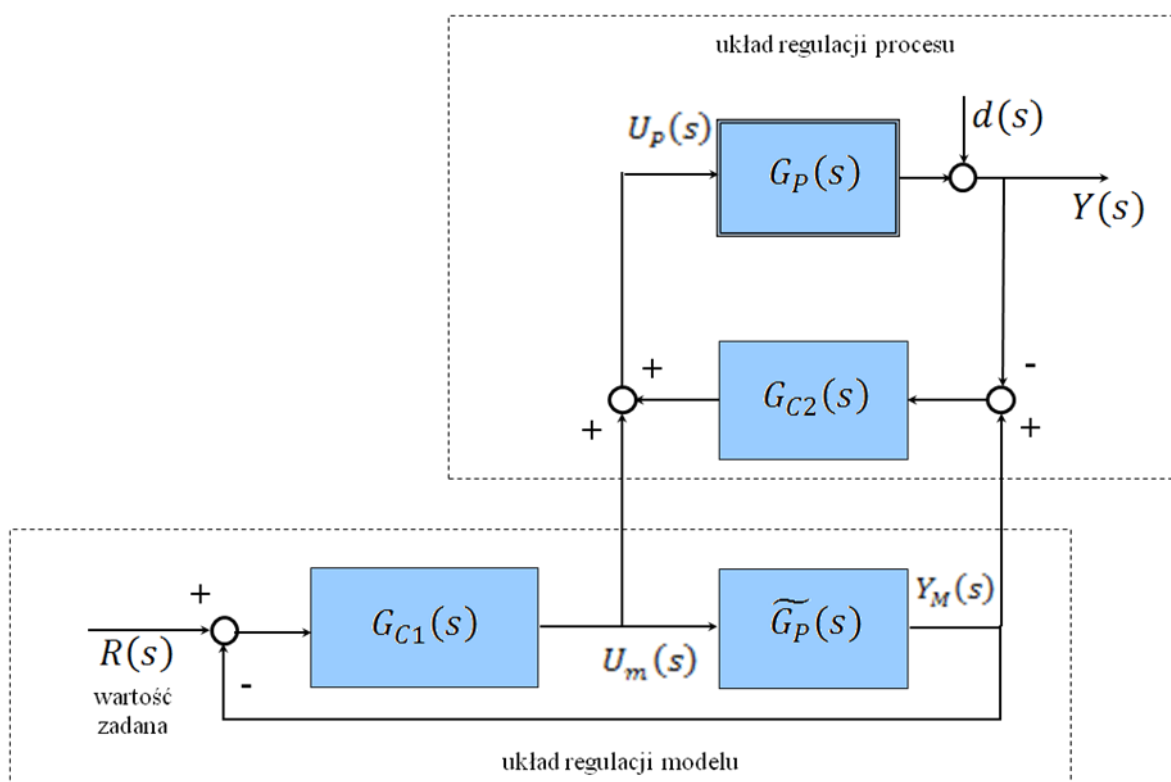
$$\lambda \geq \left[\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{D(s)N(0)}{20s^r N(s)D(0)} \right]^{1/r} \quad (15)$$

2.3 Struktura dwupętlowa MFC (Model Following Control).

Zasada działania

W strukturze regulacji MFC podobnie jak w strukturze IMC także podczas regulacji wykorzystywany jest podczas regulacji model procesu. Jednak w strukturze MFC nie występuje model odwrotny procesu. Zasada regulacji Model Following Control jest zupełnie inna w porównaniu ze strukturą IMC. Jest to układ o dwóch stopniach swobody odpowiadających za nadążanie za wartością zadaną oraz tłumienie zakłóceń. Regulacja MFC jest także odporna na błędy wynikające z niedokładności modelu procesu.

W regulatorze o strukturze Model Following Control w pętli z modelem procesu $\tilde{G}_P(s)$ następuje generacja sygnału sterującego przez regulator $G_{C1}(s)$. Drugim składnikiem jest sygnał, który zależy od różnicy sygnałów wyjściowych modelu i procesu. Regulator $G_{C1}(s)$ steruje w zależności od wartości zadanej natomiast regulator $G_{C2}(s)$ realizuje sterowanie korekcyjne. Korekcja sterowania jest konieczna, gdy występują zakłócenia oddziałujące na obiekt oraz w przypadku różnicy pomiędzy modelem a procesem (Skoczowski, i inni, 2006).



Rysunek 6 Struktura Model Following Control.

Przedstawiona regulacja Model Following Control jest stosunkowo prosta i pozwala na zastosowanie w swojej strukturze dwóch tradycyjnych regulatorów PID. W przypadku zastosowania regulatorów PID należy uwzględnić różnice wynikające z warunków w jakich pracują. Na wejściu regulatora $G_{C2}(s)$ przy skokowej zmianie wartości zadanej nie występują nagłe zmiany sygnału, dlatego też regulator korekcyjny $G_{C2}(s)$ można stroić z uwzględnieniem mniejszego zapasu stabilności.

Metody projektowania modelu.

W artykule (Brzózka, 2006) zostały opisane cztery sposoby budowania modelu procesu wykorzystywanego podczas regulacji.

Metody doboru modelu:

- Dobór modelu ze względu na transmitancję układu regulacji MFC.
- Dobór modelu ze względu na sygnał sterujący procesem.
- Kształtowanie transmitancji modelu za pomocą transmitancji wagowej.
- Redukcja rzędu modelu z wykorzystaniem normy H^∞ .

W niniejszej pracy została wykorzystana metoda doboru modelu za pomocą transmitancji wagowej. Metoda ta wynika z zapisu w formie równania (16) modelu procesu z uwzględnieniem multiplikatywnej niepewności procesu.

$$\tilde{G}_p(s) = G_p(s) * (1 + \Delta(s) * W(s)) \quad (16)$$

Następnie jeżeli norma $\Delta(s)$ spełnia zależność $\|\Delta\|_\infty < 1$ to w dziedzinie częstotliwości można zapisać równanie (17).

$$\max_{\tilde{G}_p} \left| \frac{\tilde{G}_p(j\omega)}{G_p(j\omega)} - 1 \right| < |W(j\omega)| \quad (17)$$

Równanie (17) oznacza, że moduł błędu powinien być mniejszy od modułu transmitancji wagowej $W(s)$.

2.4 Identyfikacja obiektu za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

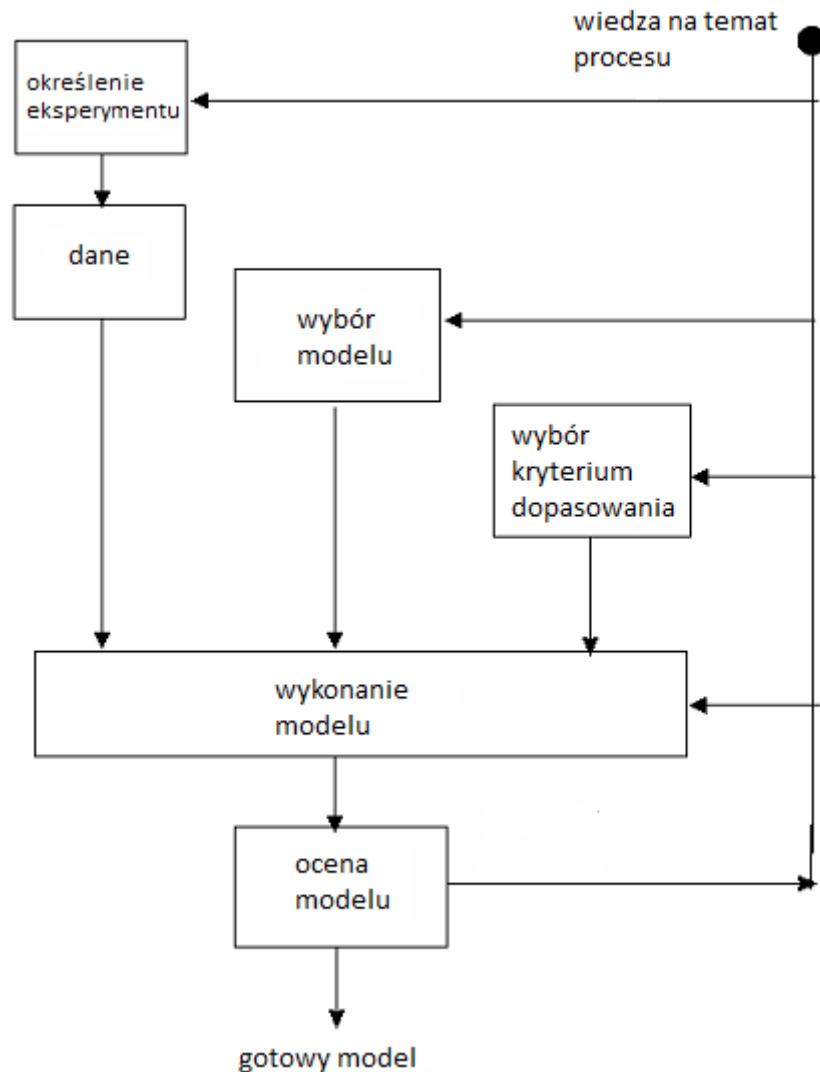
Modelowanie i identyfikacja.

W realizacji nowych alternatywnych metod sterowania model procesu jest konieczny do realizacji układu regulacji. Dokładny model, czyli opis reakcji procesu na określone sterowanie decyduje o jakości uzyskanej regulacji.

Model procesu jest wynikiem procesu modelowania lub identyfikacji (Kościelny, i inni, 2009). Celem modelowania jest uzyskanie modelu analitycznego wykorzystującego opis znanych zjawisk zachodzących w procesie. Następnym etapem procesu modelowania jest określenie współczynników występujących w równaniach opisujących występujące zjawiska. Identyfikacja natomiast jest realizowana wyłącznie na podstawie danych historycznych procesu. Liczba danych oraz ich jakość decyduje w tym przypadku o dokładności modelu opisującego proces. Przed przystąpieniem do procesu identyfikacji wskazane jest, żeby posiadać informacje określające przybliżony rząd modelu oraz istnienie opóźnień w procesie.

Procedura identyfikacji procesu i budowa modelu składa się z kilku etapów. Poszczególne kroki projektowania modelu przedstawia poniższy rysunek. Podczas walidacji modelu może się okazać, że model nie spełnia wymaganych kryteriów. Sytuacja taka może się zdarzyć w kilku przypadkach:

- dane eksperymentalne nie przedstawiają wystarczającej informacji o procesie do budowy modelu
- wybrana w procesie projektowania struktura modelu nie pozwala na dokładny opis procesu
- kryterium wyboru modelu jest niewłaściwe

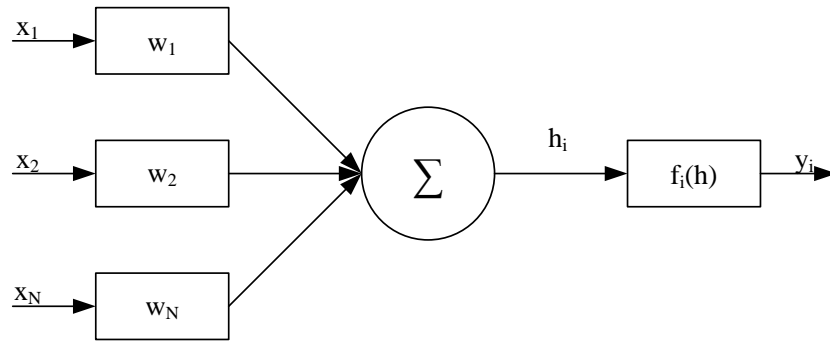


Rysunek 7 Schemat przedstawiający proces budowania modelu obiektu.

