

## Paweł BIAŁY, Paweł DWORAK

POLITECHNIKA SZCZECIŃSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ

# MFC/AVG - nowy odporny układ regulacji

### Mgr inż. Paweł BIAŁY

Urodził się w 1976r., ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej w roku 2000 (kierunek Automatyka i Robotyka). 2005 roku ukończył Studia Doktoranckie na Wydziale Elektrycznym PS. Specjalizuje się w sterowaniu i optymalizacji układów regulacji nowoczesnych systemów grzewczych.

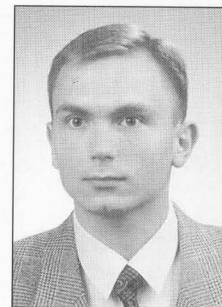
e-mail:



### dr inż. Paweł DWORAK

Urodzony 17.09.1974r. w Gryfinie, ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej w roku 1999 (kierunek Automatyka i Robotyka). Bezpośrednio po studiach podjął pracę asystenta w Zakładzie Automatyki Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej. Stopień dra nauk technicznych uzyskał na Wydziale Elektrycznym PS w roku 2005. Zajmuje się problemami analizy i syntezy wielowymiarowych układów sterowania.

e-mail: Pawel.Dworak@ps.pl



### Streszczenie

W artykule przedstawia się nową odporną strukturę regulacji MFC/AVG (MFC) stanowiącą modyfikację znanego w literaturze układu MFC (Model-Following Control) [1-8]. Proponowana struktura charakteryzuje się dużą odpornością na perturbacje sterowanego obiektu oraz małą wrażliwością na występujące w układzie zakłócenia. Cechuje ją jednak większe niż w MFC tłumienie zakłóceń oraz aperiodyczność przebiegów przejściowych. Rozważania zilustrowano wynikami symulacji procesu doregulowywania zawartości tlenu w kotłach parowych. Dokonano porównania jakości regulacji dla układu klasycznego z regulatorem PID, MFC oraz MFC/AVG.

### Abstract

W artykule przedstawia się nową odporną strukturę regulacji MFC/AVG (MFC) stanowiącą modyfikację znanego w literaturze układu MFC (Model-Following Control) [1-8]. Proponowana struktura charakteryzuje się dużą odpornością na perturbacje sterowanego obiektu oraz małą wrażliwością na występujące w układzie zakłócenia. Cechuje ją jednak większe niż w MFC tłumienie zakłóceń oraz aperiodyczność przebiegów przejściowych. Rozważania zilustrowano wynikami symulacji procesu doregulowywania zawartości tlenu w kotłach parowych. Dokonano porównania jakości regulacji dla układu klasycznego z regulatorem PID, MFC oraz MFC/AVG.

**Key words:** Robust PID control, Model-Following Control

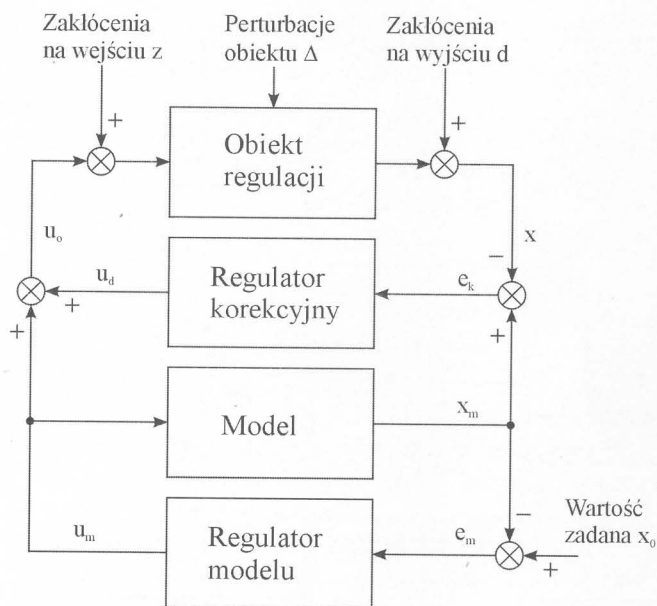
**Słowa kluczowe:** Regulacja odporna, regulacja PID, nadążanie za modelem

