

Regulator o zmiennej strukturze w sterowaniu wielowymiarowym obiektem cieplnym

Streszczenie. W artykule przedstawia się odporny układ regulacji MFC z przełączanymi pętlami modeli sterowanego obiektu, do regulacji temperatury i przepływu powietrza w nagrzewnicy powietrza. Poszczególne pętle modeli projektowane są bądź to z wykorzystaniem algorytmu dynamicznego odprężania nominalnego modelu zlinearyzowanego procesu cieplnego MIMO, bądź z zastosowaniem klasycznych regulatorów PID. Prezentowany sposób przełączania regulatorów pozwala utrzymać wysoka jakość regulacji w szerokim zakresie zmian punktów pracy układu.

Abstract. The paper presents a robust two-degrees of freedom control system MFC, with switched model loops, tested for its performance on the regulation process of flow and temperature of air in the heater. The model loops are synthesized with the use of either the decoupled nominal model of the linearized MIMO process or classic PID controllers. The presented switching method allows one to achieve high regulation quality for a wide changes of working points of the system. Regulation tests lend support to the view that the proposed control method may find wide application to robust control of nonlinear thermal plants with time-varying or perturbed parameters. **(A variable structure controller for the MIMO Thermal Plant)**

Słowa kluczowe: Dynamiczne odsprężanie, sterowanie odporne, struktura MFC, obiekty cieplne MIMO, przełączanie regulatorów.

Keywords: Dynamic decoupling, robust control, MFC, MIMO thermal plants, switching controllers.

Wstęp

Stały wzrost możliwości nowoczesnego sprzętu automatyki daje podstawy do rozwoju efektywnych algorytmów sterowania procesami nieliniowymi [1-3]. Jednakże, stopień skomplikowania tych algorytmów jest szczególnie duży i niewygodny w implementacji przy sterowaniu obiektami szybkimi i/lub posiadającymi wiele wejść i wiele wyjść. Dlatego też, 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.

W przypadku obiektów o wielu wejściach i wielu wyjściach MIMO zapewnienie wysokiej jakości regulacji kontrolowanego procesu, głównie z powodu sprzężenia wejść obiektu z jego różnymi wyjściami, może być zadaniem wyjątkowo trudnym. Dlatego też odprężanie odgrywa bardzo istotną rolę w syntezie układów regulacji dla obiektów MIMO. Pozwala ono na niezależne traktowanie każdej z odsprężonych pętli regulacji. Niestety, algorytmy dynamicznego odsprężania wykorzystują najczęściej nominalny model obiektu. Regulator zaprojektowany z ich użyciem 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. Np. powszechnie stosowane w przemyśle regulatory posiadają funkcje zwaną gain-scheduling, która pozwala na predefiniowanie zestawów wartości nastaw regulatorów,

których stosowanie uzależnione jest od zakresów wartości wybranego sygnału procesowego. W przypadku tym poza problemem właściwego zaprojektowania poszczególnych regulatorów pozostaje do rozwiązania zadanie wyboru sposobu i momentu właściwego ich przełączania. W przypadku zmiany parametrów lub struktury regulatora podczas działania układu regulacji różnica pomiędzy sygnałami wyjściowymi poszczególnych regulatorów może powodować duże, skokowe zmiany sygnałów na wejściach sterowanego obiektu co, poza nadmiernym użyciem urządzeń wykonawczych, prowadzić może również do zakłóceń wyjść obiektu. Paradoksalnie więc niewłaściwie dobrane momenty zmian układu regulacji i błędnie przeprowadzone przełączenia prowadzić mogą do pogorszenia jakości regulacji. Dlatego też problemy przełączania w układach sterowania poruszane są w wielu pracach [4-6], w tym również dla regulatorów MIMO [7].