Sztuczna sieć neuronowa jako uniwersalny aproksymator

Sztuczne sieci neuronowe to sposób opisu problemów z różnych dziedzin, który powstał jako efekt poszukiwania rozwiązań wzorowanych na procesach zachodzących w systemach nerwowych organizmów żywych. W modelowaniu dynamiki procesu korzystne jest zastosowanie sztucznych sieci neuronowych. Sieci neuronowe pozwalają aproksymować dowolne nieliniowe funkcje poprzez dostrajanie przyjętej struktury sieci na podstawie danych eksperymentalnych wykorzystanych jako wzorce uczone.

Sztuczna sieć neuronowa to struktura składające się z połączonych neuronów, czyli elementów przetwarzających.



Rysunek 8 Schemat pojedynczego neuronu.

Opis oznaczeń zastosowanych na Rys.8.:

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ – wektor wejściowy

$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]$ – wektor wag synaptycznych (parametrów sieci)

$f_i(h_i)$ – funkcja aktywacji

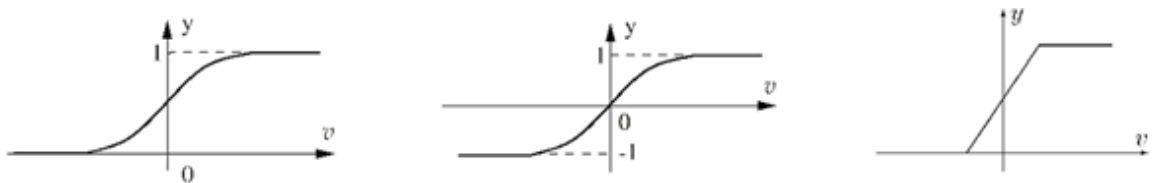
y_i – wyjście i-tego neuronu

x_0 – próg (ang. bias)

Równanie opisujące podstawowy model neuronu ma postać (18) (Osowski, 1996).

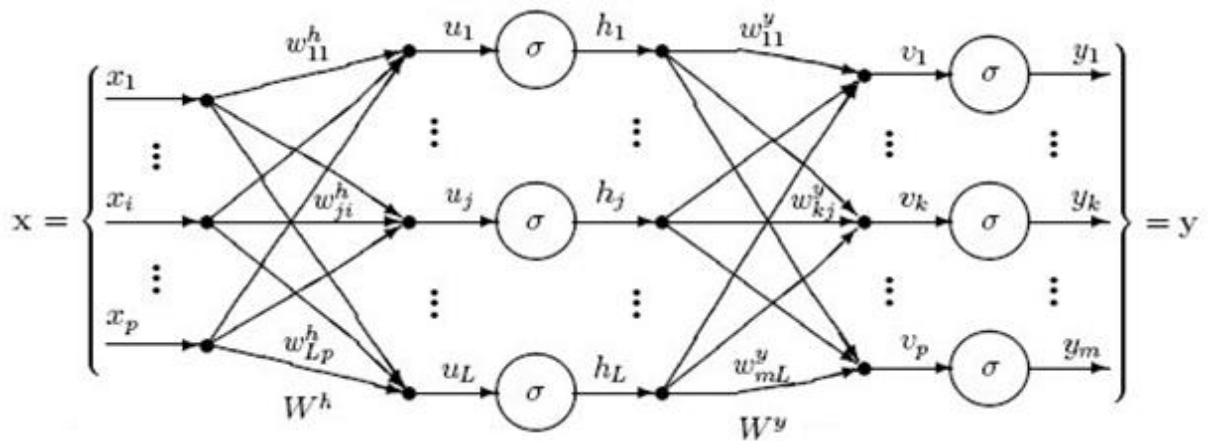
$$y_i = f_i \left(\sum_{n=1}^N w_n x_n + x_0 \right) \quad (18)$$

Najczęściej wykorzystywane funkcje aktywacji neuronu przedstawia Rys.9.



Rysunek 9 Funkcje aktywacji: sigmoidalna, tangens hiperboliczny, liniowa.

Architekturą sieci neuronowej najczęściej wykorzystywaną jest perceptron wielowarstwowy. Strukturę perceptronu trójwarstwowego przedstawia Rys. 10. Perceptron trójwarstwowy składa się z wejść oznaczonych x_i , następną warstwa składa się z L neuronów ukrytych oraz warstwy wyjściowej w której wyjścia neuronów są oznaczone y_i .



Rysunek 10 Perceptron wielowarstwowy.

Sygnały wejściowe są podawane na pierwszą warstwę neuronów (warstwę wejściową), a te z kolei stanowią sygnały źródłowe dla kolejnej warstwy. W sieci wielowarstwowej najczęściej występują połączenia pełne między warstwami. Każde wejście neuronu jest mnożone przez liczbę – wagę połączenia. Wartość tej liczby oznacza wpływ danego sygnału wejściowego na sygnał wyjściowy neuronu. Suma iloczynów wejść i wag jest argumentem funkcji aktywacji.

Proces uczenia sztucznej sieci neuronowej.

Najważniejszą właściwością sieci neuronowych jest zdolność uczenia. Na podstawie wzorców uczących sieć neuronowa wykrywa wzajemne zależności między zmiennymi opisującymi proces. Uczenie może mieć charakter uczenia nadzorowanego czyli z nauczycielem. Ten sposób trenowania sieci wymaga podczas procesu uczenia podawania na wejście sieci określonych wartości oraz porównywania aktualnej odpowiedzi neuronu z oczekiwaną odpowiedzią. Na podstawie różnicy między wyjściem sieci oraz pożądaną wartością wyjścia tworzona jest funkcja celu. Na podstawie minimalizacji funkcji celu przeprowadzana jest modyfikacja wag. Wzór opisujący zmianę wag ma następującą postać (Osowski, 1996).

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \Delta w_i(t) \quad (17)$$

Funkcja celu jest zdefiniowana jako błąd średniokwadratowy między wartością pożądaną a odpowiedzią neuronu.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (d_i(t) - y_i(t))^2 \quad (18)$$

W celu minimalizacji funkcji celu czyli błędu średniokwadratowego można zastosować metodę gradientową. W metodzie gradientowej zmiana wartości wag zależy od gradientu funkcji celu.

$$\Delta w_i(t) = f[\nabla E] \quad (19)$$

Najczęściej stosowaną metodą jest metoda największego spadku nazywana także regułą delta.

$$\Delta w_i(t) = -\eta \nabla E \quad (20)$$

Modyfikacja wag powinna realizować najszybsze zbliżenie się do wartości optymalnych wag. Zatem zmiany wag powinny być antyrównoległe do gradientu funkcji celu.

Sposoby opisu dynamiki procesu za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

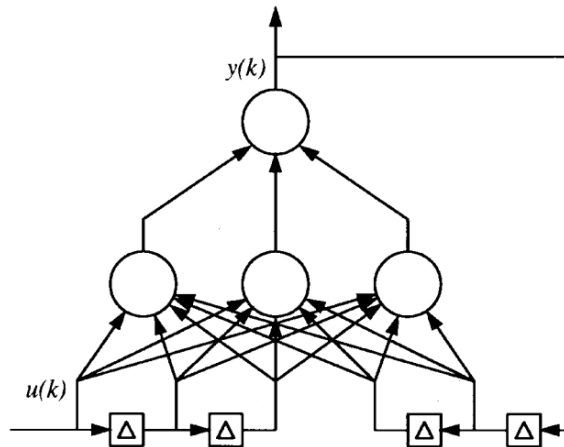
Najprostszym przypadkiem w modelowaniu dynamiki procesu jest obiekt, który można uznać jako statyczny i wtedy opisać go zależnością (21).

$$y(k) = F(u(k)) \quad (21)$$

Zależność (21) można zastosować jeżeli procesy w obiekcie trwają bardzo krótko w porównaniu z okresem próbkowania i można je pominąć. Najczęściej dynamikę obiektu można opisać wzorem (22).

$$y(k+1) = F(u(k), \dots, u(k-m+1), y(k), \dots, y(k-n+1)) \quad (22)$$

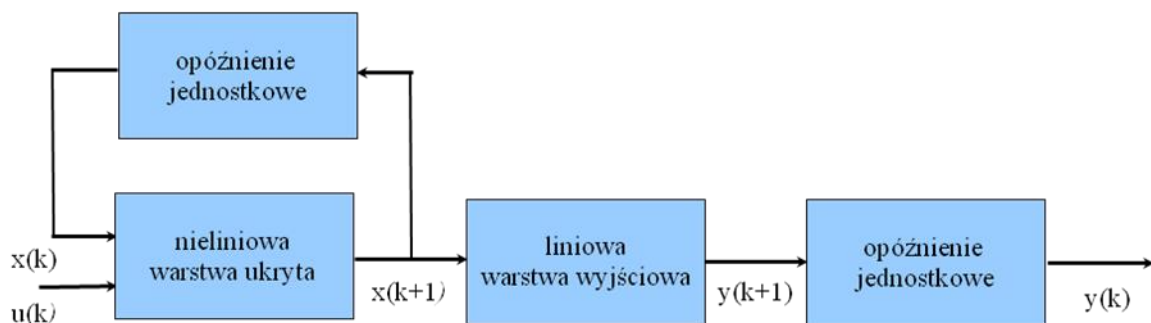
Dynamika modelu procesu w postaci sieci neuronowej może być zrealizowana za pomocą linii opóźniających sygnały lub za pomocą sprzężeń zwrotnych. Sieci neuronowe rekurencyjne to model, w którym na wejście podawane są sygnały opóźnione wejściowe i wyjściowe.



Rysunek 11 Schemat przykładowej sieci typu NARX (3 neurony ukryte, opóźnienie o 2 jednostki czasu sygnału wejściowego i wyjściowego).

Przedstawiona na Rys.11. sieć to sieć neuronowa typu NARX (Nonlinear AutoRegressive eXogenous). Jest to nieliniowa autoregresywna sieć neuronowa, która posiada sprzężenia zwrotne oraz opóźnienia na wejściu sieci. Wejście modelu składa się z sygnałów wejściowych oraz wyjściowych modelu. Odpowiedź modelu jest kombinacją wejść i przeszłych wartości wyjść. Modele tego typu najczęściej są stosowane w predykcji, jako filtry nieliniowe i w modelowaniu obiektów dynamicznych.

