

# Stanowisko laboratoryjne do badania wielowymiarowych algorytmów regulacji

Andrzej Wojtulewicz, Patryk Chaber, Maciej Ławryńczuk

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

**Streszczenie:** W pracy opisano projekt i realizację stanowiska laboratoryjnego do testowania algorytmów regulacji. Przedstawiono budowę mechaniczną oraz elektroniczną. Omówiono funkcje programowe umożliwiające sterowanie procesem. Podkreślono uniwersalność stanowiska, która polega na szerokich możliwościach konfiguracji, gdyż można badać prosty proces jednowymiarowy oraz skomplikowane procesy wielowymiarowe. Opisano możliwości zastosowania stanowiska, w szczególności do testowania algorytmów regulacji zaimplementowanych w systemach wbudowanych, wykorzystujących mikroprocesory, układy FPGA oraz sterowniki PLC. Omówiono przykład regulacji procesu za pomocą algorytmu regulacji predykcyjnej zaimplementowanego na mikroprocesorze.

**Słowa kluczowe:** regulacja predykcyjna, procesy wielowymiarowe, systemy wbudowane, mikroprocesory, układy FPGA

## 1. Wprowadzenie

Zaprojektowanie algorytmu regulacji procesu wielowymiarowego nie jest zadaniem banalnym. W najprostszym przypadku można zastosować klasyczne, jednopętlowe, regulatory PI lub PID, ale z punktu widzenia ogólnego zadania regulacji procesu wielowymiarowego algorytmy te nie współdziałają ze sobą, niekiedy nawet sobie przeszkadzają. Bardziej efektywnym podejściem jest zaprojektowanie wielowymiarowego algorytmu PID, w którym uwzględnia się sprzężenia skrośne między poszczególnymi torami wejść i wyjść [3, 9]. Interesującą alternatywą jest zastosowanie algorytmów regulacji predykcyjnej [4, 7], których cechą szczególną jest zastosowanie modelu regulowanego procesu nie tylko do projektowania algorytmu, ale także do przewidywania zachowania się procesu w przyszłości (predykcji) oraz do cyklicznego obliczania aktualnych wartości sygnałów sterujących. Są one wyznaczone na bieżąco (ang. *on-line*) w wyniku optymalizacji przewidywanej jakości regulacji (minimalizacji przewidywanego uchybu regulacji). Dzięki takiemu ujęciu regulacja predykcyjna jest bardzo uniwersalnym podejściem, w sposób naturalny uwzględniającym wielowymiarowość procesu, istniejące opóźnienia oraz ograniczenia sygnałów. Dlatego też algorytmy regulacji predykcyjnej są powszechnie stosowane, przede wszystkim w przemyśle przetwórczym, chemicznym i petrochemicznym [6].

W artykule opisano stanowisko laboratoryjne służące do badania wielowymiarowych algorytmów regulacji, w tym algorytmów

regulacji predykcyjnej. Rozważanym obiektem jest proces ogrzewania i chłodzenia. Założono, że stanowisko musi być konfigurowalne, tzn. musi umożliwiać testowanie prostych algorytmów jednowymiarowych oraz algorytmów wielowymiarowych, o różnej liczbie sygnałów sterujących (wejścia procesu) i sterowanych (wyjścia procesu). W pracy opisano oryginalną konstrukcję mechaniczno-elektroniczną umożliwiającą elastyczną konfigurację procesu. Omówiono również możliwości zastosowania i programowania mikrokontrolerów, które służą do obsługi urządzeń pomiarowych (czujniki temperatury), urządzeń wykonawczych (grzałki, wentylatory), a także do implementacji samego algorytmu regulacji procesu. Zbudowane stanowisko laboratoryjne umożliwia wykonanie testów wielu algorytmów regulacji, a w szczególności algorytmów predykcyjnych implementowanych za pomocą mikroprocesorów [1, 2, 10], a także układów FPGA (ang. *Field-Programmable Gate Array*) [2, 5, 8].