Najczęściej stosowane sposoby redukcji zagrożeń powodowanych przez omawiane powyżej problemy i techniki regulacji bazują na liniowych, lokalnych modelach regulowanego procesu. Modele te są jednak najczęściej obciążone dużymi błędami i są z definicji niepewne a sama regulacja odbywa się w obecności wielu niemierzalnych i nieidentyfikowanych zakłóceń. Zaprojektowany układ regulacji powinien więc dodatkowo cechować się dużą odpornością na perturbacje parametrów modeli jak i dużą zdolnością tłumienia zakłóceń. W artykule proponuje się zatem wykorzystanie struktur układu Model Following Control (MFC). Układ MFC, zaproponowany w [8] a następnie intensywnie badany [9-11], jest znany z wyjątkowej odporności na perturbacje parametrów i/lub struktury sterowanego procesu [2, 9], jak również z dużej zdolności tłumienia zakłóceń.

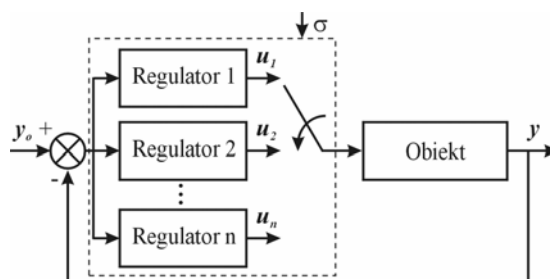
Aby wykorzystać proponowaną metodę sterowania zakłada się, że nieliniowy niezmienny w czasie proces (ang. nonlinear time-invariant; NLTI) może zostać zastąpiony obiektem liniowym o zmiennych w czasie parametrach (ang. linear time-variant; LTV) [12] Transformacja taka jest możliwa dla większości obiektów NLTI. Uwagi i wskazówki odnośnie tego problemu można znaleźć np. w [13].

W artykule w pełni wykorzystuje się tą teorię jak również zalety układu MFC do syntezy odpornego i o podwyższonej jakości regulacji układu sterowania dla nieliniowych obiektów MIMO. Zastosowany, do syntezy przełączalnych regulatorów, algorytm dynamicznego odsprzęgania, którego pełna wersja znajduje się w [14-16], gwarantuje dowolną lokalizację wszystkich biegunów układu oraz fizyczną realizowalność wszystkich elementów układu. Spełnia on więc wszystkie wymagania stawiane algorytmowi wykorzystywanemu w syntezie układu MFC.

W artykule przedstawia się możliwość wykorzystania układu MFC_MIMO z dynamicznym odsprzęganiem [17] do budowy przełączalnego układu regulacji nieliniowym wielowymiarowym obiektem cieplnym MIMO potwierdzając zalety proponowanej struktury w regulacji nieliniowymi obiektami cieplnymi o zmiennych w czasie, perturbowanych parametrach.

Przełączanie w układach regulacji

Typową strukturę układu z przełączanymi regulatorami przedstawia się na rysunku 1. Zależnie od aktualnego punktu pracy, określanego przez sygnał lub grupę sygnałów σ , dokonuje się wyboru jednego z spośród kilku przygotowanych offline regulatorów. Ze stosowaniem tego typu rozwiązania wiąże się jednak kilka problemów technicznych. Przede wszystkim każdy regulator, jako oddzielny układ dynamiczny, na którego wejście podawany jest sygnał błędu regulacji, musi być stabilny co w ogólności w zamkniętej pętli regulacji nie jest warunkiem koniecznym.



Rys. 1. Struktura układu z przełączanymi regulatorami

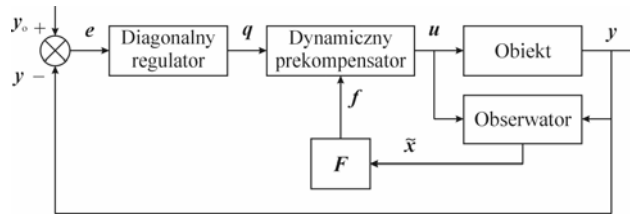
Dodatkowym problemem, powstającym również wtedy, gdy regulator jest syntezowany na bieżąco podczas regulacji, jest bezuderzeniowe przełączanie regulatorów. Warunki takiego przełączania pomiędzy dwoma ściśle właściwymi kompensatorami przedstawione są w [18]. Dotyczą one jednak zmiany parametrów regulatorów o tej samej strukturze - opisanych równaniami stanu i wyjść. W przypadku przełączania pomiędzy regulatorami opisanymi równaniami stanu a regulatorami o innej strukturze, np. PID, należy zapewnić, aby w momencie przełączenia wyjścia obu regulatorów miały jednakowe wartości. Będzie to możliwe jeśli odpowiednio skorygujemy stan integratorów we włączanym regulatorze, tak aby po przemnożeniu przez bloki wzmacnień na wyjściu regulatora otrzymać pożądane wartości.

