

## **ODPORNY REGULATOR MFC-PID TEMPERATURY I JEGO REALIZACJA NA STEROWNIKU PLC**

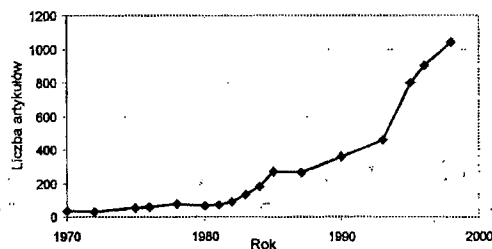
*W artykule omawiane są właściwości układu regulacji nadążającej za modelem (Model Following Control) obiektu sterowanego, zawierającego nominalny model obiektu oraz dwa regulatory PID. Porównuje się wrażliwość układu na zakłócenia, oraz szumy przetworników pomiarowych z układem klasycznym. Okazuje się, że zalety proponowanej realizacji algorytmu sterowania MFC w sterowniku programowalnym pozwala znaleźć szerokie zastosowanie w aplikacjach przemysłowych, szczególnie tam, gdzie chodzi o odporność układu regulacji w obecności perturbacji obiektu sterowanego, co pokazują wyniki prób praktycznych z obiektem cieplnym.*

### **A ROBUST MFC-PID TEMPERATURE CONTROLLER AND ITS IMPLEMENTATION ON PLC**

*The paper deals with properties of a Model Following Control system that includes a nominal process plant model and two PID controllers. System sensitivity to disturbances and measurement transducer induced noise is compared with those offered by the classic single-feedback system. The proposed implementation appears to be particularly promising where the control system should exhibit its robustness in the presence of process plant perturbations, which is well illustrated by results of tests carried out on a electrothermal plant.*

### **1. WPROWADZENIE**

Potrzeba stosowania algorytmu PID zostało udowodniona jego wieloletnim stosowaniem w praktyce przemysłowej. W dzisiejszych czasach rozwój techniki cyfrowej, rozwój teorii sterowania, metod identyfikacji, oraz strojenia regulatorów pozwala na odkrywanie tego algorytmu na nowo, w bardziej zaawansowany sposób. O wzroście popularności algorytmu PID w aplikacjach świadczyć może zwiększenie liczby publikacji poświęconych temu typowi regulacji automatycznej. Praca [6] zawiera systematyczny przegląd ostatnio publikowanych prac na temat: techniki strojenia regulatorów PID, odpornych algorytmów PID, identyfikacji dla PID, studiów teoretycznych, zastosowań PID w systemach wielowymiarowych oraz układach o stałych rozłożonych, wykorzystania sieci neuronowych oraz logiki rozmytej w algorytmach PID. W artykule [1] zawarto dane na temat liczby publikacji, poświęconych algorytmowi PID w ostatnich 30 latach, co pokazano na Rys. 1.



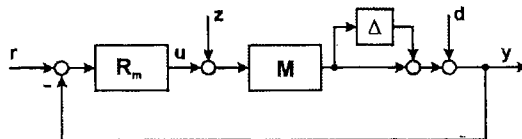
Rys. 1. Publikacje na temat regulatorów PID w ostatnich 30 latach

Widać zatem, że algorytm regulacji PID jest ciągle w szerokim kręgu zainteresowań nauki oraz przemysłu. Problematyka identyfikacji modelu sterowanego obiektu oraz strojenia regulatorów PID wykorzystana w tej pracy znajduje swe odzwierciedlenie w publikacjach [4, 10, 13, 15, 20, 22]. Realizacja algorytmu PID jako logiki rozmytej jest przedmiotem między innymi artykułów [2, 5, 21].

W prezentowanym artykule zaproponowano prostą modyfikację układu klasycznego, dzięki której uzyskano znaczną poprawę odporności i jakości regulacji. Struktura MFC w prezentowanym tutaj kształcie jest przedmiotem publikacji [11-18], chociaż na temat układów, które za cel stawiają sobie nadążanie za modelem, lub zawierają wewnętrzny model sterowanego procesu można przeczytać np. w pracach [7, 8, 19].

