

**Paweł DWORAK, Krzysztof JAROSZEWSKI,
Michał BRASEL**

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Elektrotechniki

Rozmyty regulator TSK do sterowania nagrzewnicą

Streszczenie. W artykule przedstawia się strukturę układu regulacji z rozmytym regulatorem Takagi Sugeno Kanga zastosowaną do sterowania wielowymiarowym (MIMO) obiektem cieplnym. Taki regulator TSK zastosowany w pętli modelu układu MFC zapewnia stabilność i wysoką jakość sterowania w pełnym zakresie zmian punktów pracy układu. Sygnał sterujący jest obliczany jako ważona suma sygnałów wyjściowych z wielowymiarowych regulatorów modalnych. Pozytywne wyniki działania proponowanego układu przemawiają za tym, że proponowana metoda syntezy sterowania może znaleźć szerokie zastosowanie w projektowaniu odpornych układów sterowania nieliniowymi obiektami cieplnymi o zmiennych w czasie lub perturbowanych parametrach.

Słowa kluczowe: Sterowanie odporne, MFC, logika rozmyta, obiekty cieplne MIMO.

Wstęp

W rzeczywistych układach sterowania, jednym z podstawowych problemów utrudniających uzyskanie wysokiej jakości regulacji jest nieliniowość i niestacjonarność obiektu regulacji. Pomimo znacznego rozwoju algorytmów syntezy nieliniowych układów sterowania jaki dokonał w ostatnich latach, w dalszym ciągu powszechnie stosuje się rozwiązania wykorzystujące najczęściej liniowe opisy sterowanych procesów.

Niestety regulator zaprojektowany z użyciem liniowych modeli jest tym samym optymalny jedynie w rozpatrywanym punkcie pracy. Nieliniowości obiektu czy perturbacje jego parametrów mogą powodować pogorszenie zakładanej jakości regulacji a nawet utratę stabilności układu. Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest adaptacja układu sterowania do zmieniającego się punktu pracy układu. Typowym podejściem jest stosowanie grupy regulatorów przełączalnych w zależności od aktualnego punktu pracy układu. W przypadku tym poza problemem właściwego zaprojektowania poszczególnych regulatorów pozostaje do rozwiązania zadanie wyboru sposobu i momentu właściwego ich przełączania. Dlatego też problemy przełączania w układach sterowania poruszane są w wielu pracach [1-3], w tym również dla regulatorów MIMO [3-9].

W artykule zapobieganie negatywnym skutkom nieliniowości procesu proponuje się rozwiązać wykorzystując przełączalną strukturę regulatorów modalnych do budowy jednego rozmytego regulatora typu Takagi Sugeno Kanga. Regulator ten ma zapewnić stabilność i wysoką jakość sterowania w całym zakresie pracy urządzenia oraz wyeliminować występujące w praktyce trudności w realizacji układów sterowania z regulatorami przełączalnymi.

Dodatkowo omawia się wykorzystanie proponowanego rozmytego regulatora TSK w strukturze Model Following Control (MFC), znanej z wyjątkowej odporności na perturbacje parametrów i/lub struktury sterowanego procesu [10,11], jak również z dużej zdolności tłumienia zakłóceń, w tym również dla obiektów o wielu wejściach i wielu wyjściach [6,7,10].

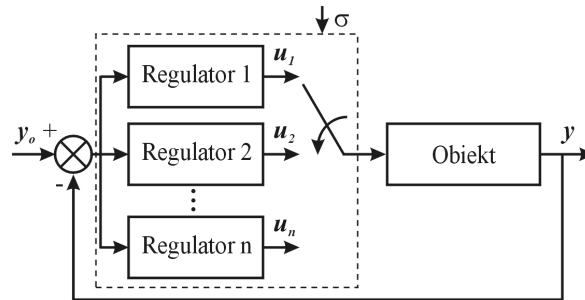
VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Opisywana struktura układu regulacji prezentowana jest na przykładzie układu do sterowana pracą rzeczywistego obiektu cieplnego MIMO (o wielu wejściach i wielu wyjściach) jakim jest nagrzewnica. Jest to obiekt silnie nieliniowy, którego parametry w torze temperatury silnie zależą od aktualnego punktu pracy – aktualnej wartości temperatury i prędkości przepływającego powietrza

Przedstawione w artykule wyniki prób sterowania nagrzewnicą potwierdzają zalety proponowanego rozwiązania i wskazują na możliwość wykorzystania struktury MFC_MIMO_TSK z rozmytym wielowymiarowym regulatorem modalnym w układach regulacji z nieliniowymi obiektami cieplnymi o zmiennych w czasie, perturbowanych parametrach.