Rozwiązaniem pozwalającym uniknąć obu powyższych problemów jest zastosowanie prezentowanego w dalszej części pracy układu MFC_MIMO z przełączanymi pętlami modeli.

MFC_MIMO z dynamicznym odsprzęgnięciem

Precyzyjna regulacja obiektem o wielu wejściach i wielu wyjściach w okolicach nominalnego punktu pracy możliwa będzie przy zastosowaniu do syntezy pętli modelu układu MFC algorytmu dynamicznego odsprzęgnięcia.

Do syntezy układu z dynamicznym odsprzęgnięciem proponuje się wykorzystać algorytm prezentowany w [10-12]. Został on stworzony i może zostać użyty dla liniowych obiektów o m -wejściach i l -wyjściach przy $m=l$ lub $m>l$, które opisane są macierzą transmitancji właściwych $T(s)$. Odsprzęgane obiekty mogą być niestabilne i/lub nieminimalnofazowe. Algorytm ten zapewnia otrzymanie odprężonego wielozadaniowego systemu sterowania, w którym każda pętla sterowania definiowana przez parę: sygnał wartości zadanej – wyjście obiektu $y_{0i}(t)$, $y_i(t)$ dla $i=1, \dots, l$ mogła być sterowana niezależnie od pozostałych par $j \neq i$. Ponadto, każda z pętli może być zaprojektowana z indywidualnie założoną dynamiką zależnie od przyjętej klasy sygnałów sterujących $y_{0i}(t) \in R^l$. Wszystkie wymienione powyżej cele mogą zostać osiągnięte w strukturze układu sterowania prezentowanego na rysunku 2. Zawiera ona dynamiczny prekompensator, diagonalny regulator, macierz sprzężenia zwrotnego od stanu F , i jeśli to konieczne obserwator Luenbergera.



Rys. 2. Struktura odsprężonego układu sterowania

Odsprężaniu podlega sterowalny i obserwowalny LTI MIMO model obiektu opisany równaniami stanu i wyjść

$$(1) \quad \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{aligned}$$

gdzie $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ i $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^l$ ($m \geq l$) są wektorami stanu, wejść i wyjść.

W wykorzystywanym w algorytmie ujęciu wielomianowym macierze transmitancji wszystkich elementów układu definiowane są przez pary macierzy wielomianowych prawostronnie lub lewostronnie wzajemnie pierwszych. Macierz transmitancji modelu obiektu (1) może być wówczas przedstawiona jako wzajemnie pierwsza frakcja ułamkowa w dziedzinie zmiennej zespolonej s jako

$$(2) \quad \mathbf{y}(s) = \mathbf{B}_1(s)\mathbf{A}_1^{-1}(s)\mathbf{u}(s),$$

gdzie

$$\mathbf{B}_1(s)\mathbf{A}_1^{-1}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}.$$

Prawo odprężania stosowane w algorytmie (liniowe sprzężenie zwrotne od wektora stanu z dynamicznym prekompensatorem) opisane jest zależnością

$$(3) \quad \mathbf{u}(s) = \mathbf{G}^{-1}(s)\mathbf{L}_0(s)\mathbf{f}(s) + \mathbf{G}^{-1}(s)\mathbf{L}(s)\mathbf{q}(s),$$