## 1. Wstęp

Doświadczenia w pracy z rzeczywistymi obiektami przemysłowymi wskazują na bardzo istotną, z punktu widzenia prawidłowości funkcjonowania układu regulacji, własność instalacji przemysłowych - zmienność parametrów procesu w funkcji czasu. Wynika ona między innymi z podatności instalacji na wszelkiego rodzaju zabrudzenia, powstawania luzów mechanicznych podzespołów. W warunkach przemysłowych urządzenia poddawane są działaniu różnego rodzaju gazów, pyłów, wilgoci, podlegają reakcjom chemicznym itp. Ma to ogromne znaczenie z punktu widzenia regulacji, ponieważ nastawy regulatorów są dobierane tak, aby urządzenie pracowało prawidłowo w momencie strojenia regulatora i każda zmiana obiektu skutkuje „dezaktualizacją” nastaw regulatora. Proces regulacji w nowych warunkach nie przebiega wówczas w sposób „odpowiedni” co może prowadzić nawet do destabilizacji układu regulacji. W celu ograniczenia wpływu perturbacji obiektu oraz zmniejszenia wrażliwości układu na zakłócenia poszukuje się coraz to nowych struktur układów regulacji. Z powodów praktycznych powinny one jednak w dalszym ciągu cechować się prostą, w porównaniu do klasycznego układu z regulatorem PID, budowa i sposobem strojenia. Takimi układami wydają się być struktury dwupętlowe MFC (model following control) [1-8]. Ale i one mogą nie rozwiązać wszystkich problemów szczególnie w sterowaniu pewnymi specyficznymi obiektami regulacji. Do takich obiektów zaliczyć należy np. proces doregulowywania zawartości tlenu dostarczanego do palnika w kotle parowym.

## 2. Struktura układu MFC/AVG

W klasycznej strukturze MFC (rys. 1.) zakłada się wykorzystanie modelu matematycznego sterowanego obiektu oraz dwóch regulatorów: modelu i regulatora korekcyjnego. W strukturze tej pętla modelu jest zawsze stabilna, zatem podstawowym determinantem stabilności układu regulacji jest praca pętli obiektu z regulatorem korekcyjnym.



Rys. 1. Schemat blokowy układu MFC  
Fig. 1. MFC system structure

Zakładając, że rzeczywisty obiekt  $P(s)$  różni się od przyjętego modelu  $M(s)$  o nieznane, ale ograniczone perturbacje multiplikatywne  $\Delta(s)$

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

$$|\Delta(s)| \leq \tilde{\Delta} \leq 1, s = j\omega, \omega \in [0, \infty)$$
(1)

układ sterowania z rys. 1. można opisać równaniem

$$x_{mfc}(s) = x_0(s) \frac{R_m(s)P(s)(1 + R_d(s)M(s))}{(1 + R_m(s)M(s))(1 + R_d(s)P(s))} + \frac{d(s)}{1 + R_d(s)M(s)(1 + \Delta(s))} + \frac{z(s)M(s)(1 + \Delta(s))}{1 + R_d(s)M(s)(1 + \Delta(s))}$$
(2)

w którym  $x_0(s)$  jest transformatą sygnału wartości zadanej  $x_0(t)$  a  $d(s)$  i  $z(s)$  transformatami zakłóceń na wyjściu i wejściu obiektu (np. szum pomiarowy i zmiana obciążenia).

Analiza układów MFC dokonana w m.in. pracach [1-8] wykazała, że możliwe jest jednoczesne znaczne zwiększenie odporności i zmniejszenie wrażliwości układu sterowania w stosunku do kla-

sychnego układu regulacji z regulatorem PID. W dalszym jednak ciągu duży błąd  $e_k = x_m - x$  prowadzić może do destabilizacji układu regulacji czy też przy zachowaniu stabilności znaczne pogorszenie jakości sterowania. Jest to szczególnie istotne w sytuacji, w której stawia się szczególne wymagania co do (jakości, rodzaju) przebiegów przejściowych po zmianie wartości zadanej, obciążenia czy pojawieniu się zakłóceń. Dlatego też podjęto próbę modyfikacji struktury MFC w celu znalezienia struktury posiadającej lepsze właściwości regulacyjne.