## 2. WŁAŚCIWOŚCI UKŁADU MFC-PID

Na Rys. 2. pokazano schemat klasycznego układu regulacji, uwzględniający zakłócenia na wejściu obiektu  $z(t)$ , na wyjściu  $d(t)$ , oraz multiplikatywną perturbację nominalnego modelu sterowanego obiektu  $\Delta$ . Ponieważ regulator projektowany jest na podstawie wiedzy o nominalnym modelu obiektu, zatem na Rys. 2. oznaczono go jako  $R_m$ , natomiast  $r$  określa wartość zadaną dla wyjścia obiektu  $y$ .



Rys. 2. Klasyczny układ regulacji

Wyjście układu klasycznego dane jest wzorem (1)

$$y(s) = r(s) \frac{R_m(s)P(s)}{1 + R_m(s)P(s)} + z(s) \frac{P(s)}{1 + R_m(s)P(s)} + d(s) \frac{1}{1 + R_m(s)P(s)} \quad (1)$$

Uwzględniając zależność, opisującą multiplikatywną perturbację nominalnego modelu obiektu, daną równaniem (2)

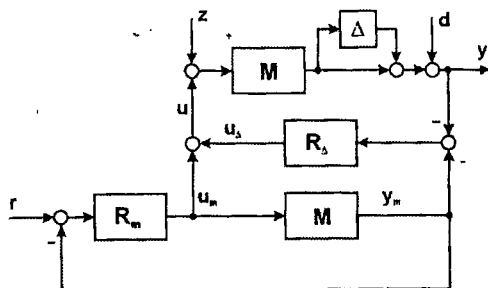
$$P(s) = M(s)[1 + \Delta(s)] \quad (2)$$

oraz zależność, opisującą teoretyczną odpowiedź nominalnego modelu  $M$  obiektu  $P$ , daną wzorem (3)

$$y_m(s) = r(s) \frac{R_m(s)M(s)}{1 + R_m(s)M(s)} \quad (3)$$

jak i dla uproszczenia pomijając w zapisie operator  $s$ , można zależność (1) przedstawić w postaci

$$y = y_m \left( 1 + \frac{\Delta}{1 + R_m M (1 + \Delta)} \right) + z \frac{M (1 + \Delta)}{1 + R_m M (1 + \Delta)} + d \frac{1}{1 + R_m M (1 + \Delta)} \quad (4)$$



Rys. 3. Proponowana struktura MFC-PID

Na Rys. 3. pokazano schemat proponowanej złożonej struktury układu regulacji, zawierającej w sobie dwa regulatory PID: regulator modelu  $R_m$  i regulator korekcyjny  $R_d$ , oraz wewnętrzny model sterowanego procesu  $M$ . Regulator modelu  $R_m$  strojony jest na podstawie informacji o parametrach modelu metodą marginesu fazy  $\Phi_m$ , opisywaną dokładnie m.in. w pracach [4, 13, 15]. Wytwarza on główną składową sygnału sterującego obiektem. Informacja na temat różnicy pomiędzy sygnałem wyjściowym z modelu  $y_m$  a sygnałem wyjściowym obiektu sterowanego jest sygnałem wejściowym regulatora korekcyjnego  $R_d$ , którego zadaniem jest takie korygowanie sygnału sterującego obiektem, aby jak najdokładniej odtwarzał zachowanie modelu  $M$ .