## 2. Struktura stanowiska laboratoryjnego

### 2.1. Geneza

Główna idea stanowiska laboratoryjnego związana jest z regulacją temperatury rezystora mocy. Dostarczana do rezystora moc wydzielana jest w postaci ciepła. Dzięki zastosowaniu szybkich tranzystorów mocy i sterowania PWM za pomocą mikroprocesora możliwe jest uzyskanie precyzyjnej regulacji mocy dostarczanej do rezystora. Pomiar temperatury powierzchniowej rezystora mocy umożliwia czujnik temperatury z magistralą OneWire. Do wstępnej weryfikacji poprawności założeń projektowych zastosowano prosty regulator proporcjonalny zaimplementowany na mikroprocesorze.

Po zweryfikowaniu wydajności źródła ciepła stwierdzono, że możliwe jest uzyskanie zwiększenia temperatury rezystora o 40°C w ciągu około 120 sekund. Aby w pełni regulować temperaturę zastosowano drugi element wykonawczy – wentylator chłodzący o dużej wydajności, również sterowany sygnałem PWM z mikroprocesora. Dzięki zastosowaniu rezystora mocy

#### Autor korespondujący:

Maciej Ławryńczuk, M.Lawrynczuk@ia.pw.edu.pl

#### Artykuł recenzowany

nadesłany 12.10.2015 r., przyjęty do druku 30.11.2015 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

i wentylatora powstała sekcja podstawowa umożliwiająca utrzymanie zadanej temperatury. Oczywiście dobranie typów, wymiarów i wzajemnej konfiguracji wymienionych elementów wymagało przeprowadzenia wielu eksperymentów. Aby otrzymać stanowisko laboratoryjne o wielu sygnałach sterujących i wielu sygnałach regulowanych zastosowano kilka sekcji podstawowych. Uwzględniono również opóźnienie procesu oraz możliwość wywoływania zakłóceń procesu.

### 2.2. Szacowanie energii

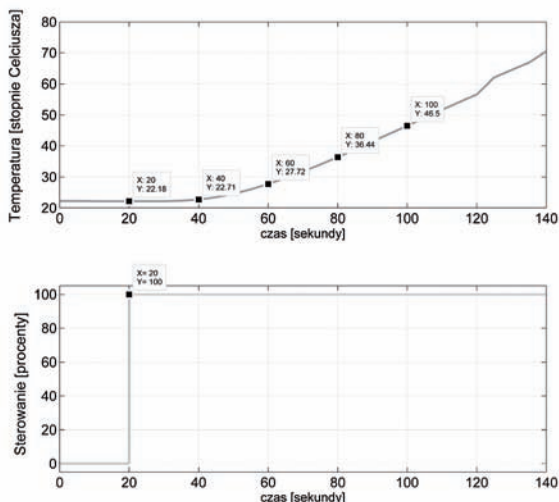
Podczas prac nad optymalizacją struktury mechanicznej przyjęto, że szkieletem urządzenia będzie płyta aluminiowa o grubości 1 mm, do której dołączone zostaną rezystory mocy, wentylatory oraz czujniki temperatury. Całkowita powierzchnia materiału została wybrana na podstawie uproszczonych obliczeń. Miały one na celu ocenę czasu potrzebnego do zmiany temperatury  $\Delta T$  płyty aluminiowej przy zadanym poziomie dostarczanej mocy. Wybrano rezystor o rezystancji 3,3  $\Omega$  i dopuszczalnej mocy 50 W. Przy napięciu zasilania 12 V w obwodzie popłynie prąd około 3,63 A. Ciepło właściwe glinu wynosi 900 J/(kg · °C). Całkowita objętość szkieletu wynosi 67 cm<sup>3</sup>. Przyjmując średnią gęstość równą 2,7 g/cm<sup>3</sup>, masa elementu osiągnie wartość około 180 g. Równanie opisujące energię ma postać