W proponowanej, nowej strukturze MFC (MFC/AVG) przedstawionej na rys. 2 sygnałem wejściowym regulatora korekcyjnego  $e_k$  jest różnica pomiędzy sygnałem wyjściowym obiektu i średnią z sygnałów wyjściowych obiektu i modelu

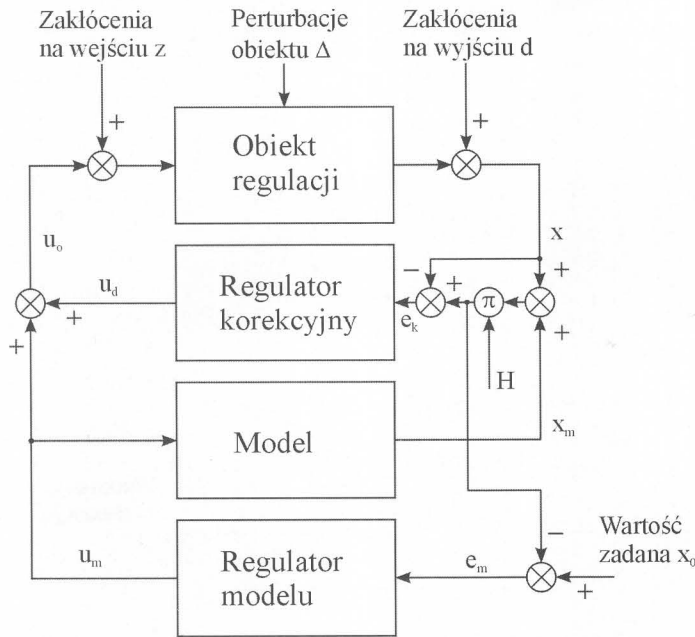
$$e_k = x - H(x + x_m), \quad (3)$$

gdzie  $H$  jest współczynnikiem uśredniania.

Modyfikacji podlega również ujemne sprzężenie zwrotne w pętli modelu

$$e_m = x_o - H(x + x_m). \quad (4)$$

Efektom tych zmian jest mniejsza niż w standardowym układzie MFC wartość sygnału  $e_k$  a co za tym idzie znaczna poprawa jakości regulacji przy większej niż w klasycznym układzie regulacji z regulatorem PID odporności układu na zmienność obiektu względem modelu.



Rys. 2. Schemat blokowy struktury MFC (MFC/AVG)  
Fig. 2. MFC (MFC/AVG) system structure

Współczynnik  $H$  może być dobrany w zależności od specyfiki procesu. Należy jednak pamiętać, że powinny być spełnione warunki

$$\frac{x_m}{x_m + x} \leq H \leq \frac{x}{x_m + x}, \quad \text{dla } x \geq x_m \quad (5)$$

i

$$\frac{x}{x_m + x} \leq H \leq \frac{x_m}{x_m + x}, \quad \text{dla } x \leq x_m. \quad (6)$$

W przypadku kolejnego uśredniania np. sygnału już uśrednionego  $H(x + x_m)$  i wyjścia modelu  $x_m$ , zostanie przyjęty model bliższy zakładanemu modelowi obiektu  $M(s)$ . Tak więc zmiana liczby uśrednień oraz zmiana wartości współczynnika  $H$  daje duże możliwości zmiany właściwości układu regulacji, nawet bez dokonywania zmian nastaw stosowanych regulatorów. W artykule przedstawiono wyniki analizy teoretycznej układu dla  $H=0,5$ .

