

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

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Elektrotechniki

## **Neuronowy regulator do sterowania wielowymiarowym obiektem cieplnym**

**Streszczenie.** W artykule przedstawia się odporny układ regulacji MFC do regulacji temperatury i przepływu powietrza w nagrzewnicy powietrza, w którym w pętli korekcyjnej zastosowany został regulator neuronalny wytrenowany na bazie zestawu regulatorów modalnych. Prezentowany sposób realizacji układu pozwala utrzymać wysoką jakość regulacji w szerokim zakresie zmian punktów pracy układu.

**Słowa kluczowe:** Sterowanie odporne, struktura MFC, obiekty cieplne MIMO, regulator neuronowy, przełączanie regulatorów.

### **Wstęp**

W rzeczywistych układach sterowania jednym z podstawowych problemów utrudniających uzyskanie wysokiej precyzji i jakości regulacji jest nieliniowość obiektu regulacji i/lub perturbacje jego parametrów w czasie pracy. Dotyczy to w szczególności obiektów cieplnych, dla których wraz ze zmianą temperatury zmieniają się właściwości wymiany energii cieplnej z otoczeniem. W skrajnych przypadkach nieliniowości te mogą prowadzić do znacznego pogorszenia się jakości a nawet do utraty stabilności układu sterowania. Skłania to do stosowania adaptacyjnych metod sterowania wielowymiarowego, pozwalających na uwzględnienie w czasie syntezy pełnej nieliniowości i wielowymiarowej natury obiektu regulacji.

Typowym podejściem do realizacji układów sterowania takimi obiektami jest stosowanie struktury z wieloma regulatorami przełączanymi. Jednak rozwiązania tego typu generują zazwyczaj niepożądane nagłe zmiany sygnałów sterujących w chwilach przełączania, co jest ich podstawową wadą. Niewłaściwie dobrane momenty zmian układu regulacji i błędnie przeprowadzone przełączenia prowadzić mogą do pogorszenia jakości regulacji a nawet jego niestabilności [1]. Dlatego też problemy przełączania w układach sterowania poruszane są w wielu pracach [2-4], w tym również dla regulatorów MIMO [4-8].

W pracy przedstawia się możliwość zastosowania neuronalnego regulatora, którego bieżące parametry zależą od aktualnego punktu pracy. Wykorzystanie właściwości aproksymacyjnych sieci neuronowych pozwala na zamodelowanie płaszczyzn odpowiadających zmianom wartości poszczególnych parametrów regulatora, nie tylko dla ograniczonej liczby analizowanych offline punktów pracy obiektu, ale także dla stanów pośrednich pomiędzy analizowanymi punktami pracy. Pozwala to na płynną zmianę parametrów regulatora wraz ze zmianą punktu pracy układu.

W artykule przedstawia się strukturę i sposób syntezy neuronalnego regulatora sterującego pracą wielowymiarowego nieliniowego obiektu cieplnego (MIMO - o wielu wejściach i wielu wyjściach). Regulator taki ma zapewnić stabilność i wysoką jakość sterowania w całym zakresie pracy urządzenia. Obiektem, na którym przeprowadzane będą próby regulacji jest nagrzewnica, w której kontroli podlegają prędkość oraz temperatura wpływającego powietrza. Jest to obiekt silnie nieliniowy, a kontrolowane parametry wpływają na siebie dodatkowo utrudniając utrzymanie wysokiej jakości regulacji.