Problemy przełączalnych układów regulacji

Jednym z najbardziej typowych i praktycznych rozwiązań problemu sterowania obiektami nieliniowymi jest zastosowanie struktury układu regulacji z wieloma liniowymi regulatorami przełączalnymi. Struktura taka przedstawiona jest na rysunku 1. Syntezy poszczególnych regulatorów dokonuje się w trybie off-line dla konkretnych punktów pracy układu. Wyboru odpowiedniego regulatora dokonuje się w trakcie regulacji zależnie od aktualnego punktu pracy, określanego przez sygnał lub grupę sygnałów σ .



Rys. 1. Struktura układu z przełączanymi regulatorami

W praktyce jednak ze stosowaniem tego typu rozwiązania wiąże się kilka ważnych problemów technicznych. Przede wszystkim każdy regulator, jako oddzielny układ dynamiczny, na którego wejście podawany jest sygnał błędny regulacji, musi być stabilny, co w ogólności w zamkniętej pętli regulacji nie jest warunkiem koniecznym. Dodatkową trudnością, która się pojawia w praktyce jest wielowymiarowość obiektu i występowanie wzajemnych oddziaływań między poszczególnymi wejściami i wyjściami obiektu.

Do tej pory autorzy prezentowali już kilka metod sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO opartych o strukturę przełączalną regulatorów [8-9], a także układy wykorzystujące strukturę MFC_MIMO z przełączanymi pętlami modeli wraz z dynamicznym odprężaniem obiektu wielowymiarowego [5-7]. Jednak we wszystkich tych rozwiązaniach podstawowym problemem występującym w praktyce jest nadal problem dopasowania regulatora (z pośród ograniczonej ich liczby) do aktualnego punktu pracy sterowanego obiektu.

Rozwiązaniem pozwalającym uniknąć powyższych problemów jest zastosowanie prezentowanej w dalszej części pracy struktury MFC_MIMO_TSK z rozmytym regulatorem modalnym.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Synteza regulatorów modalnych

Do zaprojektowania rozmytego regulatora modalnego TSK potrzebny jest zestaw liniowych regulatorów modalnych zsyntezowanych dla wybranych punktów pracy nieliniowego obiektu regulacji. Syntezy poszczególnych regulatorów można dokonać w trybie off-line dobrze znanymi metodami w dziedzinie operatorowej bądź bezpośrednio w dziedzinie czasowej [12-13].

Punktem wyjściowym do syntezy regulatora modalnego jest zlinearyzowany opis obiektu sterowania, będący jego liniowym przybliżeniem w wybranym nominalnym punkcie pracy, przedstawiony w postaci równań stanu i wyjść:

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned}$$

gdzie: $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ i $y(t) \in R^l$ są wektorami stanu, wejść i wyjść.

Zadanie syntezy regulatora sprowadza się do wyznaczenia macierzy sprzężeń zwrotnych F lokującej bieguny układu zamkniętego w pożądanych miejscach oraz macierzy wzmacnień L obserwatora Luenbergera pełnego rzędu dla odpowiednio dobranych biegunów obserwatora o bardziej ujemnych częściach rzeczywistych w porównaniu z przyjętymi wcześniej wartościami biegunów układu. Taki sposób postępowania w dziedzinie czasowej prowadzi do uzyskania regulatorów modalnych opisanych równaniami stanu i wyjść:

$$(2) \quad \begin{aligned} \dot{x}_r(t) &= A_r x_r(t) + B_r e(t) \\ u(t) &= C_r x_r(t) + D_r e(t) \end{aligned}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} A_r &= A - BF - LC \\ B_r &= L \\ C_r &= -F \\ D_r &= 0 \end{aligned}$$