### 3. Analiza wrażliwości struktury MFC

Analizując schemat blokowy (rys. 2) można zapisać

$$x_{mfc}(s) = x_o(s) \frac{P(s)R_m(s)[1+R_d(s)M(s)H]}{1+R_m(s)M(s)H+P(s)R_m(s)H-P(s)R_d(s)H+P(s)R_d(s)+P(s)R_d(s)R_m(s)M(s)H} + d(s) \frac{1+M(s)R_m(s)H}{1+R_m(s)M(s)H+P(s)R_m(s)H-P(s)R_d(s)H+P(s)R_d(s)+P(s)R_d(s)R_m(s)M(s)H} + z(s) \frac{P(s)[1+M(s)R_m(s)H]}{1+R_m(s)M(s)H+P(s)R_m(s)H-P(s)R_d(s)H+P(s)R_d(s)+P(s)R_d(s)R_m(s)M(s)H} \quad (7)$$

z czego wynika, że wrażliwość układu na zakłócenia „ $z$ ” na wejściu i „ $d$ ” na wyjściu obiektu, dla  $H=0,5$  określają wzory (dla uproszczenia w zapisie kolejnych wzorów pomija się operator  $s$ )

$$S_{z,mfc}|_{H=0.5} = \frac{(1+\Delta)M(2+MR_m)}{2+M(1+\Delta)R_d+M(1+\Delta)R_m+MR_m+M^2(1+\Delta)R_dR_m} \quad (8)$$

i

$$S_{d,mfc}|_{H=0.5} = \frac{2+MR_m}{2+M(1+\Delta)R_d+M(1+\Delta)R_m+MR_m+M^2(1+\Delta)R_dR_m} \quad (9)$$

Porównując zdolność tłumienia zakłóceń w strukturach MFC i PID otrzymuje się

$$\frac{S_{z,mfc}|_{H=0.5}}{S_{z,pid}} = \frac{(2+MR_m)(1+R_mM(1+\Delta))}{2+M(1+\Delta)R_d+M(1+\Delta)R_m+MR_m+M^2(1+\Delta)R_dR_m} \quad (10)$$

dla zakłóceń na wejściu obiektu oraz

$$\frac{S_{d,mfc}|_{H=0.5}}{S_{d,pid}} = \frac{(2+MR_m)(1+M(1+\Delta)R_m)}{2+M(1+\Delta)R_d+M(1+\Delta)R_m+MR_m+M^2(1+\Delta)R_dR_m} \quad (11)$$

dla zakłóceń na jego wyjściu.

Analogicznie można wyznaczyć stosunek zdolności tłumienia zakłóceń w układach MFC i MFC. Dla zakłóceń na wejściu obiektu otrzymuje się wyrażenie

$$\frac{S_{z,mfc}|_{H=0.5}}{S_{z,mfc}} = \frac{(2+MR_m)(1+R_dM(1+\Delta))}{2+M(1+\Delta)R_d+M(1+\Delta)R_m+MR_m+M^2(1+\Delta)R_dR_m} \quad (12)$$

a dla zakłóceń na jego wyjściu

$$\frac{S_{d,mfc}|_{H=0.5}}{S_{d,mfc}} = \frac{(2+MR_m)(1+M(1+\Delta)R_d)}{2+M(1+\Delta)R_d+M(1+\Delta)R_m+MR_m+M^2(1+\Delta)R_dR_m} \quad (13)$$

Analiza wzorów (porównań) (10) do (13) pozwala stwierdzić, że układ MFC posiada większą zdolność tłumienia zakłóceń od układu klasycznego z regulatorem PID, jednak mniejszą niż struktura MFC. Wnioski takie są prawdziwe przy założeniu, że regulator korekcyjny struktury MFC jest identyczny jak w strukturze MFC, czyli że

$$|R_{d,MFC}| = |R_{d,MFC}| \quad (14)$$

W przypadku, gdy

$$|R_{d,MFC}| > \left| \frac{2R_{d,MFC} + MR_m R_{d,MFC} - R_m}{1 + MR_m} \right| \quad (15)$$

układ MFC może charakteryzować się najlepszą, spośród porównywanych struktur, zdolnością tłumienia zakłóceń od strony wejścia jak i wyjścia obiektu.