Omówione dotychczas sieci neuronowe to modele typu wejście – wyjście. Opis procesu można także przedstawić za pomocą przestrzeni stanów (Rys.12.). W tym przypadku sygnały wyjściowe warstwy ukrytej są podawane na wejście. W procesie projektowania tego modelu należy wybrać liczbę neuronów za pomocą, których jest realizowane sprzężenie oraz liczbę opóźnień.



Rysunek 12 Schemat sieci neuronowej przestrzeni stanów.

Opis oznaczeń zastosowanych na Rys.12.:

$$x(k + 1) = f(x(k), u(k))$$

$$y(k) = C * x(k)$$

$u(k) \in R^n$ – wektor wejściowy

$x(k) \in R^q$ – wektor w przestrzeni stanów

$y(k) \in R^m$ – wektor wyjściowy

$f(.)$ – funkcja opisująca warstwę ukrytą sieci neuronowej

C – macierz wag połączeń pomiędzy warstwą ukrytą i warstwą wyjściową

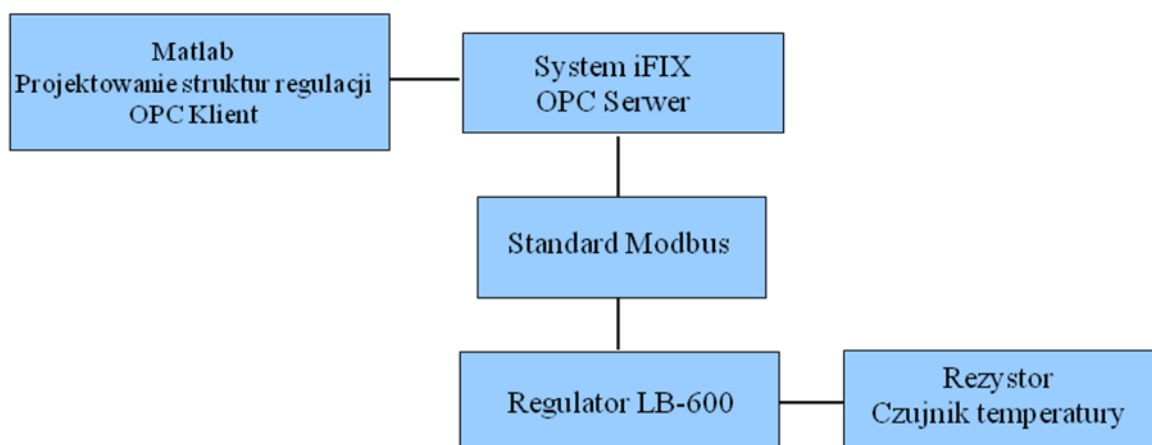
3 Przebieg przeprowadzonej analizy porównawczej

Celem pracy było porównanie działania regulatora PID i regulatorów wykorzystujących w sposób aktywny model procesu podczas sterowania. Zadanie to zostało przeprowadzone dla dwóch różnych przypadków.

- Pierwszy etap badań dotyczył procesu ogrzewania rezystancji. Dla tego procesu zaprojektowano wszystkie trzy struktury regulacji (PID, IMC, MFC) opisane w części teoretycznej pracy. Zadaniem układu regulacji było nadążanie temperatury obiektu w postaci ogrzewanej rezystancji za temperaturą zadaną. Model obiektu wykorzystany w pierwszym etapie analizy opisano za pomocą równania transmitancyjnego typu inercja pierwszego rzędu z opóźnieniem. Jest to model, który można zastosować do opisu wielu obiektów przemysłowych. W celu przeprowadzenia powyższej analizy został zrealizowany układ regulacji, który zostanie opisany szczegółowo w następnym rozdziale.
- Drugi etap to analiza działania regulatorów PID oraz IMC na podstawie modelu obiektu rzeczywistego. Obiektem tym jest hala upraw grzybów. Podczas prowadzenia uprawy grzybów należy kontrolować w hali produkcyjnej temperaturę powietrza, wilgotność względną, oraz stężenie dwutlenku węgla. W celu porównania działania regulatorów został zbudowany model hali upraw w postaci sieci neuronowej. W procesie uczenia sieci neuronowej zostały wykorzystane dane z procesowej bazy danych hali upraw pieczarek. Dane te zostały udostępnione w celu realizacji pracy dyplomowej przez firmę zajmującą się projektowaniem systemów sterowania uprawą pieczarek na skalę przemysłową. Analizę w drugim etapie przeprowadzono na podstawie symulacji z wykorzystaniem zaprojektowanego modelu hali upraw w środowisku Matlab.

4 Opis zrealizowanego układu regulacji.

Rysunek 13. przedstawia schemat zrealizowanego systemu sterowania. Zaprojektowane środowisko badawcze zostało wykorzystane do analizy porównawczej regulatorów. Program Matlab w zrealizowanym systemie pełni rolę środowiska do projektowania, symulacji i analizy systemów regulacji. Dane opisujące proces są dostępne w programie Matlab za pomocą standardu komunikacyjnego OPC. Funkcję OPC serwera pełni system iFIX. Jest to program typu SCADA, używany do kontroli i wizualizacji procesów przemysłowych. Komunikacja pomiędzy programem iFIX oraz regulatorem LB-600 jest zrealizowana w oparciu o standard komunikacyjny MODBUS.



Rysunek 13 Schemat zrealizowanego systemu sterowania.

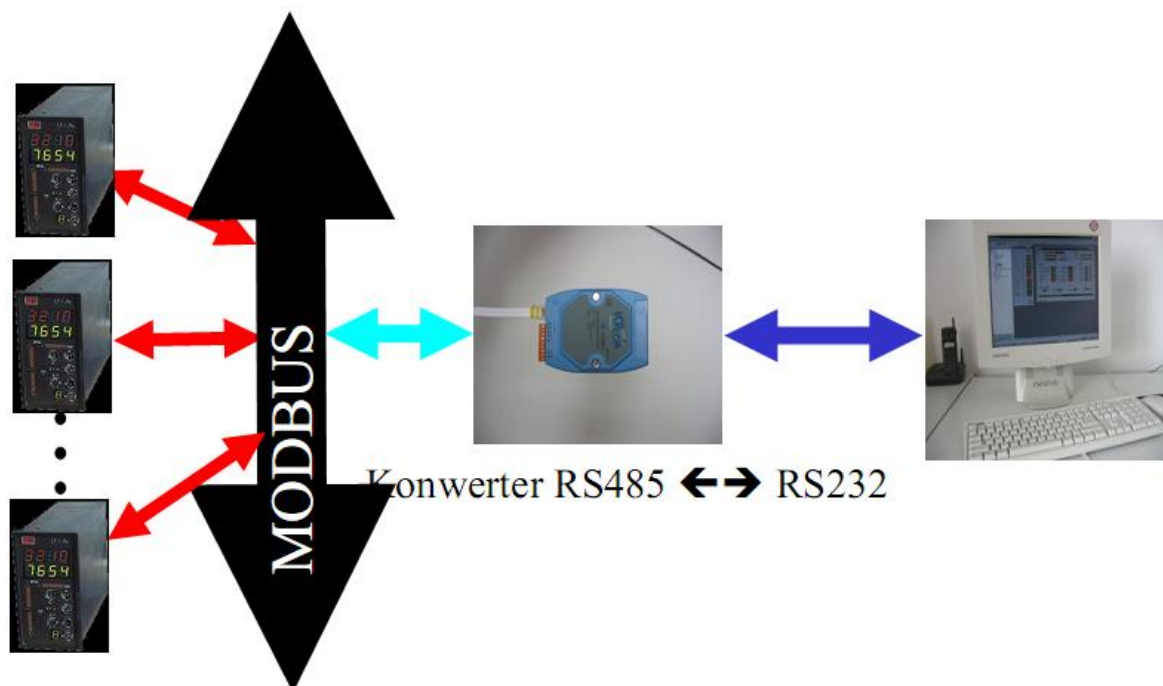
Standard komunikacyjny OPC.

Technologia OPC (Object Linking and Embedding for Process Control) to otwarty standard komunikacyjny stosowany w automatyce przemysłowej i systemach informatycznych. Rozwój standardu OPC jest wspierany przez organizację OPC Foundation (www.opcfoundation.org). Do organizacji tej należą główni producenci urządzeń automatyki przemysłowej.

Standard OPC powstał jako rozwiązanie problemów komunikacji pomiędzy aplikacjami bazującymi na systemach operacyjnych ogólnego stosowania i urządzeniami automatyki sterującymi przebiegiem procesu technologicznego. OPC jest standaryzowaną specyfikacją interfejsu dla aplikacji przeznaczonych do sterowania procesów. Rozwiązanie

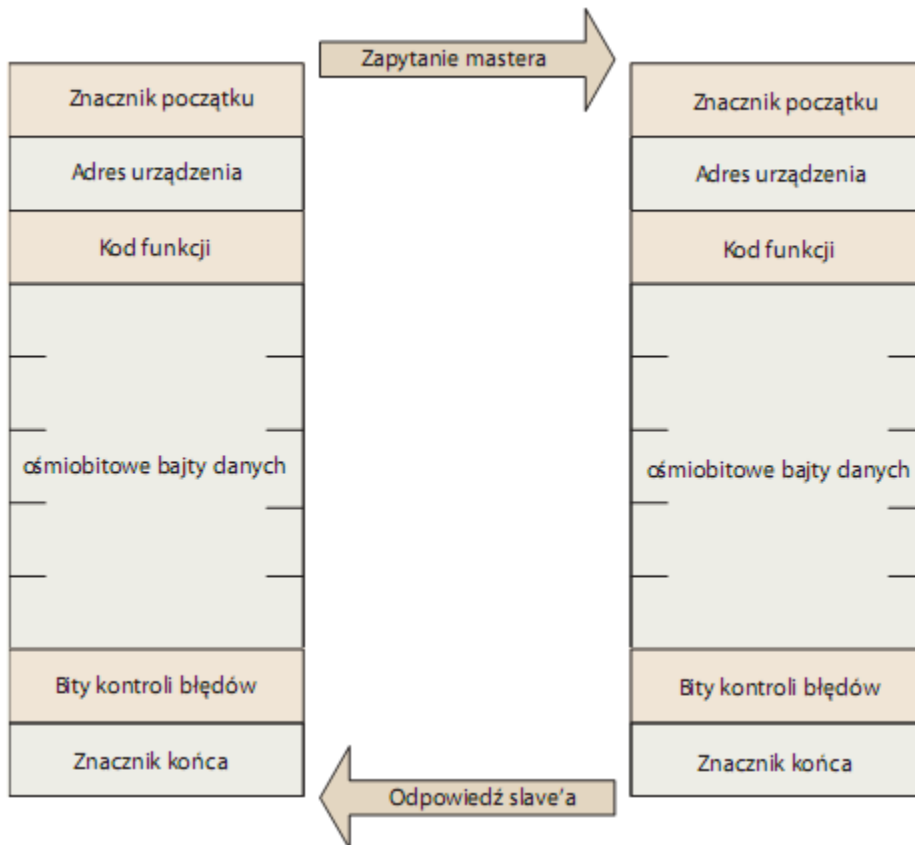
to jest oparte o architekturę typu klient – serwer. Serwer OPC jest aplikacją, która komunikuje się z urządzeniami i udostępnia uzyskane dane poprzez interfejs OPC innym aplikacjom. Klient natomiast wysyła żądania odczytu i zapisu do serwera.