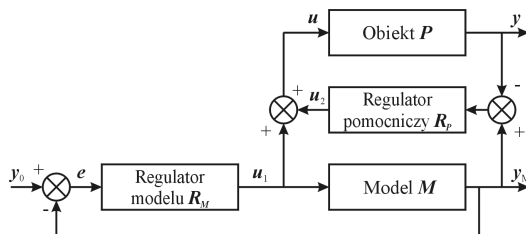
Najczęściej stosowane sposoby syntezy regulatorów dla nieliniowych obiektów dynamicznych bazują na jego liniowych, lokalnych modelach. Modele te są jednak najczęściej obciążone dużymi błędami i są z definicji niepewne, a sama regulacja odbywa się w obecności wielu niemierzalnych i nieidentyfikowanych 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 wykorzystanie struktur układu Model Following Control (MFC), znanego z wyjątkowej odporności na perturbacje parametrów i/lub struktury sterowanego procesu jak również z dużej zdolności tłumienia zakłóceń [9-11]. Wykorzystywany w pracy system sterowania obiektami MIMO z wykorzystaniem układu MFC był już przedmiotem osobnych analiz [5,6,12,13]. W artykule przedstawia się możliwość wykorzystania układu MFC\_MIMO z regulatorem neuronalnym, którego parametry podlegają zmianie wraz ze zmianą bieżącego punktu pracy nagrzewnicy.

Przedstawione wyniki eksperymentów potwierdzają skuteczność proponowanej struktury w regulacji nieliniowymi obiektami cieplnymi o zmiennych w czasie, perturbowanych parametrach.

### Model following control dla obiektów MIMO

Układ MFC przedstawiony na rysunku 2 po raz pierwszy opisany został w [9]. Podstawowy sygnał sterujący  $u_1$  generowany jest przez regulator główny (modelu)  $R_M(s)$  dobrany tak aby w jak najlepszy sposób sterować modelem obiektu  $M(s)$ . Zadaniem regulatora pomocniczego  $R_p(s)$  jest wspieranie regulatora głównego przez generację sygnału korekcyjnego, który zależy od różnicy pomiędzy wyjściem zastosowanego modelu a rzeczywistym procesem. W ten sposób układ może przeciwdziałać efektom niedoskonałości przyjętego modelu procesu (spowodowanego, np. przez różnice struktury) i możliwym perturbacjom procesu. Odporność układu na niedokładności modelu, jak również jakość regulacji jest tym samym znacznie zwiększona. Podobnie znacznemu zmniejszeniu ulegają efekty spowodowane niemierzalnymi zakłóceniami.



Rys. 2. Struktura układu MFC

Analiza właściwości odpornościowych układu MFC przedstawiona w [14] bazująca na właściwościach wartości syngularnych macierzy wykazała, że układ MFC jest bardziej stabilny i odporny w porównaniu do klasycznego układu jednopętlowego jeśli w zakresie częstotliwości roboczych układu spełnione jest następujące równanie

$$(1) \quad \underline{\sigma}(I + M(s)R_M(s)) < \overline{\sigma}(I + M(s)R_p(s))$$

gdzie  $\underline{\sigma}(A)$  i  $\overline{\sigma}(A)$  są odpowiednio najmniejszą i największą wartością syngularną macierzy  $A$ .

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

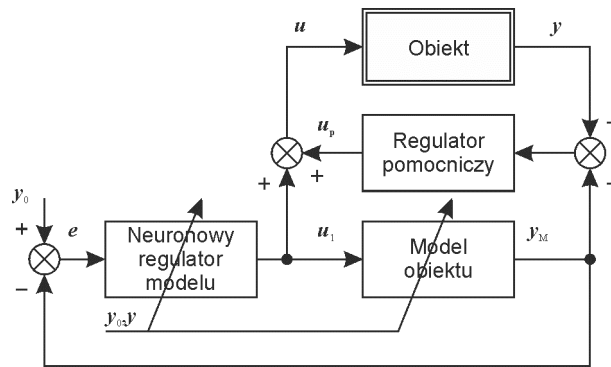
Przyjmując oznaczenia  $\Delta_{CL}$  i  $\Delta_{MFC}$  jako maksymalne dopuszczalne wartości normy dla zakłóceń perturbowanego obiektu odpowiednio dla klasycznej jednopętlowej struktury regulacji i układu MFC, dolne ograniczenie stosunku dopuszczalnych perturbacji określone jest zależnością

$$(2) \quad \frac{\Delta_{MFC}}{\Delta_{CL}} \geq \frac{\sigma(\mathbf{I} + \mathbf{M}(s)\mathbf{R}_P(s))}{\sigma(\mathbf{I} + \mathbf{M}(s)\mathbf{R}_M(s))}$$

Nierówność (2) pozwala określić zwiększoną odporność struktury MFC w zakresie częstotliwości roboczych układu.