### 4. Ekperyment praktyczny

Jednym z procesów wymagających dużej odporności na zmiany obiektu i zarazem małej wrażliwości na zakłócenia jest regulacja zawartości tlenu w spalinach kotła parowego. Wymogi technologiczne narzucają takie sterowanie obiektem, aby proces ten odbywał się bez przeregulowań z jak najkrótszym czasem regulacji. Zbyt duża zawartość tlenu w spalinach oznacza bowiem pogorszenie efektywności spalania gazu, zbyt mała osadzanie się sadzy na

powierzchniach komory spalania, co w efekcie również powoduje obniżenie sprawności procesu podgrzewania wody w kotle.

Do opisu zmian zawartości tlenu w spalinach kotła parowego przyjęto model [2-4]

$$M(s) = \frac{0.53e^{-s}}{s^2 + 0.53s + 0.11} \quad (16)$$

Regulator PID w pętli modelu  $R_m(s)$  dobrano uwzględniając zadane zapasy amplitudy i fazy zgodnie z procedurami zamieszczonymi w [9-11] jako

$$R_m(s) = 0.3 + \frac{0.035}{s} + 0.8s \quad (17)$$

Zgodnie z procedurą doboru regulatora korekcyjnego  $R_d(s)$  zaproponowaną w [9, 10] regulator ten przyjęto jako

$$R_d(s) = 0.35 + \frac{0.046}{s} + 0.16s \quad (18)$$

tak, aby pętla regulacji model-regulator korekcyjny spełniała kryterium max. 10% przeregulowania.

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki symulacji procesu regulacji zawartości tlenu w spalinach kotła parowego z wykorzystaniem układu MFC/AVG. Wykorzystane w tych symulacjach model obiektu, regulator modelu i regulator korekcyjny opisują wyrażenia (16) do (18). Przyjęto ponadto, że rzeczywisty obiekt podlegać będzie (w stosunku do modelu) właściwym dla kotła parowego zmianom wzmocnienia, opóźnienia i dynamiki.

I tak założono, że transmitancja pierwszego z badanych obiektów opisana będzie wzorem

Obiekt 1:

$$P(s) = \frac{0.8e^{-2s}}{s^2 + 0.7s + 0.11} \quad (19)$$

a drugiego z nich wzorem

Obiekt 2:

$$P(s) = \frac{0.53e^{-s}}{s^2 + 0.4s + 0.09} \quad (20)$$

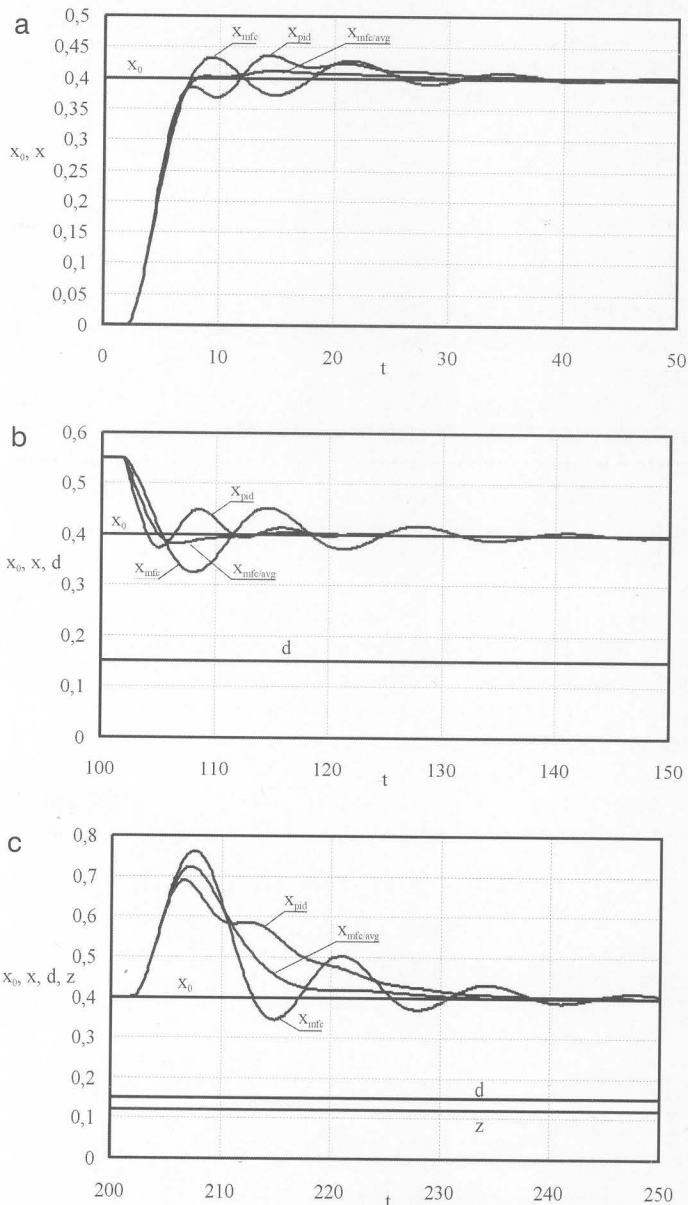
Dla obu perturbowanych obiektów przeprowadzono symulacje, które składały się z trzech następujących po sobie testów. Symulację rozpoczyna badanie odpowiedzi układu na skokową zmianę wartości zadanej. W tej fazie regulacja odbywała się bez obecności zakłóceń. Po 100s (ustaniu procesów przejściowych) dokonano skokowej zmiany wartości zakłóceń na wyjściu obiektu  $d=0.15$ . Po dalszych 100s dokonano natomiast zmiany wartości zakłóceń na wejściu obiektu  $z=0.12$ .

Próby te przeprowadzono dla trzech różnych układów regulacji: w układzie klasycznym z regulatorem PID (z regulatorem  $R_m(s)$ ), w układzie MFC oraz MFC/AVG.

Wyniki powyższych symulacji dla obiektu (19) przedstawiono na rys. 3, a dla obiektu (20) na rys. 4.

W tabelach nr 1 i 2 zestawiono parametry opisujące jakość sterowania uzyskana dla poszczególnych układów sterowania. Parametrami tymi jest: przeregulowanie  $OVS=E1/x_0$  dla części a) symulacji, przeregulowanie  $OVS=E2/E1$  dla części b) symulacji, tłumienie zakłóceń  $DMP=(E2+E3)/(E1/E2)$  dla części c) oraz czasy regulacji dla każdej fazy testu (dla 5% progu błędu regulacji).  $E1$ ,  $E2$  i  $E3$  oznaczają różnice pomiędzy kolejnymi ekstremami przebiegu sygnału wyjściowego a wartością  $x_0$ .

Analiza przebiegów sygnałów wyjściowych i parametrów je opisujących wskazuje wyraźnie na MFC/AVG jako układ o najlepszych właściwościach regulacyjnych. W każdej próbie cechuje go najkrótszy lub jeden z najkrótszych czasów regulacji przy zdecydowanie najniższym przeregulowaniu i tłumieniu zakłóceń.