Protokół komunikacyjny Modbus.



Rysunek 14 Komunikacja pomiędzy regulatorem LB-600 oraz komputerem (Szkolnikowski, 2008).

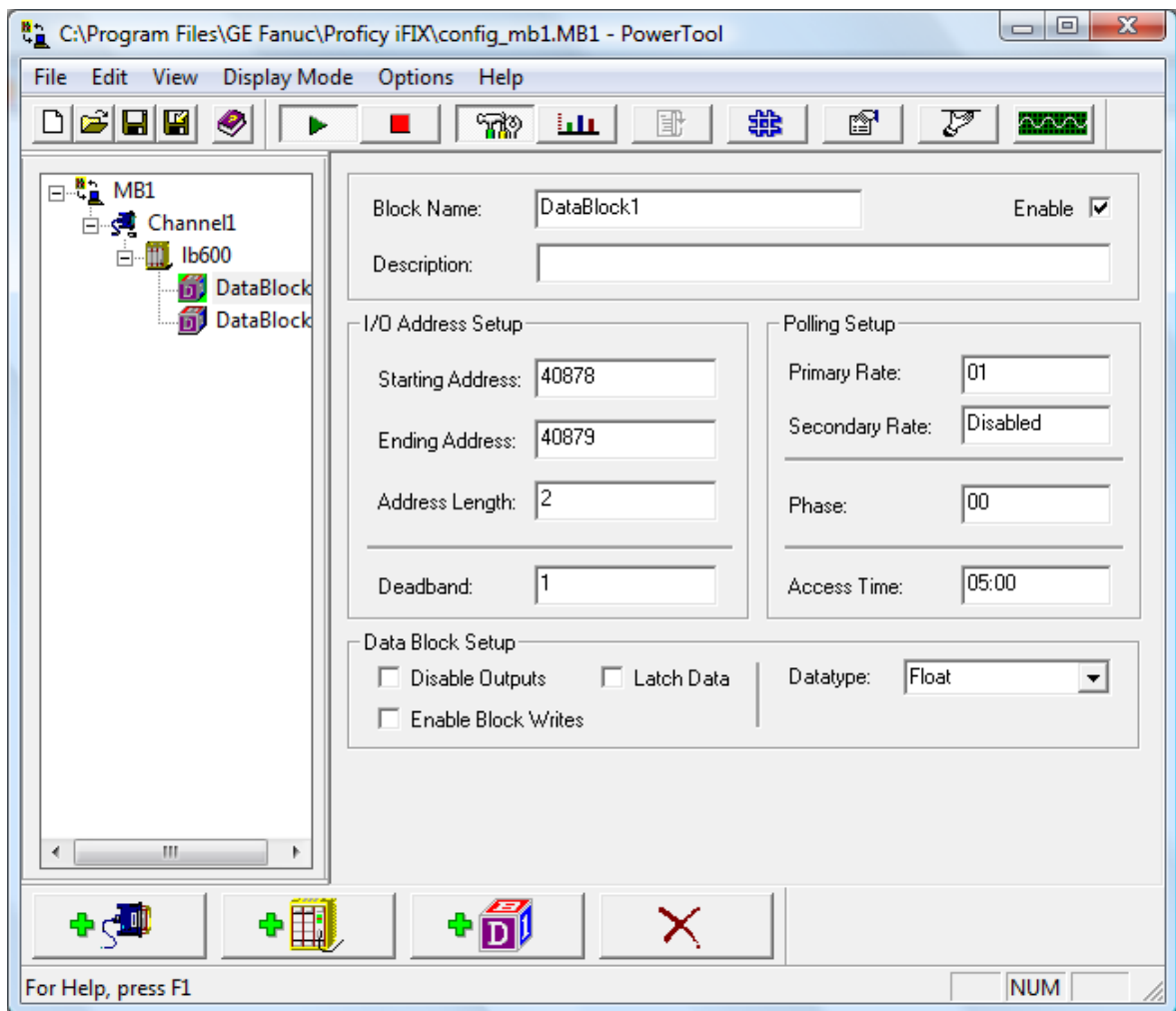
Komunikacja pomiędzy regulatorem a komputerem została zrealizowana za pomocą protokołu Modbus (Rys. 15). Protokół ten został wprowadzony przez firmę Modicon. Komunikacja w protokole Modbus opiera się na przesyłaniu komunikatów między jednostką nadrzędną i podrzędną (komunikacja master – slave). Wśród przesyłanych komunikatów wyróżniamy dwa rodzaje. Pierwszy rodzaj to żądanie wykonania polecenia wysyłany przez jednostkę nadrzędną. Drugi rodzaj przesyłanego komunikatu to odpowiedź na żądanie jednostki nadrzędnej wysyłana przez jednostkę podrzędną. Rysunek 15. przedstawia rodzaje pól umieszczonych w przesyłanych komunikatach.



Rysunek 15 Komunikacja w protokole MODBUS (Simicz, 2006).

Kod funkcji oznacza funkcję jaką ma wykonać jednostka podrzędna. Przesyłane dane są wykorzystywane do wykonania żądanej funkcji, może to być np. numer rejestru lub wartość, którą należy zapisać lub odczytać.

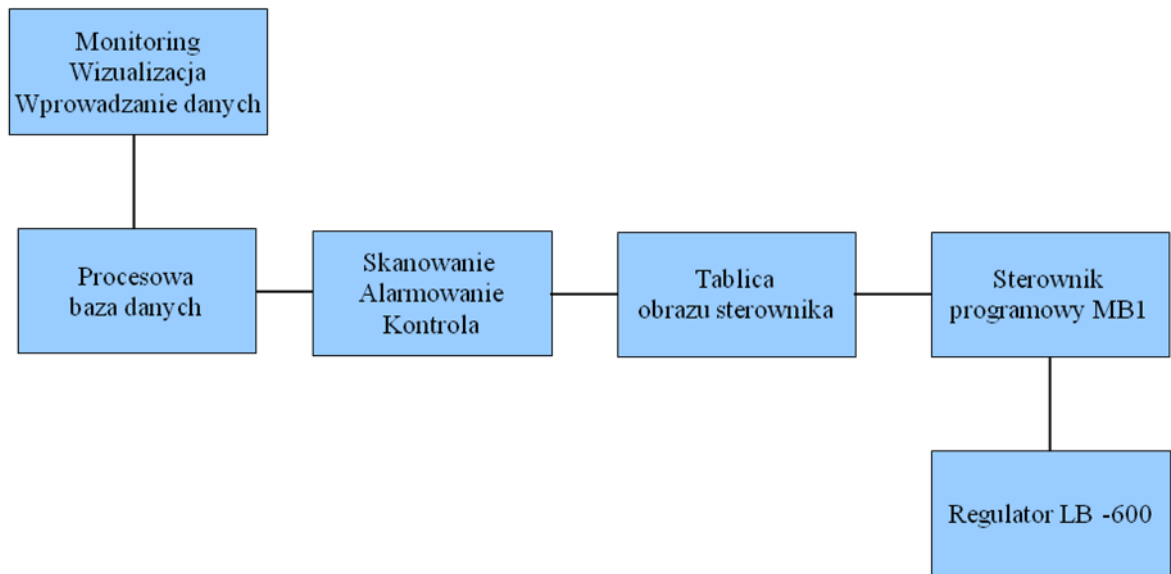
Wykorzystany w niniejszej został protokół Modbus w trybie RTU (Remote Terminal Unit). W trybie tym przesyłane dane składają się z dwóch 4-bitowych znaków w zapisie szesnastkowym. Na Rys. 16. została przedstawiona konfiguracja sterownika programowego MB1. Za pomocą sterownika MB1 dostępnego w programie iFIX zrealizowana jest komunikacja regulatora LB-600 z komputerem w zaprojektowanym systemie regulacji.



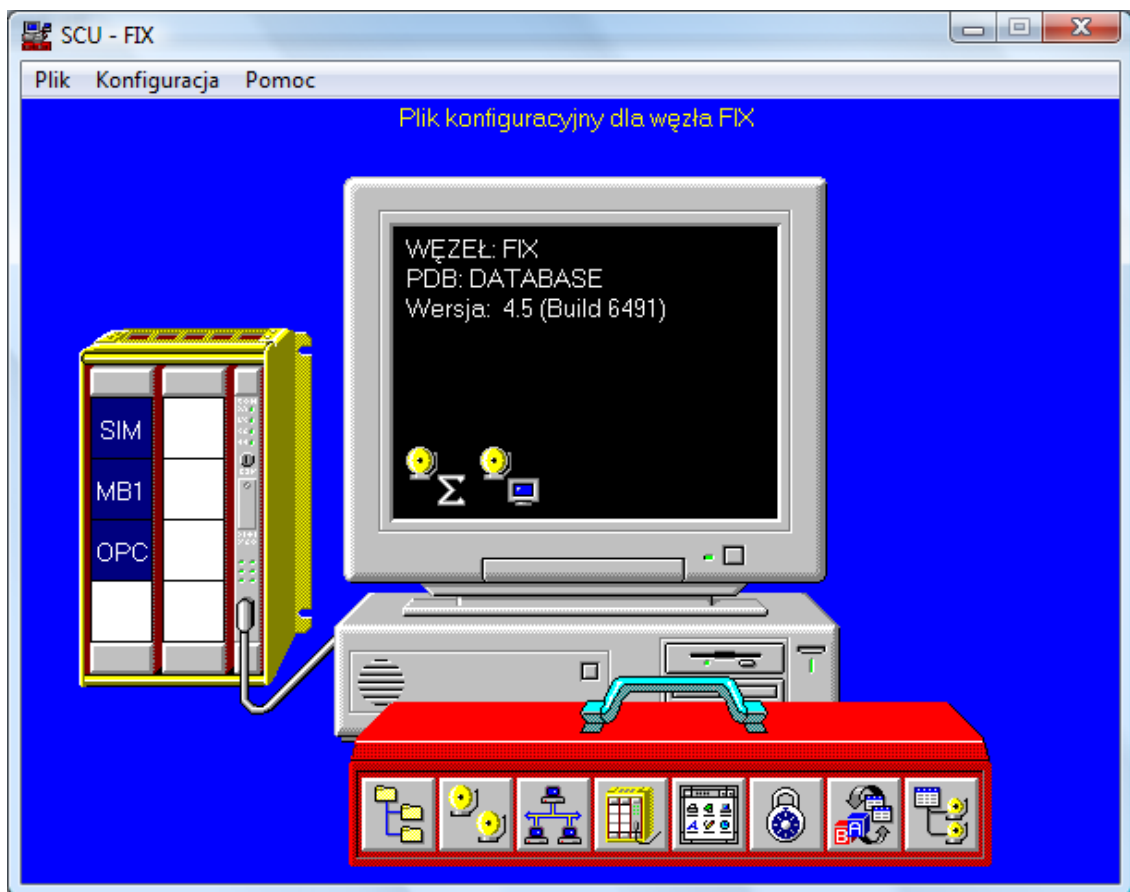
Rysunek 16 Konfiguracja sterownika MB1 do komunikacji z wykorzystaniem standardu Modbus.