Wyjście proponowanej struktury MFC dane jest zależnością:

$$y(s) = r(s) \frac{R_m(s) P(s) [1 + R_d(s) M(s)]}{[1 + R_m(s) M(s)] [1 + R_d(s) P(s)]} + \dots \quad (5)$$

$$\dots + z(s) \frac{P(s)}{1 + R_d(s) P(s)} + d(s) \frac{1}{1 + R_d(s) P(s)}$$

Zapisując zależność (5) analogicznie do (4), dla układu MFC uzyskuje się

$$y = y_m \left( 1 + \frac{\Delta}{1 + R_d M (1 + \Delta)} \right) + z \frac{M (1 + \Delta)}{1 + R_d M (1 + \Delta)} + d \frac{1}{1 + R_d M (1 + \Delta)} \quad (6)$$

Regulator korekcyjny może być nastrojony również metodą marginesu fazy  $\Phi_m$ , przy czym zakłada się spełnienie warunku (7) dla jego nastaw [11, 12]

$$|R_d(j\omega)| > |R_m(j\omega)|, \quad \omega \in [0, \infty) \quad (7)$$

Okazuje się, że spełnienie warunku (7), poza znacznym zmniejszeniem wpływu perturbacji  $\Delta$  na sygnał wyjściowy z obiektu w przypadku proponowanej struktury, zapewnia o wiele lepsze tłumienie zakłóceń zarówno na wejściu, jak i na wyjściu obiektu, w porównaniu z klasycznym układem regulacji.

### 3. WRAŻLIWOŚĆ UKŁADU I TŁUMIENIE ZAKŁÓCEŃ

Poniższy przykład pokazuje znaczną poprawę jakości regulacji w przypadku zastosowania proponowanej struktury MFC-PID. Dany jest nominalny model  $M$  obiektu sterowania  $P$ . Opisująca go transmitancja podana jest wzorem

$$M(s) = \frac{1}{(1+s10)(1+s20)(1+s40)} \quad (8)$$

Rzeczywisty proces  $P$  odbiega właściwościami dynamicznymi od modelu, co opisuje zależność (9)

$$P(s) = \frac{1}{(1+s10)(1+s33.3)(1+s111.11)} \quad (9)$$

Regulator modelu  $R_m$ , którego nastawy wyznaczono według metody marginesu fazy  $\Phi_m$  dla modelu  $M$ , a którego transmitancja dana jest zależnością

$$R(s) = k_c \frac{(1+sT_i)(1+sT_d)}{sT_i} \quad (10)$$

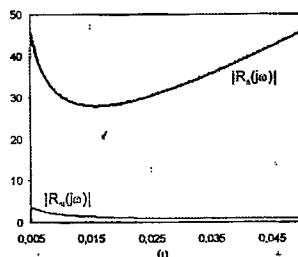
posiada następujące parametry

$$\text{dla } \Phi_m \geq \frac{\pi}{3}, k_c = 0.7, T_i = 40, T_d = 10 \quad (11)$$

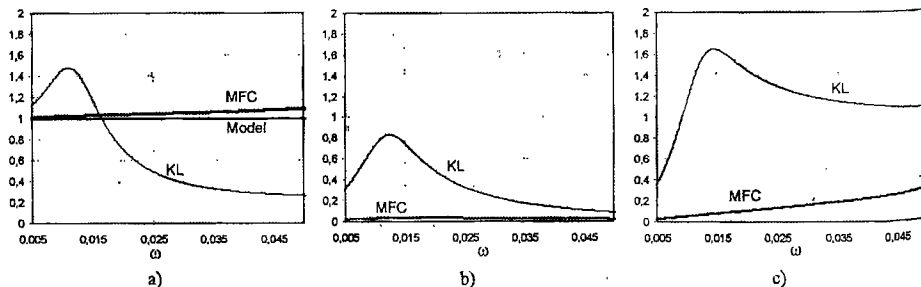
Regulator korekcyjny  $R_d$  posiada następujące parametry, dzięki którym spełniony jest warunek (7)

$$k_c = 20, T_i = 100, T_d = 40 \quad (12)$$

Spełnienie warunku (7) dla parametrów regulatorów w (8)–(12) pokazuje Rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe regulatorów  $R_m(s)$ ,  $R_d(s)$