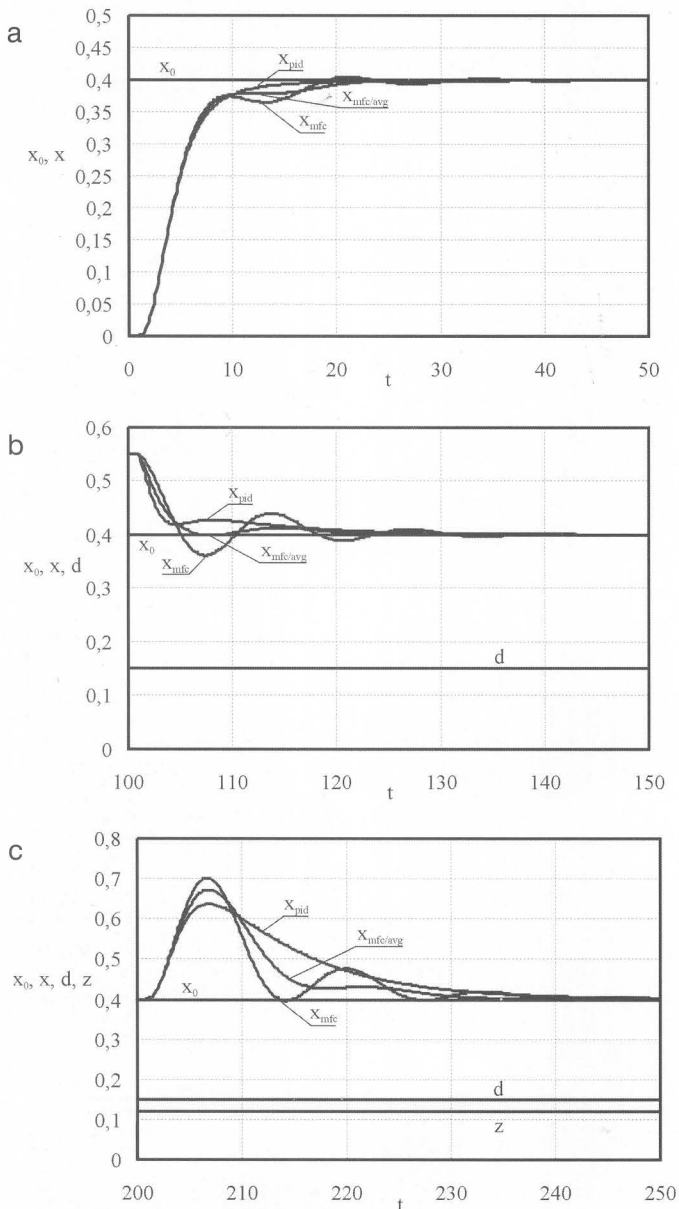


Rys. 3. Porównanie wyników symulacji układów regulacji: klasycznej z regulatorem PID, MFC oraz MFC dla obiektu nr 1 dla skokowych zmian:

Fig. 3. Comparison of the results of simulations for the control structures: PID, MFC and MFC for the plant no 1 after step changes of: a) set value (with no disturbances), b) disturbances  $d$ , c) disturbances  $d$  and  $z$ .

Tabela 1. Zestawienie wartości przeregulowania, tłumienia zakłóceń oraz czasów regulacji w różnych strukturach sterowania dla obiektu nr 1.  
Table 1. Juxtaposition of the values of overshoots, disturbance damping coefficients and setting times in various control structures for the plant no 1.

Struktura:	PID	MFC	MFC/AVG
<b>OVS i DMP</b>	%	%	%
OVS - część a symulacji (bez zakłóceń)	9.1	8.1	2.9
OVS - część b symulacji (zakłócenia $d$ )	17.6	49.9	12.2
DMP - część c symulacji (zakłócenia $z$ )	15.9	37.9	0.0
<b>Czas regulacji przy zmianie:</b>	czas [s]	czas [s]	czas [s]
wartości zadanej (bez zakłóceń)	22.8	23.5	7.1
zakłóceń $d$	10.6	23.1	4.5
zakłóceń $z$	29.2	36.6	18.7



Rys. 4. Porównanie wyników symulacji układów regulacji: klasycznej z regulatorem PID, MFC oraz MFC dla obiektu 2 dla skokowych zmian: a) wartości zadanej (bez zakłóceń), b) zakłóceń  $d$ , c) zakłóceń  $d$  i  $z$ .  
Fig. 4. Comparison of the results of simulations for the control structures: PID, MFC and MFC for the plant no 2 after step changes of: a) set value (with no disturbances), b) disturbances  $d$ , c) disturbances  $d$  and  $z$ .