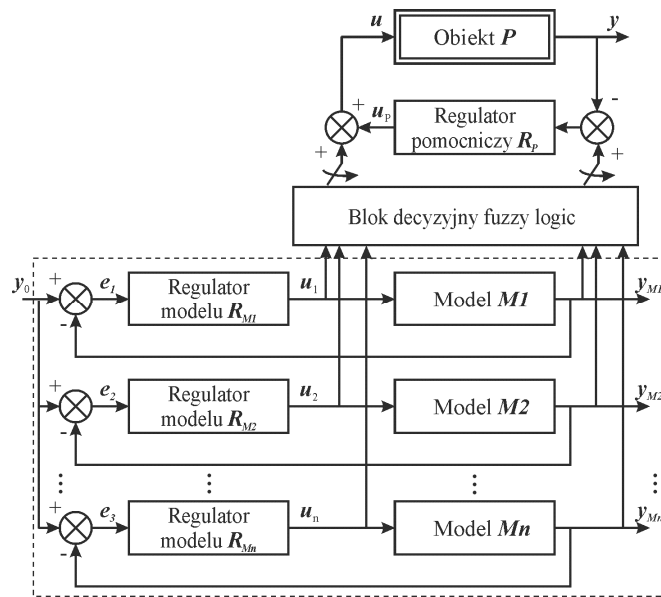
Tak zaprojektowane wielowymiarowe regulatory modalne zapewniają pożądaną dynamikę układu zamkniętego w ustalonym punkcie pracy i mogą posłużyć do budowy rozmytego regulatora modalnego TSK. W odróżnieniu od wspomnianych struktur z regulatorami przełączalnymi prezentowanymi na rysunku 1, w przypadku proponowanej struktury regulatora MFC_MIMO_TSK nie wymaga się aby zaprojektowane regulatory były stabilnymi układami dynamicznymi, czyli układ zamknięty nie musi być stabilny w sensie mocnym.

Układ MFC_MIMO_TSK do sterowania nagrzewnicą

Struktura układu MFC_MIMO_TSK przedstawiona jest na rysunku 2. W klasycznej strukturze MFC_MIMO zakłada się wykorzystanie modelu matematycznego sterowanego obiektu oraz dwóch regulatorów: modelu i regulatora korekcyjnego [10,11,14]. W proponowanym rozwiązaniu układ klasyczny rozbudowany jest o wiele pętli modelu - każda obliczona dla określonego punktu pracy – oraz algorytm decyzyjny fuzzy logic wypracowujący referencyjny sygnał sterujący i wyjściowy. Sygnały te obliczane są tu jako ważona suma wyjść wielu (bądź wszystkich) wielowymiarowych

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

regulatorów modalnych (pętle modelu) zaprojektowanych dla wybranych punktów pracy obiektu regulacji. W bloku decyzyjnym fuzzy logic obliczane są wagi przypisane do wszystkich składowych sygnałów sterujących (wyjściowych), a następnie, zgodnie z regułami Takagi Sugeno Kanga, generowany jest jeden wypadkowy sygnał sterujący (wyjściowy).

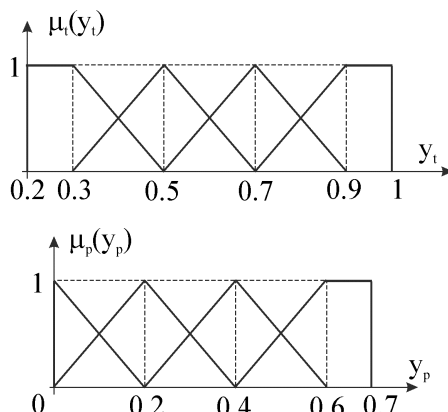


Rys. 2. Struktura układu MFC_MIMO_TSK z blokiem decyzyjnym fuzzy logic

Dla testowanego w artykule obiektu nagrzewnicy przyjęto, że punkty pracy określane są przez wartości temperatury i przepływu wydychanego powietrza, oznaczonych jako y_t oraz y_p . Cały obszar pracy podzielono na 16 części projektując 16 regulatorów dla punktów pracy określonych wartościami temperatury 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 i przepływu powietrza 0, 0.2, 0.4, 0.6. Przyjęte funkcje przynależności dla tych regulatorów określono jak na rysunku 3.

W prezentowanej strukturze MIMO_MFC_TSK istnieją dwie możliwości przeprowadzania układu do pożądanego punktu pracy określonego przez wartości zadane y_{t0} i y_{p0} . W zależności od wyboru sygnałów wejściowych podawanych na blok decyzyjny FL możemy uzyskać dwa różne rozwiązania ważonej sumy sygnałów wyjściowych regulatorów. Jeśli sygnałami podawanymi na blok decyzyjny będą wartości zadane y_{t0} i y_{p0} wówczas obliczone wartości wagowe będą odpowiadały tylko danemu punktowi pracy. Natomiast jeśli sygnałami decyzyjnymi bloku FL będą aktualne wartości wyjściowe układu regulacji y_t i y_p , sygnały wagowe wyznaczone będą na bieżąco dla aktualnego stanu, w którym znajduje się obiekt regulacji.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 3. Przyjęte funkcje przynależności dla temperatury i przepływu powietrza w bloku decyzyjnym fuzzy logic