Rys. 5. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe: a) nadążania za wyjściem modelu  $M$ , b) wrażliwości na zakłócenia na wejściu obiektu  $z(t)$ , c) wrażliwości na zakłócenia na wejściu obiektu  $d(t)$

Z przebiegów, zamieszczonych na Rys. 5. płynie wniosek, że dzięki takiemu doborowi nastaw regulatorów w pętli modelu i korekcyjnego, który spełniał będzie zależność, daną wzorem (7), proponowana struktura charakteryzuje się dużo dokładniejszym odtwarzaniem wyjścia modelu  $y_m$ , a zakłócenia zarówno na wejściu obiektu  $P$ , jak i sprowadzone do jego wyjścia są znacznie bardziej tłumione, w porównaniu z układem klasycznym. Struktura MFC ponadto charakteryzuje się prostotą, a dobór nastaw regulatorów PID jest oczywisty.

#### 4. REGULATOR MFC-PID W STEROWNIKU SA100

W celu realizacji praktycznej algorytmu model-following, został wykorzystany sterownik programowalny SA100, którego system operacyjny opracowano w ramach współpracy OBR ME METROL z Zielonej Góry i Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej. Programowanie w języku wysokiego poziomu, jakim jest język C166, pozwala w prosty sposób dokonywać modyfikacji funkcjonalności użytego sterownika.

Jak pokazuje rozwój techniki mikroprocesorowej w dziedzinie sterowników programowalnych, większość firm produkujących PLC oraz oprogramowanie użytkowe, zamieszcza różnego rodzaju języki wysokiego poziomu jako element dostępny podczas pisania programów sterowania, zarówno procesami dyskretnymi, jak i ciągłymi. Są to języki oparte głównie na standardzie ANSI C, ale również Pascal, Basic, Visual Basic, Visual C++, czy technologia ActiveX. Niemal każdy sterownik programowalny dysponuje swoim własnym, specyficznym językiem programowania graficznie zorientowanego, dodatkowo opartego na obiektach i klasach (pojęcia z języka C++), co pozwala użytkownikowi w prosty sposób tworzyć nawet duże projekty. Nie należy jednak zapominać, że ciągle dostępne są dla użytkownika języki standardu PN-IEC 61131-3: język drabinkowy (LAD), język listy instrukcji (IL), tekst strukturalny (ST), czy język Grafset (SFC), opisane dokładnie w pracach [3, 9].

W przypadku realizacji praktycznej algorytmu regulacji typu model-following mamy do czynienia z szerokim problemem, jaki występuje w sterownikach programowalnych, a mianowicie ze sterowaniem procesem ciągłym (zmiany temperatury).

Sterowanie procesami ciągłymi [3] wymaga od programisty PLC wzięcia pod uwagę różnicy pomiędzy obsługą przez sterownik wejść/wyjść dyskretnych i wejść/wyjść analogowych (ciągłych).

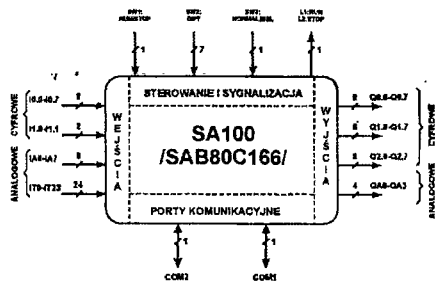
Problem sterowania procesami ciągłymi, w tym także regulacji temperatury, przy użyciu sterowników programowalnych rozwiązuje się dwojako:

- stosując rozwiązania sprzętowe (dodatkowe moduły regulacyjne)
- rozbudowując oprogramowanie sterownika (rozwiązanie programowe)

W przypadku rozwiązania sprzętowego zastosowanie mają tak zwane moduły regulacyjne, dołączane do sterownika programowalnego. Wadą rozwiązania sprzętowego są związane z nim duże koszty.