Tabela 2. Zestawienie wartości przeregulowania, tłumienia zakłóceń oraz czasów regulacji w różnych strukturach sterowania dla obiektu nr 2.  
Table 2. Juxtaposition of the values of overshoots, disturbance damping coefficients and setting times in various control structures for the plant no 2.

Struktura:	PID	MFC	MFC/AVG
<b>OVS i DMP</b>	%	%	%
OVS - część a symulacji (bez zakłóceń)	0.0	1.1	0.0
OVS - część b symulacji (zakłócenia $d$ )	-12.5	26.0	0.6
DMP - część c symulacji (zakłócenia $z$ )	0.0	26.5	1.3
<b>Czas regulacji przy zmianie:</b>	czas [s]	czas [s]	czas [s]
wartości zadanej (bez zakłóceń)	10.7	16.5	15.4
zakłóceń $d$	12.9	16.6	4.9
zakłóceń $z$	31.5	24.6	26.3

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiona została koncepcja modyfikacji układu MFC, której celem jest, przy zachowaniu znacznej odporności na perturbacje obiektu i małej wrażliwości układu na zakłócenia, dalsze poprawienie jakości regulacji. Jako kryterium jakości rozumie się tutaj poprawę takich parametrów opisujących przebieg regulacji jak przeregulowanie, tłumienie zakłóceń czy czas regulacji. Poprawa ta odbywa się dzięki modyfikacji (w artykule zmniejszeniu) wartości sygnału wejściowego do regulatora korekcyjnego. Eliminuje się tym samym podstawową wadę układu MFC jaką jest periodyczność przebiegów przejściowych wartości regulowanych wielkości.

Wyniki badań symulacyjnych potwierdzają rozważania teoretyczne i wskazują niezbicie na możliwość wykorzystania układu MFC/AVG do regulacji wielu „trudnych” procesów przemysłowych.

## 6. Literatura

- [1] P. Biały, K. Pietrusiewicz: Logika rozmyta w zastosowaniach przemysłowych na przykładzie odpornego układu MFC/IMC. Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie, Istebna-Zaolzie, październik 2004.
- [2] P. Biały, K. Pietrusiewicz: MFC/IMC w regulacji procesu o zmiennym opóźnieniu na przykładzie O2 w kotle parowym 2.8 MW (4 t/h). Pomiary Automatyka Kontrola 2004, nr 10.
- [3] P. Biały, K. Pietrusiewicz: Odporna struktura MFC/IMC - I część. Napędy i Sterowanie 2003, nr 8.
- [4] P. Biały, K. Pietrusiewicz: Odporna struktura MFC/IMC - II część. Napędy i Sterowanie 2003, nr 9.
- [5] K. Pietrusiewicz: Aplikacja algorytmu model-following control w programowalnym sterowniku automatyki. Wydział Elektryczny, Politechnika Szczecińska, Rozprawa doktorska 2005.
- [6] K. Pietrusiewicz, S. Skoczowski: Odporny regulator MFC-PID temperatury i jego realizacja na sterowniku PLC. AUTOMATION, Warszawa 2004.
- [7] S. Skoczowski: Deterministyczna identyfikacja i jej wykorzystanie w odpornej regulacji PID temperatury. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2001.
- [8] S. Skoczowski: Model following PID control with a fast model. Proc. of the 6th Portuguese Conference on Automatic Control, Faro, Portugal, 2004.
- [9] S. Skoczowski: Projektowanie odpornego regulatora PID, oparte o przybliżoną identyfikację modelu dla procesów z opóźnieniem. Pomiary Automatyka Kontrola 2004, nr 7/8.
- [10] S. Skoczowski, K. Pietrusiewicz: New method of simplified identification for PID-OVR design. Proc. CD of IEEE International Conference on Modeling, Simulation & Applied Optimization ICMSAO'05, Sharjah, U.A.E., 2005
- [11] A. Żuchowski: Metoda doboru nastaw regulatora PID uwzględniająca postulowany zapas stabilności modułu i fazy. Pomiary Automatyka Kontrola 2004, nr 1.

**Title:** MFC/AVG, a new robust control system

Artykuł recenzowany