System iFIX.

Rysunek 17. przedstawia architekturę oraz proces komunikacji programu iFIX z urządzeniami sterującymi i wykonawczymi. Poprzez sterownik programowy można nawiązać komunikację z urządzeniami. W programie iFIX należy utworzyć tablicę obrazu sterownika DIT (Driver Image Table). Następnie program SAC (Scan, Alarm and Control) realizuje skanowanie, alarmowanie i sterowanie na podstawie sygnałów uzyskanych ze sterownika. PDB (Proces Data Base) czyli procesowa baza danych przechowuje dane archiwalne o bieżącym stanie procesu i udostępnia je innym aplikacjom pakietu iFIX. Wartości zmiennych z bazy danych mogą być wykorzystane w wizualizacji procesu.



Rysunek 17 Schemat funkcjonalny pakietu iFIX.



Rysunek 18 Konfiguracja programu iFIX do pracy w zrealizowanej aplikacji.

Regulator LB-600

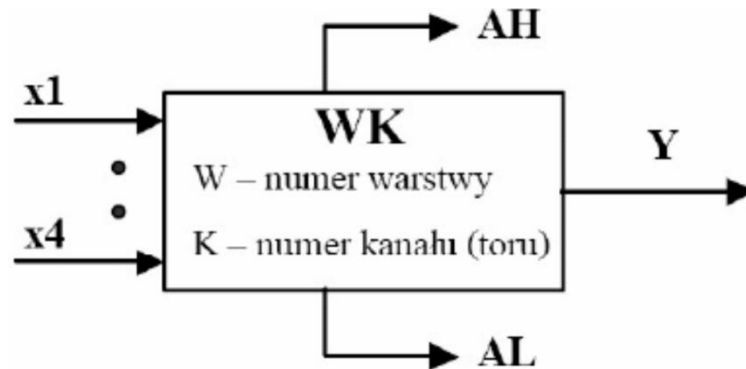
Regulator mikroprocesorowy LB-600 firmy LAB-EL jest uniwersalnym urządzeniem, które jest stosowane w automatyce przemysłowej. LB-600 udostępnia użytkownikowi dużą funkcjonalność dzięki możliwości konfiguracji urządzenia poprzez odpowiednią kombinację pakietów wejściowych i wyjściowych. Regulator posiada szeroką gamę algorytmów sterowania klasycznych i specjalizowanych. Użytkownik może przesłać do urządzenia odpowiednią konfigurację, która definiuje algorytm sterowania. Dzięki możliwości programowania można w prosty sposób dostosować regulator do własnych potrzeb wynikających ze specyfiki danego procesu przemysłowego. LB-600 pozwala także testować nowe algorytmy sterowania, co sprawia że obok zastosowań przemysłowych może być wykorzystany jako narzędzie dydaktyczne.

Do najważniejszych modułów regulatora należą (Szkolnikowski, 2008):

- Moduł operatorski – panel przedni. Obsługiwany jest przez niezależny procesor, dzięki czemu zwalnia główny procesor od obsługi wyświetlacza i klawiatury.
- Moduł jednostki centralnej – mikrokontroler oraz układy pamięciowe. Element ten jest połączony ze wszystkimi modułami, zapewnia przetwarzanie sygnałów analogowych na postać cyfrową, zapamiętuje zmienne procesowe. W tym module jest także zapisana struktura zdefiniowanego przez użytkownika algorytmu sterowania oraz pozostałych parametrów regulacji.
- Pakiet wejść analogowych – możliwość obsługi do 10 wejść analogowych, umieszczenie 3 pakietów pozwala na zwiększenie liczby wejść do 30.
- Pakiet wyjść analogowych – służy do uzyskania 2 niezależnych i odseparowanych galwanicznie sygnałów wyjściowych regulatora napięciowych lub prądowych.
- Pakiet wejść – wyjść dyskretnych pozwala na obsługę 8 wejść oraz 6 wyjść.

Regulator pozwala na wykorzystanie zbioru programowalnych bloków funkcjonalnych nazywanych funktoami. Funktor jest elementem posiadającym od 1 do 4 wejść oraz jedno wyjście. Bloki funkcyjne mogą realizować różne funkcje w zależności od potrzeb sterowania określonego procesu. Funktory są zorganizowane w postaci macierzy.

Identyfikacja bloków polega na podaniu numeru warstwy oraz podaniu numeru toru sterowania.



Rysunek 19 Blok funkcyjny regulatora LB-600 (Szkolnikowski, 2008).

Bloki funkcyjne są zorganizowane w postaci macierzy. Przynależność do danej warstwy określa zakres funkcji jakie mogą być realizowane przez dany blok, zaś numer kanału określa numer toru sterowania, dla którego mają być przeprowadzone wybrane operacje obliczeniowe. Warstwy mogą wykonywać następujące funkcje:

- Warstwa 0 – pozwala na ustawienie parametrów ogólnych całego urządzenia (data, parametry transmisji, wybór urządzeń zewnętrznych podłączonych do LB600 oraz hasło użytkownika)
- Warstwa 1 – obsługa wejść analogowych, możliwość wybrania i wyboru parametrów funkcji przetwarzających sygnały wejściowe (wybór jednostek fizycznych, określenie wartości progów alarmowych, wybór filtracji sygnału)
- Warstwa 2 – obsługa wejść binarnych
- Warstwy 3, 4, 5, 6 – realizacja funkcji arytmetycznych oraz logicznych sygnałów wejściowych.
- Warstwa 7 – zbiór funkcyjnych realizujących główne algorytmy sterowania
- Warstwa 8 – realizacja dodatkowych operacji przetwarzania sygnałów analogowych
- Warstwa 9 – obsługa wyjść analogowych
- Warstwa A – obsługa wyjść binarnych
- Warstwa B – możliwość skalowania wejść i wyjść analogowych

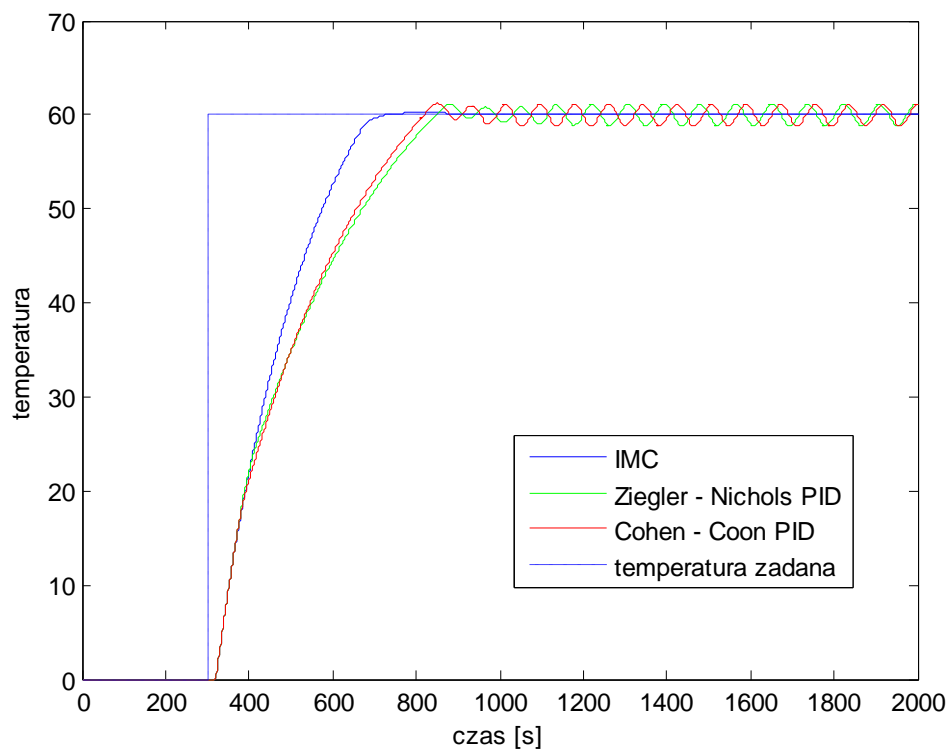
5 Analiza porównawcza działania regulatorów PID i MBC (Model Based Control)

5.1 Wyniki analizy

Etap 1 – analiza regulatorów z wykorzystaniem zaprojektowanego układu regulacji.

Identyfikację dynamiki obiektu symulującego proces przemysłowy przeprowadzono na podstawie odpowiedzi obiektu na skok jednostkowy sterowania.. Na podstawie otrzymanej odpowiedzi obiektu za pomocą przybornika System Identification Toolbox dostępnego w programie Matlab wyznaczono przybliżony opis obiektu.

$$G_P(s) = \frac{0,77}{1 + 227,81 * s} e^{-20s} \quad (23)$$



Rysunek 20 Przebiegi czasowe układów regulacji typu PID na skok wartości zadanej.

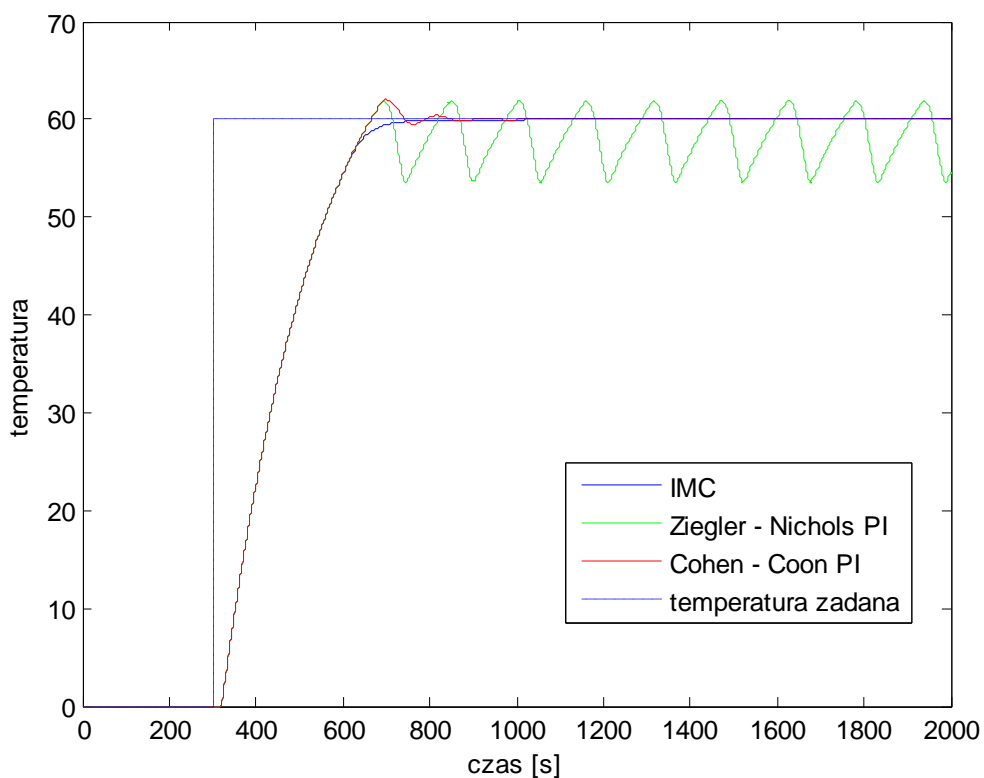
Tabela 1 Parametry określające jakość regulacji obliczone na podstawie przebiegów czasowych z Rys.20

	Ziegler-Nichols PID	Cohen-Coon PID	IMC
IAE	126.3	124,3	95,3

Na Rys. 20. oraz w Tab. 1 przedstawiono działanie regulatora PID, którego parametry zostały dobrane za pomocą trzech różnych metod. Regulator pierwszy zaprojektowano z wykorzystaniem metody Zieglera – Nicholasa, wykorzystując parametry wyznaczone na podstawie odpowiedzi obiektu na skok jednostkowy sygnału sterującego. Zaprojektowano również regulator z wykorzystaniem metody Cohena – Coona. Trzeci regulator zaprojektowano zgodnie z zasadą opisaną w (Coleman, i inni, 2002). Jest to metoda oparta na przekształceniu struktury regulatora typu IMC do struktury klasycznej, nie wykorzystującej modelu obiektu do obliczenia wartości sygnału sterującego w czasie sterowania.