Znacznie tańsze jest zmodyfikowanie istniejącego oprogramowania sterownika o nowe algorytmy, funkcje regulacyjne. Algorytm regulacji nie jest realizowany przez fizyczne moduły, a stanowi specjalne bloki (funkcje) programu, z których korzysta programista sterownika. Rozwiązanie programowe, zastosowane tutaj do realizacji układu regulacji typu model-following, przeważa zatem z uwagi na niski koszt oraz możliwość wykonania w większości istniejących sterowników programowalnych [2, 3].

Sterownik SA100, wykorzystany do realizacji programowej algorytmu MFC, jest specjalizowanym sterownikiem programowalnym, dedykowanym do sterowania procesami cieplnymi. Na Rys. 6. przedstawiono schemat funkcjonalny SA100 z zaznaczonymi wejściami i wyjściami dostępnymi dla użytkownika. Na Rys. 6. pokazano maksymalną możliwą liczbę wejść i wyjść sterownika. Może ona być mniejsza, zależy to od konkretnego zastosowania.



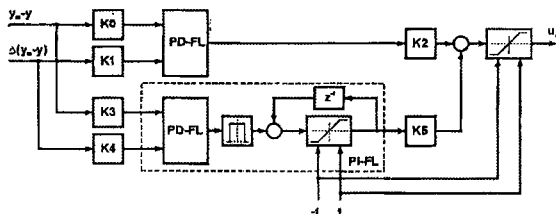
Rys. 6. Zasoby systemowe sterownika programowalnego SA100

Jak powszechnie wiadomo, technika analogowa nie pozwalała w sposób swobodny badać różnorodnych złożonych struktur układów regulacji. Rozwój technologii cyfrowej, w tym sterowników programowalnych, daje nowe możliwości nauce.

Ponieważ pokazane tu rozwiązanie, złożone z dwóch regulatorów PID oraz wewnętrznego modelu sterowanego procesu jest układem bardzo elastycznym jeżeli chodzi o zastosowane algorytmy regulatorów, zatem możliwa jest realizacja, w której korekta  $u_A$  będzie realizowana np. przez regulator zrealizowany jako rozmyty (ang. Fuzzy-Logic).

W pracach [2, 5, 21] znaleźć można struktury układów realizujących algorytm fuzji-logic-PID, oraz różne zasady doboru ich nastaw.

Rys. 7. pokazuje strukturę regulatora, opisywaną w pracy [2]. Sygnałami wejściowymi regulatora korekcyjnego  $R_A$  są: różnica pomiędzy wyjściem modelu  $y_m$  a wyjściem obiektu  $y$ , oraz pochodna tej różnicy.

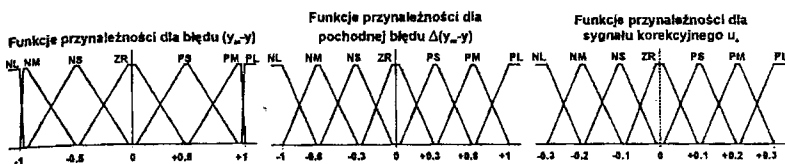


Rys. 7. Regulator korekcyjny  $R_A$  zrealizowany jako Fuzzy-Logic-PID

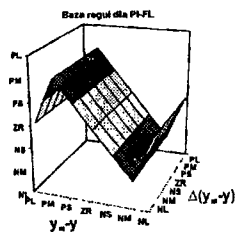
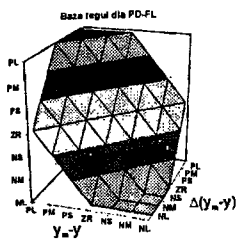
Współczynniki  $K_0$ - $K_5$  są wzmocnieniami poszczególnych torów:

- $K_0$  – wzmocnienie proporcjonalne toru PD (wejście)
- $K_1$  – wzmocnienie różniczkowania toru PD (wejście)
- $K_3$  – wzmocnienie całkowania toru PI (wejście)
- $K_4$  – wzmocnienie proporcjonalne toru PI (wejście)
- $K_2$  – wzmocnienie wyjścia toru PD
- $K_5$  – wzmocnienie wyjścia toru PI

Rys. 8. oraz Tab. 1. pokazują odpowiednio funkcje przynależności oraz bazy reguł regulatora korekcyjnego  $R_{\Delta}$  zrealizowanego w logice rozmytej, na podstawie pracy [2].