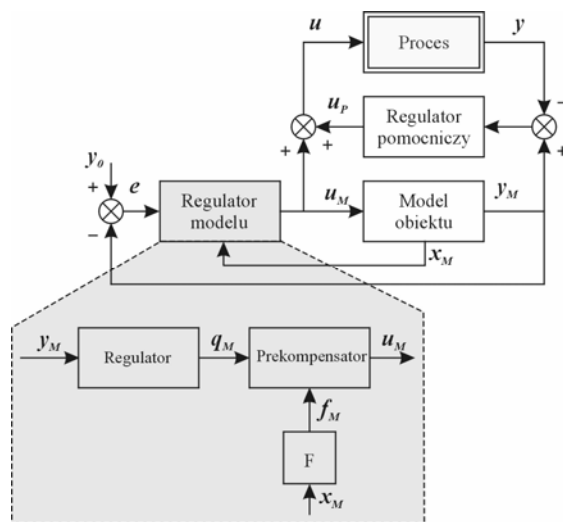
w której $\mathbf{f}(s) = \mathbf{F}(s)\mathbf{x}_p(s) \square \mathbf{F}\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{x}_p(s)$ jest pseudostanem obiektu, $\mathbf{G}(s) \in \square [s]^{m \times m}$, $\mathbf{L}(s) \in \square [s]^{m \times l}$, $\mathbf{L}_0(s) \in \square [s]^{m \times m}$, $\mathbf{F}(s) \in \square [s]^{m \times m}$ – są macierzami wielomianowymi takimi, że $\mathbf{G}^{-1}(s)\mathbf{L}_0(s)$ i $\mathbf{G}^{-1}(s)\mathbf{L}(s)$ są właściwe a $\mathbf{F}(s)\mathbf{A}_1^{-1}(s)$ jest ściśle właściwa.

Wielozadaniowy system sterowania jest odpowiednio zdefiniowany przez: właściwą i możliwie niskiego rzędu macierz transmitancji $\mathbf{G}^{-1}(s)\mathbf{L}(s)$ dla dynamicznego prekompensatora, ściśle właściwą macierz transmitancji $\mathbf{M}_2^{-1}(s)\mathbf{N}_2(s)$ diagonalnego regulatora, macierz sprzężenia zwrotnego od wektora stanu \mathbf{F} i jeśli to konieczne ściśle właściwe (lub właściwe) macierze transmitancji $\mathbf{Q}^{-1}(s)\mathbf{H}(s)$ i $\mathbf{Q}^{-1}(s)\mathbf{K}(s)$ dla obserwatora Luenbergera.

Wykorzystywany w pracy system sterowania z wykorzystaniem dynamicznego odprężania i układu MFC przedstawiony na rysunku 3, był już przedmiotem osobnych analiz [18]. Tak samo jak w klasycznej strukturze MFC główną składową sygnału

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

sterującego jest sygnał generowany przez regulator w pętli modelu. Pętla ta jednakże, projektowana jest dla nominalnego modelu obiektu $M(s)$ z użyciem przedstawionego wyżej algorytmu dynamicznego odsprzęgnięcia.



Rys. 3. Układ MIMO-MFC z dynamicznym odsprzęgnięciem

Syntezę poszczególnych elementów układu MIMO-MFC-DD prowadzi się według następującej procedury:

- elementy głównej pętli regulacji (modelu) dobieramy zgodnie z algorytmem dynamicznego odsprzęgnięcia przedstawionym w rozdziale 2,
- wzmacnienia regulatorów RP dobieramy tak duże jak to możliwe aby rozszerzyć zakres dopuszczalnych perturbacji, z uwzględnieniem wymogu stabilności układu.

Przełączanie w układzie MIMO_MFC

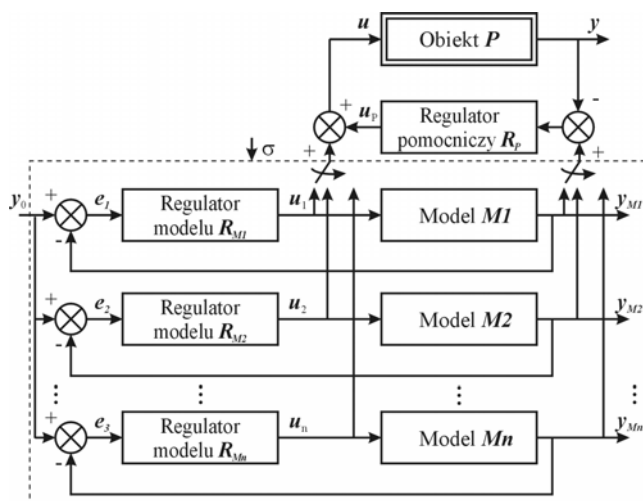
Rozwiązaniem pozwalającym uniknąć w układach z przełączeniami problemów związanych z koniecznością syntezy stabilnych regulatorów oraz ograniczyć a w niektórych sytuacjach wyeliminować problem bezuderzeniowego przełączania jest zastosowanie układu MFC_MIMO z przełączanymi pętlami modeli (rys. 4).