### **Struktura układu MFC\_MIMO\_NN**

Rozwiązaniem pozwalającym uniknąć problemów związanych z przełączaniem regulatorów i dopasowaniem ich do aktualnego punktu pracy układu jest zastosowanie układu MFC\_MIMO z regulatorem neuronalnym (rys. 3). Zgodnie z ideą układu MFC główny sygnał sterujący obiektem  $u_1$  wypracowywany jest przez neuronowy regulator modalny, którego parametry zależą od aktualnego punktu pracy układu określonego ogólnie przez sygnały  $y_0$  i  $y$ . Sygnały te określają jednocześnie parametry bieżącego modelu. Powoduje to, że pętla modelu a co za tym idzie wartości sygnałów referencyjnych dla sterowanego obiektu zmieniają się płynnie wraz ze zmianą zadanego punktu pracy i aktualnego stanu obiektu.



Rys. 3. Struktura układu MFC\_MIMO z regulatorem neuronalnym

Syntezę poszczególnych elementów układu MFC\_MIMO\_NN prowadzi się według następującej procedury:

- elementy głównej pętli regulacji (modelu) stanowią regulator neuronalny oraz nieliniowy model obiektu tworzony zgodnie z algorytmem przedstawionym w kolejnym rozdziale,
- wzmocnienia regulatora pomocniczego dobieramy tak duże jak to możliwe aby rozszerzyć zakres dopuszczalnych perturbacji, z uwzględnieniem wymogu stabilności układu.

### Synteza neuronalnego regulatora modalnego

W ogólności regulator neuronalny wykorzystywany w układzie MFC mógłby być syntezowany na bazie dowolnego zestawu regulatorów liniowych bądź nawet nieliniowych, podanych np. w [15-17]. W pracy regulator neuronowy nauczany jest na podstawie zestawu liniowych regulatorów modalnych zsyntetyzowanych dla zlinearyzowanych w dziedzinie czasowej modeli w całym zakresie zadawanych wartości temperatury i przepływu nagrzewnicy. Takie podejście pozwala przede wszystkim na automatyzację procesu syntezy regulatora.

Liniowe regulatory modalne budowane są na bazie obserwatorów Luenbergera pełnego rzędu, bezpośrednio w dziedzinie czasowej. Zadanie syntezy sprowadza się do wyznaczenia macierzy sprzężeń zwrotnych od stanu obiektu lokującej bieguny układu objętego sprzężeniem do miejsc określonych przez przyjęte (stabilne) wartości biegunów układu oraz macierzy wagowej (macierzy „wzmocnień”) obserwatora Luenbergera pełnego rzędu, dla odpowiednio dobranych biegunów obserwatora. Taki sposób postępowania w dziedzinie czasowej prowadzi do uzyskania ściśle przyczynowych regulatorów opisanych równaniami stanu i wyjść

$$(3) \quad \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_r(t) &= \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r(t) + \mathbf{B}_r e(t) \\ \mathbf{u}(t) &= \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r(t) + \mathbf{D}_r e(t) \end{aligned}$$

w których:

$$(4) \quad \mathbf{A}_r = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{F} - \mathbf{L}\mathbf{C}, \quad \mathbf{B}_r = \mathbf{L}, \quad \mathbf{C}_r = -\mathbf{F} \quad \text{ i } \quad \mathbf{D}_r = \mathbf{0}$$

gdzie:  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  są macierzami liniowych równań stanu zlinearyzowanego modelu nagrzewnicy w odpowiednich „punktach pracy” obiektu.