$$Q = Cm\Delta T = P\Delta t = I^2R \tag{1}$$

gdzie  $Q$  – energia układu,  $C$  – ciepło właściwe materiału,  $m$  – masa materiału,  $\Delta T$  – różnica temperatury,  $P$  – moc elektryczna,  $\Delta t$  – czas. W celu oszacowania czasu potrzebnego do zmiany zadanej temperatury, wzór (1) należy przekształcić do postaci

$$\Delta t = \frac{Cm\Delta T}{P} \tag{2}$$

Dla podanych parametrów i przyrostu temperatury  $\Delta T = 10$  °C, czas  $\Delta t$  wynosi około 36 sekund. Dla dwóch rezystorów oszacowany czas będzie o połowę krótszy i równy około 18 sekund.



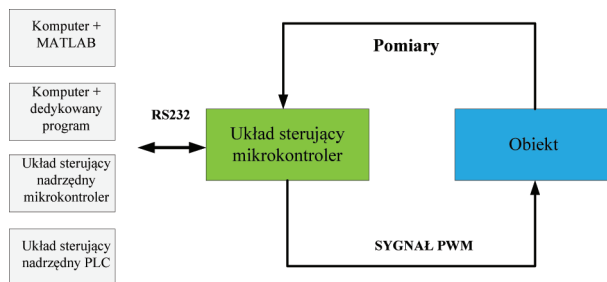
Rys. 1. Sprawdzenie wydajności źródła ciepła  
Fig. 1. Validation the efficiency of the heat source

Na rys. 1 przedstawiono wyniki zrealizowanego pomiaru temperatury w obiekcie testowym, w którym użyto dwie grzałki. Zastosowano sterowanie rezystorów pełną mocą. Wartość regulowanej temperatury rośnie z gradientem około 10 stopni na 20 sekund. Widać, że czasy oszacowane wzorami analitycznymi pokrywają się z rzeczywistością.

### 2.3. Możliwe konfiguracje pracy

Przyjęto możliwie uniwersalną komunikację ze stanowiskiem. Na rys. 2 przedstawiono schemat blokowy stanowiska uwzględniający cztery możliwe sposoby sterowania. Jednostką przetwarzającą otrzymywane nadrzędne rozkazy jest płyta z mikroprocesorem STM32F407. Istnieją następujące sposoby implementacji algorytmu regulacji:

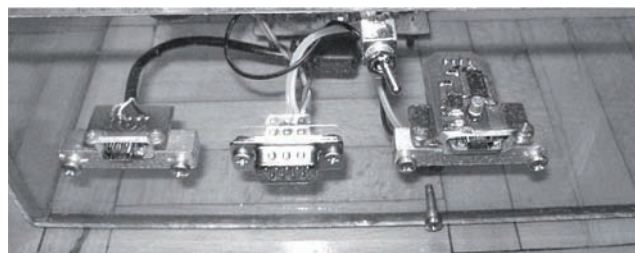
- Algorytm regulacji może być zaimplementowany w pakiecie MATLAB (lub podobnym), który jest zainstalowany na komputerze PC. Opracowana biblioteka do sterowania stanowiskiem umożliwia prostą implementację dowolnego algorytmu regulacji rozważanego procesu. Podłączenie stanowiska do komputera możliwe jest za pomocą złącza RS-232 lub USB (przez zamontowany konwerter RS-232–USB).
- Algorytm regulacji może być napisany w dowolnym innym języku programowania (np. języku C) i uruchomiony na komputerze PC. Wymagane jest wówczas przygotowanie i utworzenie odpowiednich funkcji do komunikacji ze stanowiskiem.
- Algorytm regulacji może być zaimplementowany za pomocą niezależnego systemu mikroprocesorowego z medium transmisyjnym RS2-32 w standardzie 3,3 V. Alternatywą jest opracowanie algorytmu regulacji na platformie FPGA.
- Możliwa jest także implementacja algorytmu regulacji na uniwersalnym programowalnym sterowniku logicznym (PLC).