Każda pętla modelu zaprojektowana jest jako stabilny układ regulacji i w układzie MFC liczona jest niezależnie od siebie. Daje to gwarancję stabilności głównej składowej sygnału sterującego u_i .

Dodatkowo wykorzystując fakt, że model obiektu $M(s)$ w układzie MFC może nawet znacznie odbiegać od obiektu $P(s)$, to – działanie takie ma sens przy ograniczonej liczbie pętli modelu – w każdej z nich stosować można ten sam liniowy model obiektu $M_1(s) = M_2(s) = \dots = M_n(s) = M(s)$. Przełączenie poszczególnych pętli odniesienia realizować można wówczas, bez jakichkolwiek uderzeń, w stanach ustalonych (dla obu przełączanych pętli), przed zamierzoną zmianą punktu pracy układu.

Procedura przełączania pomiędzy dwoma specjalizowanymi układami regulacji wykorzystującymi dynamiczne odsprzęgnięcie związana ze zmianą punktu pracy układu mogłaby składać się z kilku prostych czynności:

- pętla regulatora modelu z regulatorami PID dobranym tak aby zapewnić stabilność w obu punktach pracy powinna działać z wykorzystaniem modelu aktualnego punktu pracy. Wówczas sygnały sterujące oraz sygnały wyjściowe obu modeli w stanie ustalonym będą miały takie same wartości i przełączenie pomiędzy pętlami nastąpi bez jakichkolwiek uderzeń.
- równocześnie lub chwilę po zmianie wartości zadanej kierującej układ do nowego punktu pracy dokonujemy zmiany parametrów modelu w pętli regulatora. Zmiany te nie spowodują ani utraty stabilności układu, ani, odbywając się w trakcie procesu przejściowego, pogorszenia jakości regulacji.
- po osiągnięciu nowego punktu pracy sygnały sterujące i wyjściowe modeli pętli z regulatorami PID oraz docelowego wykorzystywanego w tym punkcie układu specjalizowanego będą jednakowe i dokonane pomiędzy nimi przełączenie odbędzie się bez strat w jakości sterowania.



Rys. 4. Struktura układu MFC_MIMO z przełączanymi pętlami modeli

Problemem otwartym pozostaje synteza poszczególnych pętli modeli wykorzystujących regulatory PID. Dobór nastaw regulatorów PID dla obiektów MIMO jest przedmiotem ciągłych prac wielu autorów [19-22].

Badania eksperymentalne

W celu potwierdzenia rozważań teoretycznych przedstawia się wybrane wyniki prób regulacji nieliniowym wielowymiarowym obiektem cieplnym o wielu wejściach i wielu wyjściach MIMO. Analizowanym obiektem regulacji jest nagrzewnica, w której kontroli podlegają prędkość oraz temperatura wypływającego powietrza. Sterowanie powyższymi wartościami 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 kryzie pomiarowej 0-50mm H₂O) konwertowane są na sygnał elektryczny o zakresie 4-20mA.