To drugie rozwiązanie bazujące na aktualnych sygnałach wyjściowych może dać lepsze wyniki w porównaniu z pierwszym, szczególnie w przypadku, gdy różnice w dynamice obiektu między dwoma punktami pracy będą znaczące. Jednak wadą tego rozwiązania jest wrażliwość wypracowywanych przez blok decyzyjny sygnałów wagowych na zakłócenia pomiarowe wielkości regulowanych. Występujące silne zakłócenia wielkości wyjściowych będą przenosić się na wypracowywane sygnały wagowe, a w dalszej kolejności na sygnały sterujące i tym samym na sygnały wyjściowe obiektu. W celu redukcji skutków tego efektu można stosować filtry pomiarowe sygnałów wyjściowych bądź odpowiednie układy eliminujące wpływ szumów pomiarowych na sygnały wagowe w stanie ustalonym. Najprostszym rozwiązaniem tego problemu w stanie ustalonym może być określenie pewnego obszaru wokół zadanego punktu pracy, w którym sygnały wagowe będą ustalone na stałych wartościach odpowiadających temu punktowi pracy.

Badania eksperymentalne

Powyższe rozważania teoretyczne potwierdzone są pozytywnymi wynikami działania proponowanej struktury MIMO_MFC_TSK. Prezentowane poniżej wyniki otrzymano podczas prób regulacji przeprowadzonych w układzie z rzeczywistym wielowymiarowym obiektem cieplnym o wielu wejściach i wielu wyjściach. Obiektem tym jest nagrzewnica, w której wielkościami regulowanymi są przepływ oraz temperatura wypływającego powietrza. Sterowanie powyższymi wielkościami odbywa się z wykorzystaniem grzałki oraz wentylatora o zmiennych odpowiednio mocy i obrotach. Oba urządzenia sterowane są sygnałami 4-20mA. Podobnie mierzone wartości temperatury (w przedziale 20-80°C) oraz przepływu (różnica ciśnień na kryzje pomiarowej 0-50mm H₂O) konwertowane są na sygnał elektryczny o zakresie 4-20mA.

Nagrzewnica jest obiektem silnie nieliniowym, którego parametry w torze temperatury tj. wzmocnienie i dynamika silnie zależą od aktualnego punktu pracy – aktualnej wartości temperatury i prędkości przepływającego powietrza. Wzmocnienie podlega zmianom od wartości 0,4 przy wysokich wartościach temperatury i dużych przepływach do 1,5 dla niskich temperatur i niskich wartościach przepływów. Podobnym wahaniom podlega dynamika toru sterowania temperaturą (stałe czasowe) obiektu – zmiany od 30 do 110 sekund dla modelu inercji pierwszego rzędu. W torze sterowania przepływem stała czasowa wynosi ok. 1,5s. Obiekt posiada ponadto bardzo nieliniową charakterystykę

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

statyczną w torze pomiaru przepływu. Z uwagi na zastosowany układ wykonawczy wszystkie prezentowane w eksperymencie wartości podawane są jako bezwymiarowe (0-1).

W badanej strukturze MIMO_MFC_TSK każdy z regulatorów modalnych występujących w pętli modelu zaprojektowany został dla biegunów układu zamkniętego przyjętych następująco:

$$s_{ukl} = [-0.11 \quad -0.12 \quad -0.13 \quad -0.14 \quad -0.15]$$

oraz dla biegunów obserwatora Luenbergera:

$$s_{obs} = [-0.21 \quad -0.22 \quad -0.23 \quad -0.24 \quad -0.25]$$

Przyjęto, że regulator korekcyjny, bazujący na informacji na temat różnicy pomiędzy wyjściami modelu i procesu ma postać diagonalnej macierzy wzmocnień. Nastawy regulatorów pomocniczych (typu PI) dobrano następująco: ($k=1$ i $T_i=0.01$) oraz ($k=0.5$ i $T_i=0.03$) odpowiednio dla toru temperatury i toru przepływu.