Analizując przebiegi na Rys.20. można zauważyć, że regulator PID, którego parametry zostały dobrane na podstawie układu regulacji IMC charakteryzuje się najkrótszym czasem regulacji oraz zerowym przeregulowaniem. Właściwy dobór parametrów regulatora PID w omawianym przypadku potwierdza także wartość całkowitego kryterium jakości regulacji (IAE).

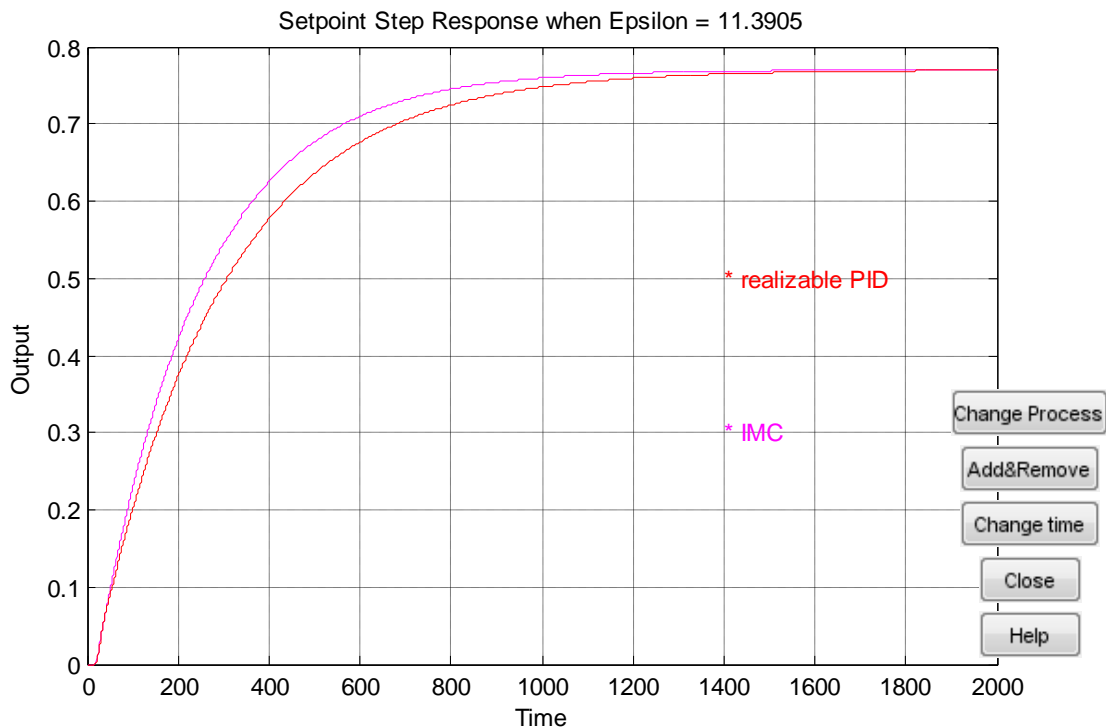
Regulatory, których parametry dobrano z wykorzystaniem metody Zieglera – Nicholasa oraz Cohena – Coona charakteryzują się oscylacjami wartości temperatury chwilowej.



Rysunek 21 Przebiegi czasowe układów regulacji typu PI na skok wartości zadanej.

Zaprojektowano także regulatory typu PI z wykorzystaniem omawianych metod doboru parametrów regulatora. W tym przypadku również działanie regulatora, którego parametry dobrano na podstawie struktury regulacji typu IMC charakteryzuje się najkrótszym czasem narastania oraz brakiem oscylacji temperatury chwilowej.

Następnie porównano odpowiedź na skok wartości zadanej regulatora PID, którego parametry zostały dobrane na podstawie przekształcenia struktury regulacji typu IMC do struktury klasycznej regulacji oraz zaprojektowanego regulatora IMC. Na podstawie Rys. 22 można stwierdzić, że różnice w odpowiedzi w obu przypadkach są zbliżone.



Rysunek 22 Przebiegi czasowe odpowiedzi na skok wartości zadanej regulatora PID oraz IMC.

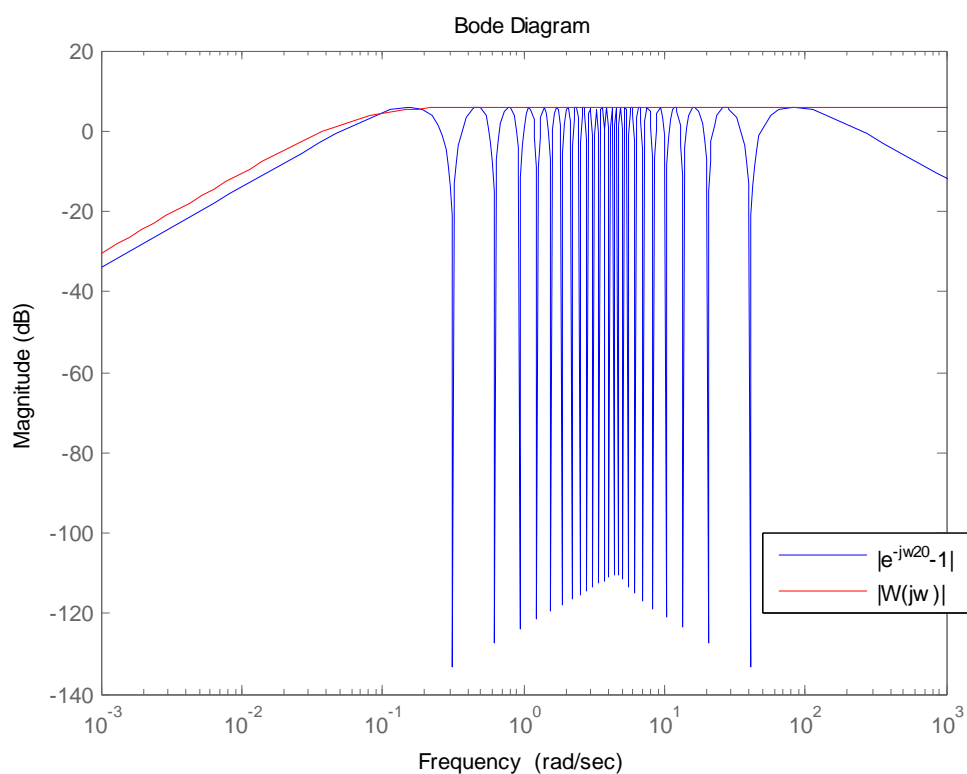
W etapie pierwszym analizy zaprojektowano także dwupętlową strukturę regulacji typu MFC. Model procesu wyznaczono z wykorzystaniem opisaną w części teoretycznej pracy transmitancji wagowej. Zgodnie z metodą transmitancji wagowej można zapisać nierówność (24).

$$|e^{-j20\omega} - 1| \leq |W(j\omega)| \quad (24)$$

Transmitancja wagowa spełniająca nierówność (24) została opisana za pomocą wzoru (25).

$$W(s) = \frac{30s}{15s + 1} \quad (25)$$

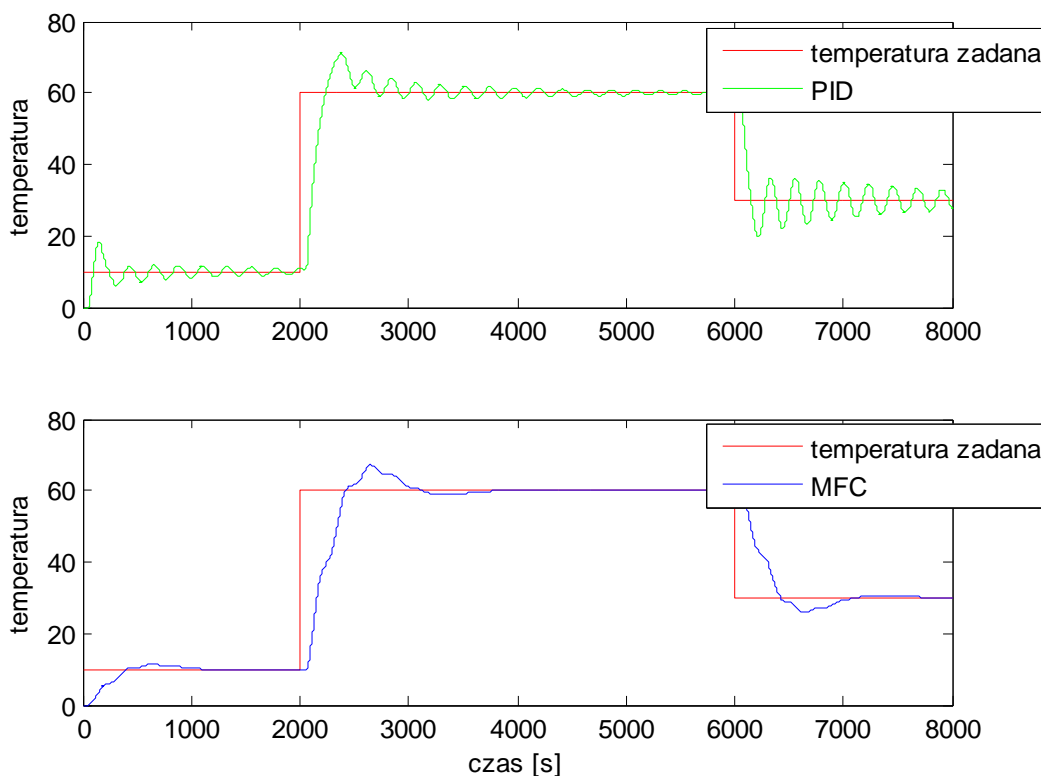
Na Rys.23 przedstawiono wykres wybranej transmitancji oraz lewej strony nierówności (24). Na podstawie wykresu można stwierdzić, że wybrana postać spełnia wymaganą nierówność.