Nagrzewnica jest obiektem silnie nieliniowym, którego parametry w torze temperatury tj. wzmacnienie i stałe czasowe silnie zależą od aktualnego punktu pracy – aktualnej wartości temperatury i prędkości przepływającego powietrza. Wzmacnienie podlega zmianom od wartości 0,4 przy wysokich wartościach temperatury i dużych przepływach

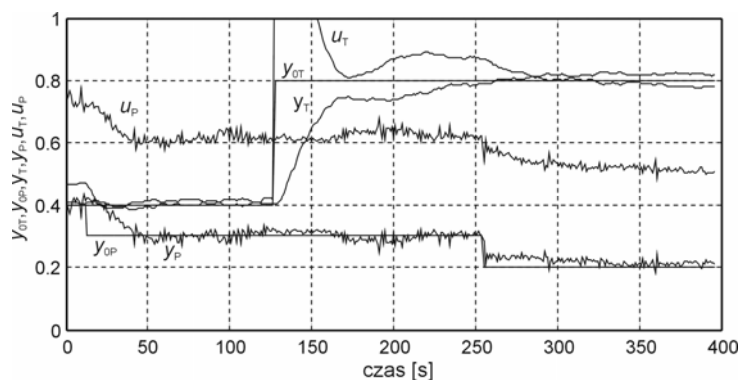
VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

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

Kontrolę obiektu przeprowadzono z wykorzystaniem środowiska szybkiego prototypowania dSpace. Narzędzie to pozwala na syntezę układu regulacji w programie Matlab/Simulink a następnie generację kodu programu i uruchomienie go na karcie dSpace 1102 stanowiącej interfejs do sterowanego obiektu. Oprogramowanie ContrlDesk firmy dSpace pozwala ponadto na bieżącą zmianę parametrów układu oraz rejestrację przebiegów ich wartości.

Pętla modelu układu MIMO-MFC-DD została dobrana dla założonego punktu pracy układu przy przepływie 0,4 i temperaturze 0,4. Ponadto w syntezie założono, że regulator główny w pętli z dynamicznym odprężaniem będzie regulatorem całkującym (macierz mianownikowa transmitancji regulatora $M_2(s)=I_{2 \times 2} \cdot s$ oraz przyjęto jednakowe bieguny dla obu pętli regulacji $s_{1,2,3}=0,02$ i $s_{4,5,6}=0,02$ (temperatury i przepływu). W pętli modelu wykorzystywanego podczas procesów przejściowych regulatory dobrano jako PI z nastawami odpowiednio ($k=2$ i $T_i=0,1$). Regulator pomocniczy dobrano jako diagonalny z regulatorami PI w każdej pętli ($k=1$ i $T_i=0,01$).

Przedstawiony na rysunku 5 wykres przedstawia przebieg regulacji prędkości i temperatury przepływającego powietrza. Założono, że zadaniem układu regulacji będzie utrzymywanie stałej temperatury powietrza przy zmieniającym się jego przepływie w okolicach przyjętego punktu pracy a przejście do nowego punktu pracy odbędzie się z wykorzystaniem regulatorów PID. W przedstawionym badaniu w chwili czasu ok. 10s skokowo zmieniono wartość zadaną przepływu na 0,3. Jak widać struktura MFC_MIMO z odprężoną pętlą modelu obiektu spełnia stawiane jej wymagania utrzymując stałą wartość temperatury y_T . Przełączenie układu na pętlę z regulatorami PID odbyło się bezuderzeniowo dla układu ok.100s. W dalszej części procesu regulator doprowadził układ do nowego punktu pracy. Wykorzystywane w tym czasie regulatory PID nie zapewniały odsprężnienia układu o czym świadczy przebieg wartości temperatury po zmianie przepływu ok. 260s regulacji.



Rys. 5. Wyniki regulacji wartości temperatury i przepływu powietrza nagrzewnicy z zastosowaniem układu MIMO-MFC-DD

Podsumowanie

Jako, że brak jest ilościowej metody oceny układu z dynamicznym odsprzęgnięciem w przypadku sterowania perturbowanym obiektem możliwa jest jedynie jakościowa ocena jakości działania konkretnego układu sterowania. Prezentowany przykład regulacji temperatury i przepływu powietrza w nagrzewnicy potwierdza zalety proponowanej struktury w regulacji nieliniowymi obiektami cieplnymi o zmiennych w czasie, perturbowanych parametrach.