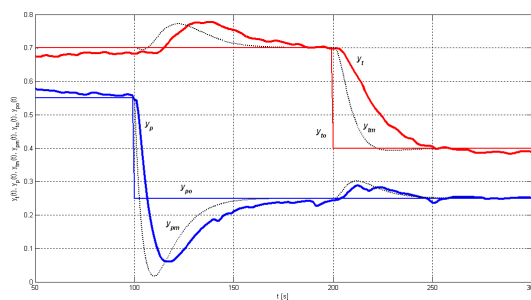
W prezentowanych poniżej wynikach regulacji na rzeczywistym obiekcie zadaniem układu regulacji było przeprowadzenie obiektu z aktualnego do nowego punktu pracy: najpierw poprzez zmianę wartości zadanej przepływu z 0.55 na 0.25 a następnie poprzez zmianę wartości zadanej temperatury z 0.7 na 0.4.

Zgodnie z rozważaniami teoretycznymi przedstawionymi powyżej wyróżniono dwa przypadki, w których blok decyzyjny FL oblicza poszczególne wagi sygnałów wyjściowych z odpowiednich regulatorów:

a) na podstawie zadanej punktu pracy (y_{t0} , y_{p0})

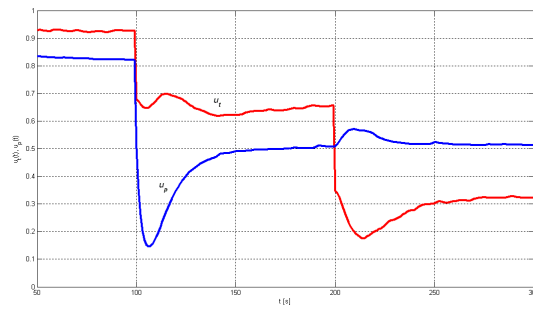
b) na podstawie bieżącej wartości temperatury y_t i zadanej wartości przepływu y_{p0}

W przypadku b) w celu wyeliminowania efektu drgań sygnałów wagowych przyjęto 2% obszar w otoczeniu zadanego punktu pracy, w którym wagi poszczególnych sygnałów sterujących ustalane są na stałych wartościach przypisanych do tego punktu pracy. Na rysunkach 4-7 przedstawiono wyniki przeprowadzonych prób regulacji dla obu przypadków.

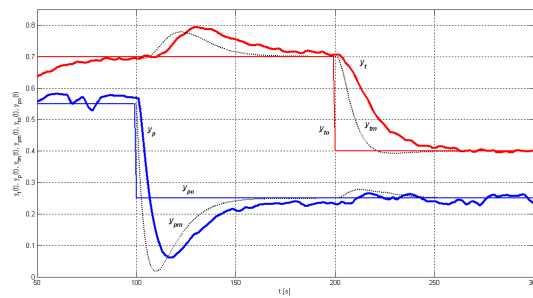


Rys.4. Wyniki regulacji wartości temperatury i przepływu powietrza nagrzewnicy w układzie MIMO-MFC-TSK, wersja a

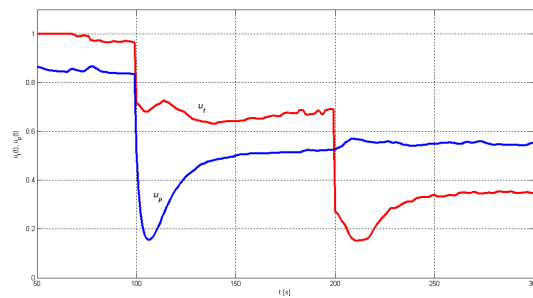
VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys.5. Przebieg sygnałów sterujących w torze temperatury i przepływu w układzie MIMO-MFC-TSK, wersja a



Rys.6. Wyniki regulacji wartości temperatury i przepływu powietrza nagrzewnicy w układzie MIMO-MFC-TSK, wersja b



Rys.7. Przebieg sygnałów sterujących w torze temperatury i przepływu w układzie MIMO-MFC-TSK, wersja b

Przedstawione wyniki działania prezentowanej struktury nie wykazały znaczących różnic w jakości sterowania w obu rozpatrywanych przypadkach poza większymi w przypadku b) drganiami sygnałów wyjściowych i sterujących w porównaniu z przypadkiem a), co zgodne jest z oczekiwaniami teoretycznymi.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Przedstawione w artykule wyniki badań przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie cieplnym potwierdzają, że układ regulacji MIMO_MFC_TSK nie tylko może zapewniać wymaganą jakość regulacji nieliniowym obiektem MIMO, ale przede wszystkim skutecznie eliminuje opisane wcześniej problemy występujące w układach opartych o struktury z regulatorami przełączalnymi. Proponowana struktura jest rozwiązaniem pozwalającym uniknąć problemów związanych z koniecznością syntezy stabilnych regulatorów. Ponadto blok decyzyjny fuzzy logic na bieżąco oblicza wartości sygnałów wagowych i generuje wypadkowy sygnał sterujący (przypadek b), dzięki czemu nie istnieje problem wyboru odpowiedniej chwili przełączania między regulatorami, a przechodzenie do nowego punktu pracy zachodzi płynnie i bezuderzeniowo.