Rys. 8. Funkcje przynależności dla regulatora korekcyjnego o algorytmie FL-PID



$e \downarrow \Delta e \rightarrow$	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL

$e \downarrow \Delta e \rightarrow$	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NL	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR
NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR
PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
PL	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR	ZR

NL-Negative Large, NM-Neg. Medium, NS-Neg. Small, ZR- Zero Reaction, PS-Positive Small, PM-Pos. Medium, PL-Pos. Large

Tab. 1. Bazy reguł torów PD oraz PI zastosowanego regulatora korekcyjnego  $R_{\Delta}$

Sterowanie procesami ciągłymi za pomocą sterownika programowalnego jest dość złożonym problemem, zatem w drodze do realizacji rzeczywistego urządzenia – regulatora temperatury, celowym jest sprawdzenie poprawności tworzonych algorytmu i zastosowanych rozwiązań poprzez symulację komputerową.

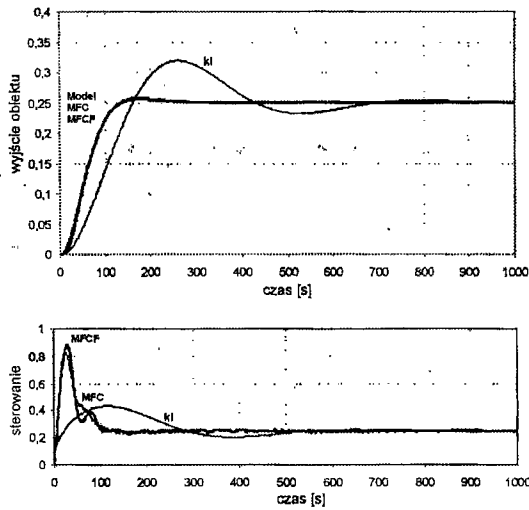
Badania symulacyjne pozwalają w szybki sposób sprawdzić, i zweryfikować wszystkie błędy – od błędnej idei algorytmu regulacji do samego sposobu działania proponowanej struktury jako funkcji regulacyjnej sterownika programowalnego.

## 5. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań symulacyjnych układów regulacji w przypadku odpowiedzi na zmianę wartości zadanej  $r$ :

- klasycznego (KL), dla obiektu, danego równaniem (9), którego nominalny model opisuje (8), z regulatorem wyznaczonym na bazie informacji o tym modelu  $R_m$  (11)
- proponowanego (MFC), z regulatorem korekcyjnym, nastrojonym tak, aby spełniona była zależność (7), a którego parametry dane są w (12)
- proponowanego (MFCF – ang. Model Following Control with Fuzzy-logic), z regulatorem korekcyjnym zrealizowanym w logice rozmytej, którego parametry:

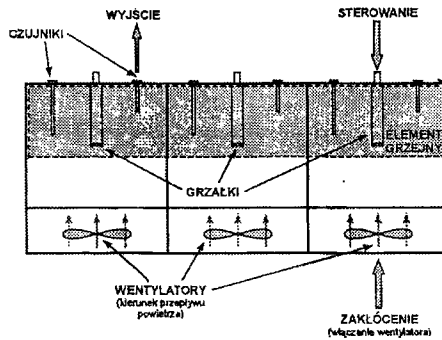
$K_0=1.00$ ,  $K_1=10.00$ ,  $K_3=2.50$ ,  $K_4=99.99$ ,  $K_2=175.0$ ,  $K_5=0.02$ , zostały dobrane metodą prezentowaną w pracy [2], przedstawia Rys. 9.