Na potrzeby syntezy regulatora w każdym z roboczych punktów pracy założono następujący liniowy model nagrzewnicy

$$(5) \quad \begin{bmatrix} y_t(s) \\ y_p(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{tt}(s) & G_{tp}(s) \\ 0 & G_{pp}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_t(s) \\ u_p(s) \end{bmatrix},$$

w którym transmitancje w torze sterowania temperaturą  $G_{tt}(s)$  i  $G_{tp}(s)$  przyjęto jako inercje 2 rzędu a transmitancję w torze sterowania przepływem powietrza  $G_{pp}(s)$  jako inercję 1 rzędu. Liniowy model nagrzewnicy jest więc układem dynamicznym MIMO 5 rzędu o 2 wejściach, 2 wyjściach. Determinuje to tym samym wymiary syntezowanych dla każdego z modeli regulatorów.

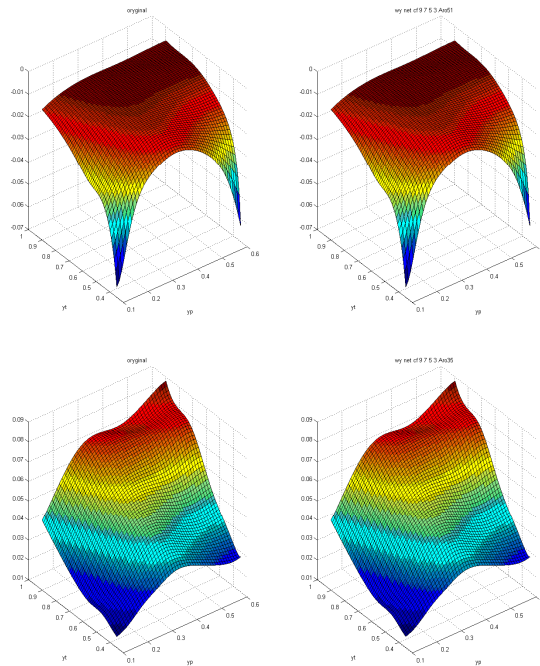
Na bazie wykonanych off-line obliczeń regulatorów modalnych dla wybranych punktów pracy określających wartości poszczególnych parametrów macierzy  $\mathbf{A}_r$ ,  $\mathbf{B}_r$ ,  $\mathbf{C}_r$  regulatorów, w zależności od wartości temperatury i przepływu, przeprowadzono proces strojenia odpowiednich struktur neuronowych. Zestawy sieci przygotowanych dla poszczególnych elementów macierzy  $\mathbf{A}_r$ ,  $\mathbf{B}_r$ ,  $\mathbf{C}_r$  stanowią aproksymatory zmieniających się macierzy regulatora. Dla opisu regulatora zgodnie z równaniami (3) i (4) liczba struktur sieci odpowiadać będzie ilości elementów macierzy  $\mathbf{A}_r$ ,  $\mathbf{B}_r$ ,  $\mathbf{C}_r$ . W celu zminimalizowania liczby aproksymowanych sieciami elementów macierzy, każdy z regulatorów został zapisany w postaci kanonicznej Luenbergera-Brunowskiego obserwowalnej z macierzami:

**VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012**

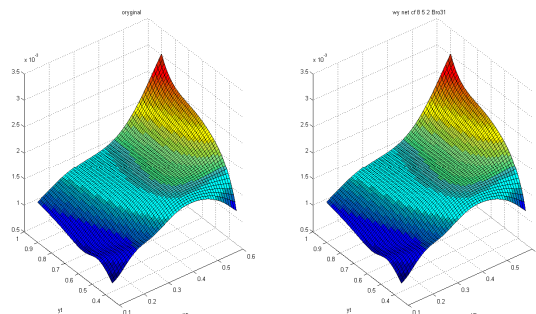
$$(6) \quad \mathbf{A}_{ro} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{ro} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \\ b_{51} & b_{52} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{ro} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{ro} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