Podsumowanie

Wyniki działania układu z rozmytym regulatorem modalnym TSK zastosowanym w strukturze MIMO_MFC do sterowania wielowymiarowym obiektem cieplnym, potwierdzają skuteczność a zarazem efektywność proponowanej metody regulacji. Proponowane podejście pozwala na bezpieczną zmianę punktu pracy nieliniowego obiektu MIMO zapewniając przy tym wysoką jakość regulacji w każdym z tych punktów. Prezentowany w artykule układ MFC_MIMO_TSK posiada wiele cech czyniącym go niezwykle przydatnym narzędziem do sterowania nieliniowymi i niestacjonarnymi obiektami MIMO.

W przypadku sterowania nagrzewnicą w dalszym ciągu otwartą kwestią do dalszych badań i dyskusji jest problem odpowiedniego doboru ilości poszczególnych regulatorów, na bazie których działa rozmyty regulator TSK oraz problem określenia odpowiedniego przebiegu funkcji przynależności w bloku decyzyjnym fuzzy logic. W przypadku ogólnym są to zawsze rozwiązania specyficzne dla konkretnego nieliniowego obiektu regulacji.

Artykuł powstał częściowo dzięki wsparciu w ramach grantu MNiSW nr N514 679240, pt. „Zaawansowane układy i algorytmy sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO” – umowa nr 6792/B/T02/2011/40.

Literatura

- [1] Morse A.S., Control Using Logic-Based Switching, *Trends in Control: A European Perspective*, Springer-Verlag (1998), 69-113,
- [2] Shengxiang J.; Voulgaris P.G., Performance Optimization of Switched Systems: A Model Matching Approach, *IEEE transactions on automatic control*, 54 (2009), nr 9, 2058-2071
- [3] Yamé J., Kinnaert M., Delwiche T., Parametrization of MIMO multi-controller schemes for bumpless switching, *European Control Conference, ECC'07*, Kos, Greece (2007)
- [4] Dworak P., Pietruszewicz K., On possibility of applying the MFC idea to control the MIMO processes, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 12 (2006), pp. 25-29
- [5] Dworak P., Pietruszewicz K., Domek S., Improving stability and regulation quality of nonlinear MIMO processes, *MMAR 2009*, Międzyzdroje, 2009.
- [6] Dworak P., Pietruszewicz K., Misztal H., Regulator odporny dla wielowymiarowego obiektu cieplnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 5 (2010), pp. 301-303
- [7] Dworak P., Pietruszewicz K., Regulator o zmiennej strukturze w sterowaniu wielowymiarowym obiektem cieplnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 6 (2010), pp. 116-119
- [8] Bańka S., Dworak P., Brasel M.: O sterowaniu nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO w przełączalnej strukturze liniowych regulatorów modalnych. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 5, 2010, str. 385-391.
- [9] Bańka S., Brasel M., Dworak P., Latawiec K.J.: A Switched Structure of Linear MIMO Controllers for Positioning of a Drillship on a Sea Surface. *15th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, 2010.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

- [10] Domek S., Odporna regulacja predykcijna obiektów nieliniowych, *Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej*, Szczecin (2006)
- [11] Skoczowski S., Control system structures and their robustness, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 6 (2003), 5–9
- [12] Bańka S.: Sterowanie wielowymiarowymi układami dynamicznymi. Ujęcie wielomianowe. *Seria Monografie KAIR PAN, Tom 11, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej*, Szczecin 2007.
- [13] Mäkilä P.M., Partington J.R., On linear models for nonlinear systems, *Automatica*, 39 (2003), 1–13
- [14] Skoczowski S., Domek S., Pietrusewicz K., Broel-Plater B., A Method for Improving the Robustness of PID Control, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 52 (2005), nr 6, 1669–1676

Autorzy: dr inż. Paweł Dworak, dr inż. Krzysztof Jeroszewski, mgr inż. Michał Brasel, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin, E-mail: pawel.dworak@zut.edu.pl, krzysztof.pietrusewicz@zut.edu.pl, michal.brasel@zut.edu.pl