Rys. 9. Układ klasyczny (IAE=38.05), MFC-PID (IAE=16.08), MFCF-PID (16.46), dla perturbacji dynamiki (stałych czasowych)

Widać, jak spełnienie warunku (7) dla zastosowanych regulatorów w przypadku proponowanej struktury MFC poprawia jakość regulacji. Również realizacja korekty w logice rozmytej daje bardzo dobre rezultaty.

Poza licznymi badaniami symulacyjnymi realizacji algorytmu MFC jako funkcji regulacyjnej sterownika programowalnego SA100, przeprowadzono również badania praktyczne z zastosowaniem rzeczywistego elementu cieplnego, którego budowę przedstawia Rys. 10.



Rys. 10. Obiekt cieplny wykorzystany do praktycznych badań algorytmu MFC-PID

Główny element wykorzystanego obiektu cieplnego stanowi blok aluminium o wymiarach 50cm×10cm×5 cm, z umieszczonymi w nim czujnikami temperatury (Pt100) i grzałkami (3 patronowe elementy grzejne o mocy 500W przy napięciu 220V). Zakłócenie może zostać wprowadzone albo jako włączenie wentylatora w wybranej strefie, albo też jako włączenie grzania stref sąsiednich. Pozwala to na różnorodny dobór obiektów sterowania. Obiekt wybrany do celów badań nad porównywanymi układami: klasycznym i MFC przedstawiony jest również na Rys. 10.



W wyniku doświadczenia identyfikacji modelu obiektu sterowania [10] określono w uproszczeniu postać transmitancji modelu nominalnego

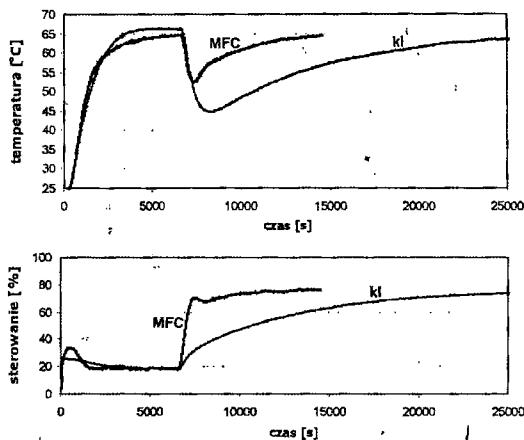
$$M = \frac{1e^{-s100}}{(1+s340)(1+s1000)} \quad (13)$$

Parametry regulatorów modelu  $R_m$  i korekcyjnego  $R_d$ , opisują odpowiednio zależności (14) i (15)

$$R_m : k_c = 1.5, T_i = 1400, T_d = 170 \quad (14)$$

$$R_d : k_c = 10, T_i = 2000, T_d = 0 \quad (15)$$

Na Rys. 11. pokazano odpowiedź badanych układów na zakłócenie w postaci włączenia wentylatora w strefie jak na Rys. 10. przy temperaturze zadanej równej 65 [°C]. Maksymalna temperatura możliwa do osiągnięcia w obiekcie wynosiła około 140 [°C]. Widać, jak proponowana struktura MFC z uwagi na swoje właściwości zapewnia w prosty sposób dużo większe tłumienie wpływu tego zakłócenia.



Rys. 11. Wyniki badania na obiekcie cieplnym – tłumienie zakłócenia w postaci włączenie wentylatora w pierwszej strefie

## 6. PODSUMOWANIE

Podsumowując, można stwierdzić, że wyniki przeprowadzonych badań, zarówno symulacyjnych, jak i praktycznych poza tym, że pokazują wyższość układu MFC nad klasyczną strukturą regulacji, pod względem nadążania za wartością zadaną oraz tłumienia zakłóceń, to pokazują działanie proponowanego algorytmu w rzeczywistym urządzeniu – sterowniku programowalnym. Z punktu widzenia możliwości aplikacyjnych algorytmu MFC (Model Following Control) jest to bardzo ważne, i może być wykorzystane w szeroko rozumianym przemyśle.