o 10 zmiennych parametrach, tj:  $a_{ij}$ ,  $i = 3, 5$ ,  $j = 1, \dots, 5$  oraz  $b_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ,  $j = 1, 2$  zależnych od temperatury i przepływu. Dla przyjętego modelu nagrzewnicy takie podejście redukuje liczbę zmieniających się elementów macierzy o ponad połowę. Syntezy regulatorów dokonano w zakresie zmian temperatury  $y_t \in [0.2 \div 1]$  z rozdzielczością 0.01 i w zakresie przepływu  $y_p \in [0 \div 0.7]$  z rozdzielczością 0.01. Charakter zmian wybranych elementów macierzy  $\mathbf{A}_{ro}$  i  $\mathbf{B}_{ro}$  zależnych od temperatury i przepływu oraz odpowiedzi neuronowych aproksymatorów pokazano na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4 Powierzchnie zmieniających się dla różnych punktów pracy elementów  $a_{35}$  i  $a_{51}$  macierzy Aro – oryginalne i odpowiedzi aproksymatorów neuronowych



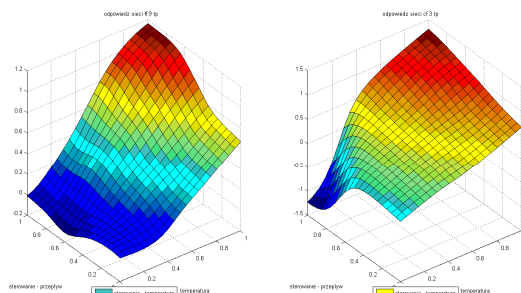
Rys. 5 Powierzchnie zmieniających się dla różnych punktów pracy elementu  $b_{31}$  macierzy Bro – oryginalne i odpowiedzi aproksymatorów neuronowych

Na rysunkach 4, 5 pokazane zostały odpowiedzi wybranych, jako najskuteczniej aproksymujące, sieci neuronowych dla każdego ze zmiennych parametrów macierzy Aro, Bro. Ocena jakości działania aproksymatorów prowadzona była w oparciu o kryterium minimalnej wartości sumy błędów kwadratowych oraz wartości bezwzględnych błędów wyliczanych w punktach, dla których prowadzony był proces uczenia sieci. Przy projektowaniu sieci wzięto pod uwagę sieci typu *radialnego* oraz typu *forward*. Sieci radialne projektowano z zadanymi różnymi wartościami współczynnika rozpiętości zarówno jako sieci o ścisłym dopasowaniu (*exact fit*) ilości neuronów, jak i w wersji z poszukiwaniem minimalnej (*fewer neurons*) ilości neuronów. Sieci typu *forward* ujęte w procesie poszukiwania najlepszego aproksymatora to sieci o strukturze *feed* jak i *cascade*, o różnych ilościach neuronów i różnym rozmieszczeniu neuronów w poszczególnych warstwach. W odniesieniu do sieci typu *forward* stosowano funkcje przejścia typu *tansig* w warstwach ukrytych i funkcję typu *purelin* w warstwie wyjściowej. We wszystkich trenowanych przypadkach sieci typu *forward* wykazały dużo lepsze właściwości aproksymacyjne w stosunku do sieci typu radialnego. Wśród najlepiej aproksymujących elementy macierzy najczęściej znajdowały się sieci typu *cascade forward*. Większość najlepszych aproksymatorów neuronowych cechuje się rozbudowaną strukturą składającą się z kilku warstw z umieszczonymi w każdej z nich co najmniej kilkoma neuronami. Dla każdego z elementów uczone były następujące struktury neuronowe sieci typu *forward*:

- 3 1
- 6 1
- 9 1
- 4 2 1
- 7 4 1
- 9 5 1
- 6 4 2 1
- 8 5 2 1
- 9 7 5 3 1

Sieci neuronowe oprócz funkcji aproksymatora elementów macierzy zastosowane zostały także jako modele zmieniających się z punktem pracy parametrów obiektu. I tak sieci aproksymowały charakterystyki statyczne w torze temperatury oraz przepływu. Płaszczyzna zmian wzmocnienia statycznego w torze temperatury zależna od aktualnej wartości temperatury oraz sterowania w torze przepływu aproksymowana przez najskuteczniejszą spośród testowanych struktur neuronowych pokazana została na rysunku 6.

## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 6 Dwie płaszczyzny najdokładniej aprokymujące charakterystykę statyczną w torze temperatury

Podobnie jak w przypadku aproksymacji elementów macierzy regulatora, tak i w tym trenowane były sieci typu *radialnego* i typu *forward*. Stosując wspomniane kryteria oceny wybrano dwie struktury o najmniejszych ich wartościach, były to struktury typu *forward*, jedna *cascade*, a druga *feed*. Jak widać z rysunku numer 6 płaszczyzny te różnią się od siebie pomimo bardzo zbliżonych wartości oceny wybranymi kryteriami. Wartości kryteriów dla wspomnianych struktur przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wartości kryteriów oceny aproksymatorów charakterystyk statycznych w torze temperatury

Typ sieci	Wartość kryterium	
	$\sum  \text{bład} $	$\sum \text{bład}^2$
3 1 - cascade	0,928837	0,023445
9 1 - forward	0,890947	0,027191

Charakterystyka statyczna w torze przepływu została również przybliżona neuronowym aproksymatorem wybranym na tej samej zasadzie co wcześniej opisany dla toru temperatury.

### Badania eksperymentalne

Powyższe rozważania teoretyczne potwierdzone są pozytywnymi wynikami działania proponowanej struktury MIMO\_MFC\_NN. 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 wpływającego 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 H<sub>2</sub>O) 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 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\_NN każdy z regulatorów modalnych występujących w pętli modelu zaprojektowany został dla biegunów układu zamkniętego przyjętych następująco:

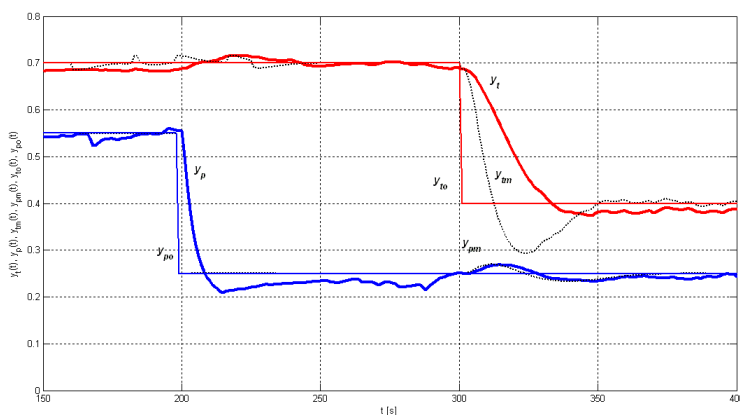
$$s_{ukl} = [-0.11 \quad -0.12 \quad -0.13 \quad -0.14 \quad -0.15]$$

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.

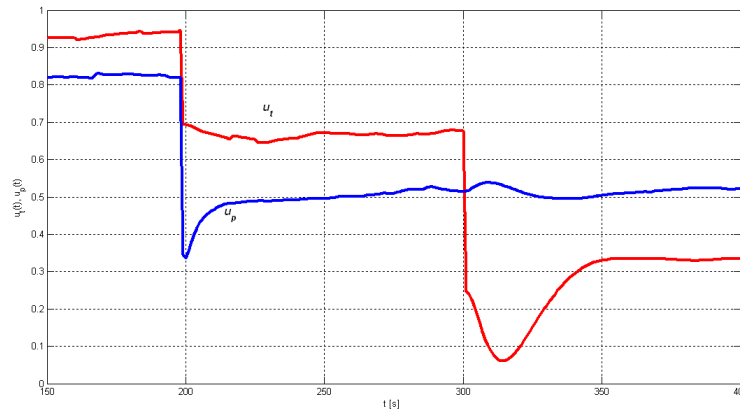
W prezentowanych poniżej na rysunkach 7 i 8 wynikach regulacji na rzeczywistym obiekcie zadaniem układu regulacji było przeprowadzenie obiektu z aktualnego do nowego punktu pracy: najpierw poprzez zmianę wartości zadanej przepływu z 0.55 na 0.25 a następnie poprzez zmianę wartości zadanej temperatury z 0.7 na 0.4.