Rysunek 23 Wykres wybranej transmitancji wagowej.

Wykorzystując wybraną transmitancję wagową została zaprojektowana struktura regulacji typu MFC. Działanie struktur regulacji PID oraz MFC porównano za pomocą zrealizowanego systemu regulacji z wykorzystaniem regulatora LB-600. Podczas sterowania obiektu o parametrach identycznych jak podczas projektowania regulatorów wskaźniki określające jakość regulacji miały podobne wartości.

Następnie podjęto próbę porównania działania regulatorów PID oraz MFC przy sterowaniu obiektem o zmodyfikowanych wartościach opisujących obiekt. Ze względu na brak możliwości zmiany parametrów definiujących dynamikę obiektu analizę tą przeprowadzono na podstawie symulacji w programie Matlab bez wykorzystania zaprojektowanego w pracy systemu sterowania. Wyniki działania obu regulatorów zostało przedstawione na Rys.24.

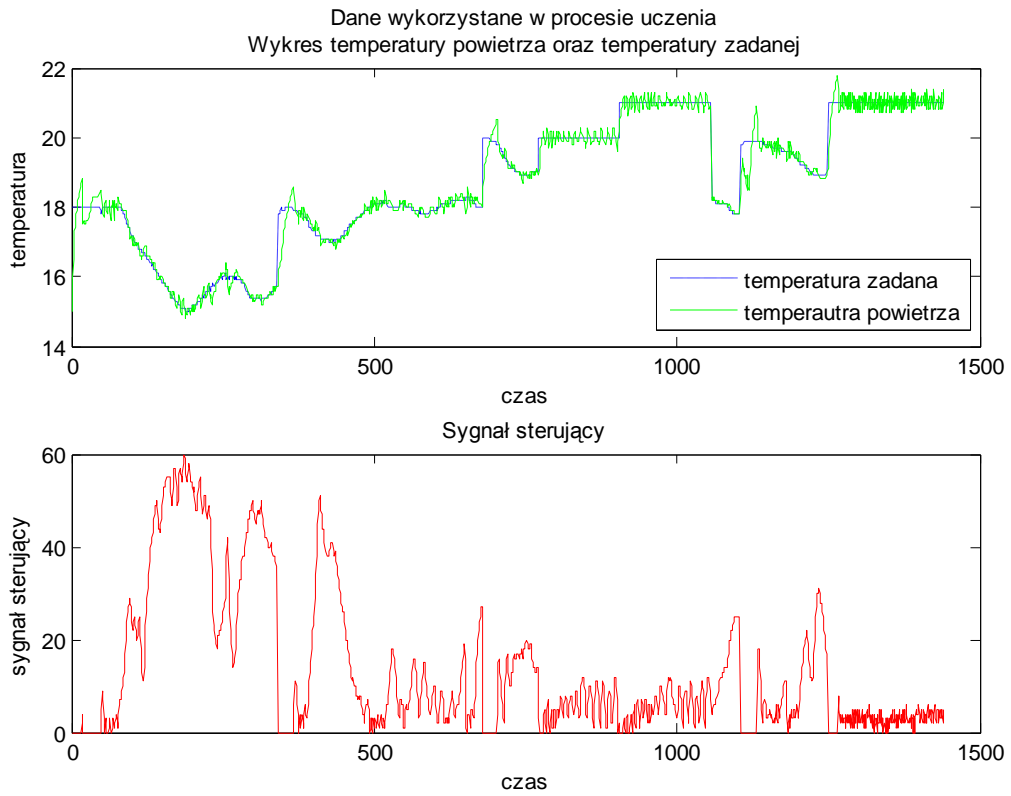


Rysunek 24 Porównanie działania regulatorów PID i MFC dla zmodyfikowanych parametrów opisujących obiekt.

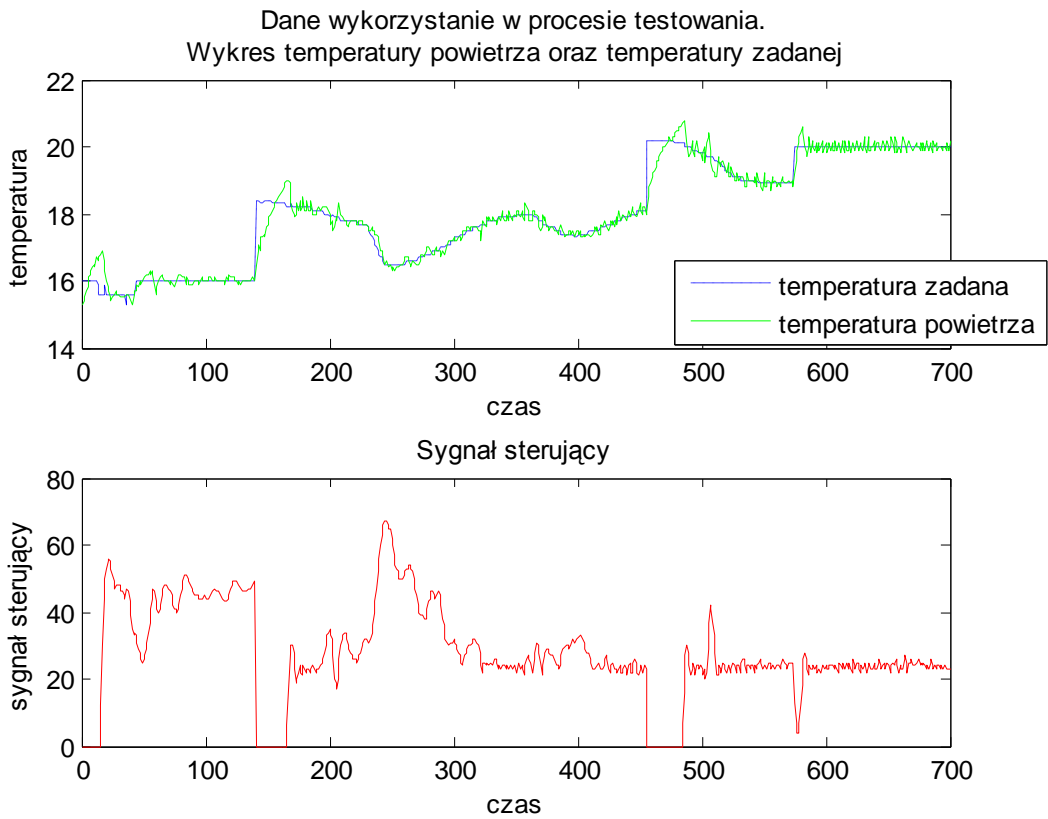
Na podstawie Rys.24 można stwierdzić, że jakość regulacji regulatora PID po zmodyfikowaniu dynamiki obiektu znacznie się pogorszyła. Występują niepożądane oscylacje o dużej amplitudzie wartości temperatury chwilowej. Natomiast działanie regulatora MFC charakteryzuje się jedynie przeregulowaniami występującymi przy skoku wartości temperatury zadanej. Jednak przeregulowania te są mniejsze niż w przypadku regulatora PID. Różnice w działaniu regulatorów wynika z większego tłumienia zakłóceń addytywnych sprowadzonych do wyjścia obiektu przez regulator MFC.

Etap 2 – analiza na podstawie modelu hali upraw.

Drugi etap analizy porównawczej regulatorów PID i IMC został przeprowadzony na podstawie danych zarejestrowanych podczas uprawy pieczarek w hali upraw. W celu przeprowadzenia analiz został zbudowany model w postaci rekurencyjnej sieci neuronowej na podstawie zgromadzonych danych. Na Rys. 25. oraz Rys.26. znajdują się wykresy przedstawiające dane wykorzystane w czasie uczenia i testowania modelu.

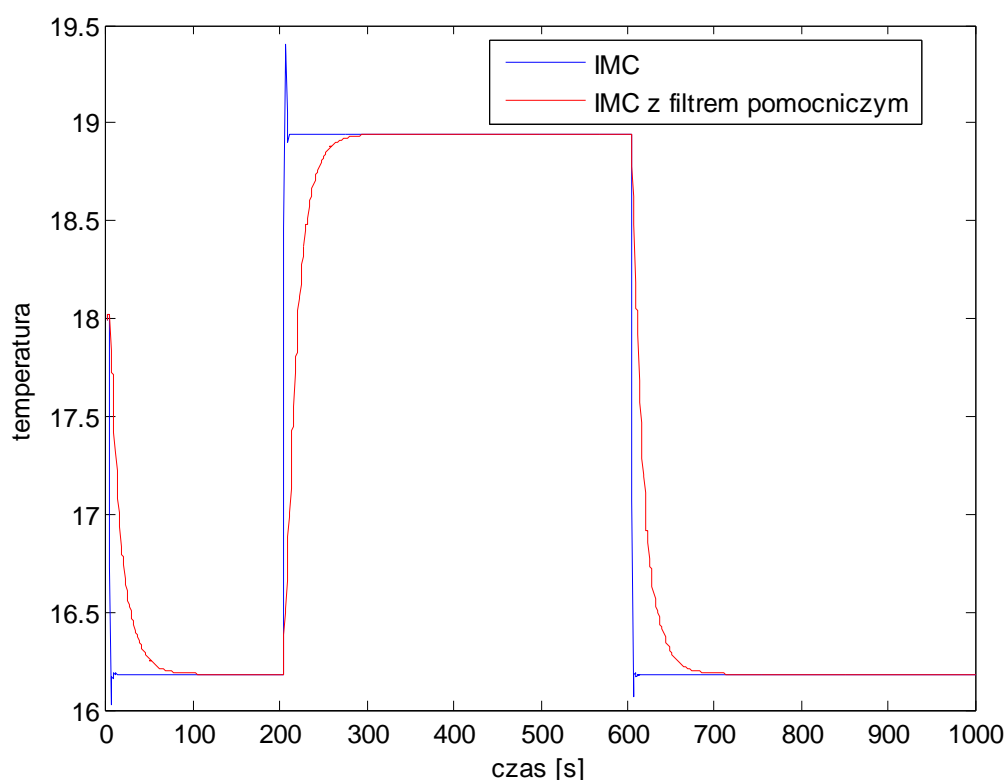


Rysunek 25 Dane wykorzystane w procesie uczenia podczas identyfikacji obiektu.



Rysunek 26 Dane wykorzystane do testowania podczas identyfikacji obiektu.