Prezentowany w artykule układ MFC_MIMO posiada wiele cech czyniących go niezwykle przydatnym narzędziem do sterowania wieloma nieliniowymi i niestacjonarnymi wielowymiarowymi układami regulacji.

LITERATURA

- [1] Bars R., Colaneri P., de Souza C.E., Allgöwer F., Kleimenov A., Scherer C., Theory, algorithms and technology in the design of control systems, *16th IFAC World Congress*, Praga (2005), CD
- [2] Domek S., Odporna regulacja predykcyjna obiektów nieliniowych, *Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej*, Szczecin (2006)
- [3] Kurtz M.J., Henson M.A., Input/output linearizing control of constrained nonlinear processes, *J. Process Control*, 7 (1997), nr 1, 3–17
- [4] Hanus R., Kinnaert M., Henrotte J.-L., Conditioning technique, a general anti-windup and bumpless transfer method, *Automatica*, 23 (1987), nr 6, 729–739
- [5] Morse A.S., Control Using Logic-Based Switching, *Trends in Control: A European Perspective*, Springer-Verlag (1998), 69-113,
- [6] 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
- [7] Yamé J., Kinnaert M., Delwiche T., Parametrization of MIMO multi-controller schemes for bumpless switching, *European Control Conference, ECC'07*, Kos, Greece (2007)
- [8] Skoczowski S., Odporny układ regulacji z wykorzystaniem modelu obiektu, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 9 (1999), 2–4
- [9] Skoczowski S., Control system structures and their robustness, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 6 (2003), 5–9
- [10] Skoczowski S., Domek S., Pietruszewicz K., Model following PID control system, *Kybernetes: Int. Journal of Systems & Cybernetics*, 32(2003), nr 5/6, 818–828
- [11] Skoczowski S., Domek S., Pietruszewicz K., Broel-Plater B., A Method for Improving the Robustness of PID Control, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 52 (2005), nr 6, 1669–1676
- [12] Mäkilä P.M., Partington J.R., On linear models for nonlinear systems, *Automatica*, 39 (2003), 1–13
- [13] Dzieliński A., Modelowanie i sterowanie układów nieliniowych metodami neuropodobnymi, *Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Warszawskiej*, Warszawa (2002)
- [14] Bańka S., Dworak P., Dynamic decoupling of the right invertible systems, *Proc. of 10th IEEE MMAR Conference*, Międzyzdroje (2004), 279–284
- [15] Dworak P., Dynamiczne odsprzęgnięcie wielowymiarowych obiektów o jednakowej i niejednakowej liczbie wejść i wyjść w ujęciu wielomianowym, *Praca doktorska, Politechnika Szczecińska*, Szczecin (2005)
- [16] Dworak P., Bańka S., Efficient algorithm for synthesis of multipurpose control systems with dynamic decoupling, *Proc. 11th IEEE MMAR Conference*, Międzyzdroje (2005), 345–350
- [17] Dworak P., Pietruszewicz K., Misztal H., Hybrydowy odporny regulator wielowymiarowego obiektu cieplnego, *Przegląd Elektrotechniczny* 3 (2010), przygotowany do druku
- [18] Wolovich W.A., Arehart A.B., Bumpless switching controllers., *35th IEEE Decision and Control*, 2 (1996), 1654-1655
- [19] Lengare M.J., Chile R.H., Waghmare L.M. Parmar B., Auto Tuning of PID Controller for MIMO Processes, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 45 (2008), 306-309

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

- [20] Mete, A.N., Gundes, A.N., Ozbay, H., *Decoupled PID Controller Synthesis for MIMO Plants with I/O Delays*, *45th IEEE Conference on Decision and Control*, (2006), 852-857
- [21] Gündeş A.N., Mete A.N., *MIMO controller synthesis with integral-action integrity*, *Automatica*, 44 (2008), nr 1, 128-134
- [22] Gundes A.N., Ozguler A.B., *PID Stabilization of MIMO Plants*, *IEEE Transactions on Control Automatic*, 52 (2007), nr 8, 1502-1508

Autorzy: dr inż. Paweł Dworak, dr inż. Krzysztof Pietruszewicz, 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.pietruszewicz@zut.edu.pl