Rys. 7. Wyniki regulacji wartości temperatury i przepływu powietrza nagrzewnicy w układzie MIMO-MFC-NN



## VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 8. Przebieg sygnałów sterujących w torze temperatury i przepływu w układzie MIMO-MFC-NN

Podczas regulacji parametry obiektu ustalane były na podstawie zadanego punktu pracy ( $y_{i0}$ ,  $y_{p0}$ ) a parametry regulatora na podstawie bieżącej wartości temperatury  $y_i$  i zadanej wartości przepływu  $y_{p0}$ . Powodowało to, że regulator był zawsze dopasowany aktualnego stanu nagrzewnicy. Wadą tego rozwiązania jest jednak wrażliwość układu na zakłócenia pomiarowe temperatury. Występujące zakłócenia przenoszą się wartości parametrów regulatora a przez to na sygnały sterujące i tym samym na sygnały wyjściowe obiektu. W celu wyeliminowania efektu drgań sygnałów sterujących przyjęto 2% obszar w otoczeniu zadanego punktu pracy, w którym wartości poszczególnych parametrów regulatora neuronalnego ustalane są na stałych wartościach przypisanych do tego punktu pracy.

### Podsumowanie

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\_NN posiada wiele cech czyniących go niezwykle przydatnym narzędziem do sterowania wieloma nieliniowymi i niestacjonarnymi wielowymiarowymi układami 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] Tanaka K., Sugeno M., Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 45 (1992), pp. 135-156
- [2] Morse A.S., Control Using Logic-Based Switching, *Trends in Control: A European Perspective*, Springer-Verlag (1998), 69-113,
- [3] 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

- [4] Yamé J., Kinnaert M., Delwiche T., Parametrization of MIMO multi-controller schemes for bumpless switching, *European Control Conference, ECC'07*, Kos, Greece (2007)
- [5] Dworak P., Pietruszewicz K., Misztal H., Regulator odporny dla wielowymiarowego obiektu cieplnego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 5 (2010), pp. 301-303
- [6] Dworak P., Pietruszewicz K., Regulator o zmiennej strukturze w sterowaniu wielowymiarowym obiektem cieplnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 6 (2010), pp. 116-119
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Skoczowski S., Odporny układ regulacji z wykorzystaniem modelu obiektu, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 9 (1999), 2-4
- [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] Dworak P., Pietruszewicz K., On possibility of applying the MFC idea to control the MIMO processes, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 12 (2006), pp. 25-29
- [13] Dworak P., Pietruszewicz K., Domek S., Improving stability and regulation quality of nonlinear MIMO processes, *MMAR 2009*, Międzyzdroje, 2009.
- [14] Domek S., Odporna regulacja predykcyjna obiektów nieliniowych, *Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej*, Szczecin (2006)
- [15] Mäkilä P.M., Partington J.R., On linear models for nonlinear systems, *Automatica*, 39 (2003), 1-13
- [16] 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
- [17] Gündeş A.N., Mete A.N., MIMO controller synthesis with integral-action integrity, *Automatica*, 44 (2008), nr 1, 128-134

**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](mailto:pawel.dworak@zut.edu.pl), [krzysztof.pietruszewicz@zut.edu.pl](mailto:krzysztof.pietruszewicz@zut.edu.pl), [michal.brasel@zut.edu.pl](mailto:michal.brasel@zut.edu.pl)