## 7. LITERATURA

1. Åström K. J., Albertos P., Quvedo J.: PID control. Control Eng. Practice, Vol. 9, 2001, s. 1159–1161

2. Broel-Plater, B.: Zastosowanie algorytmu fuzzy-logic w przemysłowych regulatorach TC. Mat. IV Sympozjum Pomiary i sterowanie w procesach przemysłowych, Zielona Góra, 1999, s. N1-N8
3. Broel-Plater B.: Sterowniki programowalne. Właściwości i zasady stosowania. Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2000
4. Ho W. K., Hang C.C., Cao L.S.: Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications. Automatica, 1995, Vol. 31, No. 3, s. 497-502
5. Ketata R., De Geest D., Titli A.: Fuzzy controller: design, evaluation, parallel and hierarchical combination with a PID controller. Fuzzy Sets and Systems, 1995, No. 71, s. 113-129.
6. Lelić M., Gajić Z.: A reference guide to PID Controllers in the nineties. Proc. IFAC Workshop on Digital Control, Past, Present and Future of PID Control, Terrasa, Spain, 2000, s. 73-82
7. Li, G., Tsang K.M., Ho S.L.: A novel model following scheme with simple structure for electrical position servo systems. International Journal of Systems Science, 1998, 29, s. 959-969
8. Morari, M. Zafiriou, E.: Robust Process Control. Prentice-Hall, NJ, 1989
9. Öhman M., Johansson, Årzén K.-E.: Implementation aspects of the PLC standard IEC 1131-3. Control Eng. Practice, 1998, Vol. 6, s. 547-555
10. Skoczowski S.: Evaluation of order and the spread of time constants for aperiodic processes using step response. Control Eng. Practice, 1997, Vol. 5, No 8, s. 1077-1089
11. Skoczowski S.: Odporny układ regulacji temperatury z wykorzystaniem modelu obiektu. Pomiary Automatyka Kontrola, Nr 9/1999, s. 2-4
12. Skoczowski S.: Robust model following control with use of a plant model. International Journal of Systems Science, 2001, 32, s. 1413-1427
13. Skoczowski S.: Deterministyczna identyfikacja i jej wykorzystanie w odpornej regulacji PID temperatury. Wyd. Politechniki Szczecińskiej, 2001, Szczecin
14. Skoczowski S.: Model Following Control (MFC) – nowe struktury układów regulacji i ich właściwości. Konferencja Modelowanie i sterowanie w Elektrotermii, Kielce 2000, s. 63-70
15. Skoczowski S.: Projektowanie odpornego regulatora PID dla procesów n-tego rzędu z opóźnieniem. Konferencja AUROMECON 2002, Poznań, 19 czerwca 2002, s. 40-45
16. Skoczowski S.: Control system structures and their robustness. PAK 6/2003, s. 5-9
17. Skoczowski S., Pietruszewicz K., Broel-Plater B.: Model following PID control and its implementation on PLC. 8<sup>th</sup> IEEE Int. Conference MMAR, 2002, s. 1225-1230
18. Skoczowski S., Domek S., Pietruszewicz K., Broel-Plater B.: Robust model following PID control and its implementation on PLC. 4<sup>th</sup> IFAC Symposium on Robust Control Design, 2003, CD (Proceedings w druku)
19. Sugie V., Osuka K.: Robust model following control with prescribed accuracy for uncertain nonlinear systems. Int. Journal of Control, vol. 58, 1993, pp. 991-1009
20. Tan K.K., Wang Q. G.: Hang C. C., Hägglund T. J.: Advances in PID Control. Springer-Verlag, 1999, London
21. Woo Z., Chung H., Lin J.: A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors. Fuzzy Sets and Systems, 2000, No. 115, s. 321-326
22. Ziegler J., Nichols N.: Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME, 1942, Vol. 64, s. 759-768