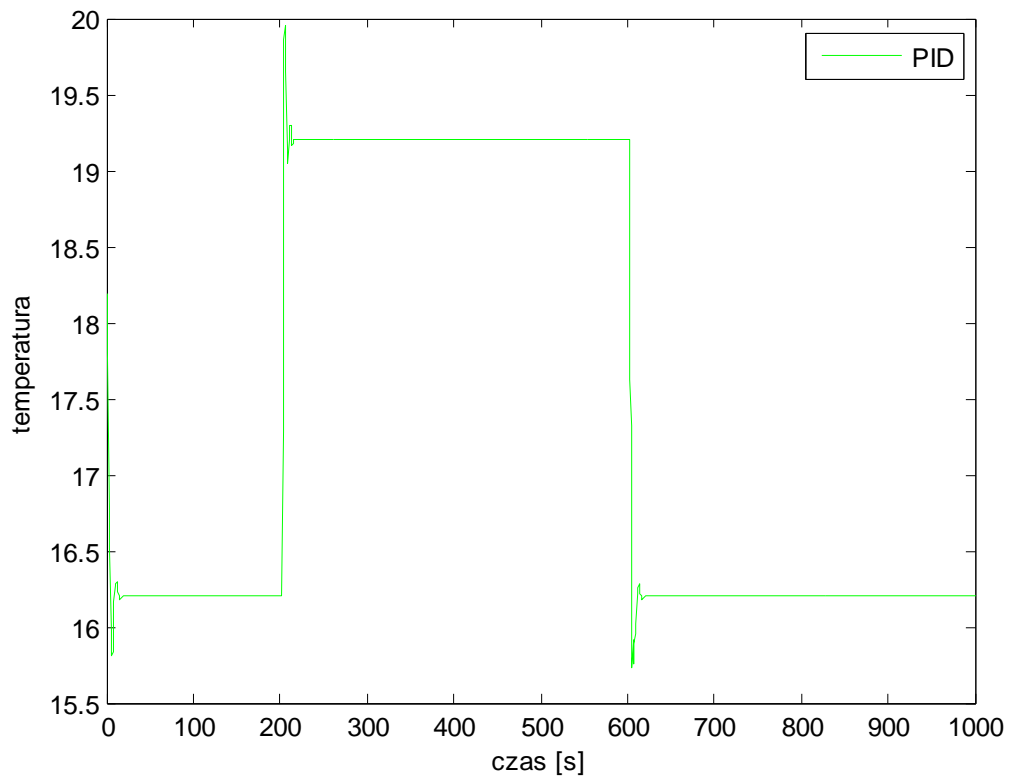
Podczas procesu budowy modelu hali upraw przetestowano modele opisane w części teoretycznej niniejszej pracy. Dane eksperymentalne zostały podzielone na zbiór danych uczących i zbiór testujący. Neurony w warstwie ukrytej posiadają funkcję aktywacji w postaci tangensa hiperbolicznego natomiast neuron wyjściowy ma liniową funkcję aktywacji. Dane ze zbioru uczącego i testującego zostały przeskalowane do przedziału $(-1; 1)$. Dobór optymalnej liczby neuronów ukrytych polegał na zwiększaniu liczby neuronów ukrytych i porównywaniu błędu średniokwadratowego obliczonym dla danych należących do zbioru uczącego i testującego. Najbardziej dokładny model o najmniejszej złożoności otrzymano dla sieci typu NARX. W wybrany model wykorzystany do porównania regulatorów PID i IMC posiadał 6 neuronów ukrytych. Wektor sygnałów wejściowych składa się sygnału wejściowego i wyjściowego opóźnionych o jedno oraz dwa opóźnienia jednostkowe.



Rysunek 27 Odpowiedź zaprojektowanego regulatora IMC na skok wartości zadanej.

Na Rys.27. można zauważyć charakterystyczne skoki wartości temperatury przy zmianach temperatury zadanej. Przeregulowania te można wyeliminować stosując w układzie filtr pomocniczy. Zastosowanie filtra pomocniczego eliminuje przeregulowania

jednak zwiększa także czas narastania temperatury chwilowej do wartości temperatury zadanej.



Rysunek 28 Odpowiedź zaprojektowanego regulatora PID.

W przypadku układu regulacji typu PID, którego parametry dobrano zachowując odpowiedni margines fazy oraz wzmocnienia, otrzymano przeregulowania temperatury chwilowej.

5.2 Wnioski

Możliwość zastosowania w automatyce urządzeń o dużej mocy obliczeniowej pozwala na zastosowanie algorytmów regulacji wykorzystujących model procesu w czasie rzeczywistym. W pracy zostało przedstawione działanie tradycyjnego regulatora PID. Regulator ten działa na podstawie uchybu wartości zadanej. Zastosowanie modelu dynamiki obiektu w strukturze regulatora określane jest jako sterowanie z modelem wewnętrznym procesu (Model Based Control). Rozwiązanie to pozwala na przewidywanie zachowania się sterowanego obiektu. Predykcja zachowania się obiektu umożliwia kompensację skutków zakłóceń przed ujawnieniem się wpływu zewnętrznych zakłóceń na sygnale wyjściowym obiektu. Regulacja MFC jest dodatkowo odporna na błędy wynikające z modelowania obiektu podlegającego sterowaniu. Odporność ta wynika z dodania błędów modelu do zakłóceń sygnału wyjściowego obiektu.

Do porównania działania analizowanych regulatorów można także wykorzystać następujące trzy parametry:

- S_r - wrażliwość wejściowa układu regulacji określa zdolność struktury regulacji do nadążania za wartością zadaną
- S_d - wrażliwość wyjściowa, zakłóceniewa definiuje odporność regulatora na zakłócenia oraz tłumienie zakłóceń przez regulator

Tabela 2 Wzory określające wrażliwości wejściową oraz zakłóceniewą porównywanych struktur regulacji.

	Regulator PID	Regulator IMC	Regulator MFC
S_r	$\frac{G_C * G_P}{1 + G_C * G_P}$	$\frac{G_C * G_P}{1 + G_C * (G_P - \hat{G}_P)}$	$\frac{G_{C1} * G_P * (1 + G_C * \hat{G}_P)}{(1 + G_{C1} * \hat{G}_P) * (1 + G_{C2} * G_P)}$
S_d	$\frac{1}{1 + G_C * G_P}$	$\frac{1 - G_C * \hat{G}_P}{1 + G_C * (G_P - \hat{G}_P)}$	$\frac{1}{1 + G_{C2} * G_P}$

Na podstawie parametrów trzech porównywanych regulatorów zestawionych w Tab.2. można stwierdzić, że tłumienie zakłóceń regulatora MFC wynika z zastosowania dwóch regulatorów. Regulator korekcyjny w strukturze MFC zapewnia większą odporność, wynika to ze wzoru na wrażliwość zakłóceniewą. Dla regulatora typu IMC wzory określające wrażliwości są podobne. Korzyścią z zastosowania regulatora IMC jest

wykorzystanie modelu w czasie sterowania. Regulatory PID oraz IMC to struktury o jednym stopniu swobody. Podczas ich strojenia należy wybrać rozwiązanie kompromisowe pomiędzy nadążaniem za wartością zadaną oraz tłumieniem zakłóceń. Natomiast w regulatorze MFC występują dwa stopnie swobody podczas strojenia stąd wynika najlepsza jakość uzyskanej regulacji.

6 Podsumowanie

W niniejszej pracy zrealizowano aplikację do sterowania temperaturą symulowanego procesu. Aplikacja wykorzystuje program Matlab do projektowania układów regulacji. Do komunikacji w opisanym systemie wykorzystano standardy komunikacyjne OPC oraz MODBUS. Na podstawie zrealizowanej aplikacji przeprowadzono analizę porównawczą różnych układów regulacji.

Pierwszym układem regulacji przedstawionym w pracy jest regulator PID. Podczas projektowania układów regulacji typu PID dąży się do osiągnięcia wysokiej jakości regulacji oraz odporności na zakłócenia. Jednak dobór parametrów regulatorów PID za pomocą często stosowanych metod Zieglera – Nicholasa oraz Cohena – Coona nie zawsze daje rozwiązanie optymalne. W niniejszej pracy przedstawiono sposoby regulacji wykorzystujące w sposób aktywny model procesu podczas sterowania. Struktura regulacji Internal Model Control może zostać zastosowana w przypadku obiektów, dla których można zbudować model przybliżony model odwrotny.

Regulator typu IMC można również w prosty sposób przekształcić do postaci odpowiadającej układowi regulacji klasycznej. Na podstawie przekształconego układu można dobrać parametry regulatora PID. Metoda ta została przedstawiona w (Coleman, i inni, 2002). Na podstawie przedstawionych w pracy wyników można stwierdzić, że metoda doboru parametrów regulatora na podstawie struktury IMC daje najlepsze wyniki z omawianych w pracy sposobów strojenia regulatora PID.

Drugim regulatorem porównywanym w analizie jest regulator typu MFC. Jest to regulator, który wykorzystuje w sposób aktywny model procesu podczas sterowania. W regulatorze Model Following Control występują dwa regulatory, jeden sterujący modelem oraz drugi sterujący procesem. Wykorzystanie dodatkowego regulatora korekcyjnego wpływa na większą odporność układu regulacji na zakłócenia oraz tłumienie zakłóceń. Główną zaletą regulatora MFC jest jego dwutorowość, która pozwala niezależnie dostroić regulator na nadążanie za wartością zadaną oraz tłumienie zakłóceń

W celu sprostania wysokim wymaganiom jakości regulacji należy poszukiwać nowych rozwiązań w systemach sterowania. Przykładem rozwiązania, które charakteryzuje się wysoką jakością regulacji i odpornością na zakłócenia jest sterowanie z wykorzystaniem

w sposób aktywny modelu procesu podczas wyznaczania wartości sygnału sterującego. Jest to alternatywna metoda w stosunku do tradycyjnych sposobów regulacji.

7 Bibliografia

- Brzózka, Jerzy. 2006.** Problemy doboru dynamiki modelu w układzie regulacji MFC. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*. 2006, 10.
- Coleman, Brosilow i Babu, Joseph. 2002.** *Techniques of Model Baes Control*. Prentice Hall, 2002.
- Horla, Dariusz. 2003.** *Podstawy Automatyki ćwiczenia laboratoryjne*. Poznań : Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2003.
- Kościelny, Jan Maciej i Korbicz, Józef. 2009.** *Modelowanie, diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami. Implementacja w systemie DiaSter*. Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT , 2009.
- Osowski, Stanisław. 1996.** *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowo-Techniczne WNT, 1996.
- Simicz, Aleksander. 2006.** Zintegrowane środowisko projektowania i testowania regulatorów do sterowania rozproszonego. *Pomiary Automatyka Robotyka*. 2006, 11.
- Skoczowski, Stanisław. 2000.** *Technika regulacji temperatury*. Lublin : Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Konrola ; przy współpr. Lubuskich Zakładów Aparatów Elektrycznych LUMEL, 2000.
- Skoczowski, Stanisław, Osypiuk, Rafał i Pietruszewicz, Krzysztof. 2006.** *Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody*. Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2006.
- Szkolnikowski, Wojciech. 2008.** *Instrukcja Eksploatacyjna. Regulator - sterownik LB-600*. 2008.
- Tatjewski, Piotr. 2002.** *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*. Warszawa : Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, 2002.
- Visioli, Antonio. 2006.** *Practical PID Control*. Londyn : Springer-Verlag, 2006.