Rys. 2. Schemat ideowy komunikacji  
Fig. 2. Schematic diagram of communications

Warto podkreślić, że zastosowany w stanowisku układ sterujący (wykorzystujący mikrokontroler) jest w istocie modulem służącym do zapewnienia komunikacji między czujnikami i elementami wykonawczymi a złączem RS-232, z którym komunikuje się projektowany algorytm regulacji. Układ ten jest integralną częścią stanowiska laboratoryjnego.

Na rys. 3 przedstawiono widok płyty czołowej stanowiska. Od lewej strony widoczne jest złącze USB programatora mikroprocesora sterującego, w środku znajduje się złącze RS-232 w standardzie 3,3 V, służące do komunikacji z zewnętrznym algorytmem sterującym, natomiast po prawej stronie znajduje się alternatywne złącze USB (zastosowano konwerter USB–RS-232, potrzebny, gdy komputer PC nie ma złącza RS-232). Za pomocą przełącznika można wybrać, które z gniazd (RS-232 czy USB) jest aktualnie używane.

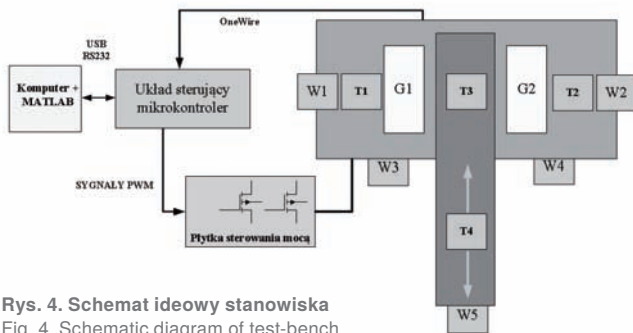


Rys. 3. Płyta czołowa stanowiska – złącza komunikacyjne  
Fig. 3. The faceplate – communication interfaces

### 3. Konstrukcja mechaniczno-elektroniczna

Szkielet aluminiowy został zaprojektowany z punktu widzenia odpowiednio małej objętości cieplnej (aby zastosowane grzałki mogły go dostatecznie szybko ogrzać) oraz możliwości wygodnego montażu pozostałych elementów wykonawczych. Ostateczny projekt rozłożenia elementów był podyktowany założoną strukturą procesu, jaki można byłoby uzyskać w różnych konfiguracjach pracy.

Na rys. 4 przedstawiono w sposób schematyczny ogólną strukturę stanowiska. Składa się ono z części wykonawczej i sterującej.



Rys. 4. Schemat ideowy stanowiska  
Fig. 4. Schematic diagram of test-bench

Część wykonawcza obejmuje:

- płytę z tranzystorami mocy sterującymi odpowiednimi elementami grzewczymi i chłodzącymi,
- obiekt właściwy z zamontowanymi elementami grzewczymi i chłodzącymi, czujnikami temperatury oraz przegrodą mechaniczną,
- zasilacz +12 V dostarczający energię do elementów grzewczych i chłodzących.

Jako elementy grzewcze zastosowano rezystory mocy G1 i G2 w specjalnych obudowach dobrze odprowadzających wytworzone ciepło. Do chłodzenia wykorzystane zostały wysokoobrotowe wentylatory W1, W2, W3 oraz W4. Wentylatory W1 oraz W2 oddziałują bezpośrednio na czujniki temperatury oraz rezystory. Wentylatory W3 oraz W4 odprowadzają ciepło przez schłodzenie dolnej części szkieletu aluminiowego. Zastosowano czujniki temperatury z magistralą danych OneWire oznaczone jako T1, T2, T3, T4. Elementy składowe są przykręcone śrubami do szkieletu aluminiowego. Czujnik temperatury T4 jest umieszczony na pomoście, który fizycznie ma za zadanie realizację opóźnienia procesu. Ma on możliwość zmiany położenia bliżej lub dalej źródła ciepła G1 i G2, co pozwala odpowiednio zmniejszać lub zwiększać opóźnienie procesu regulacji temperatury T4.

Część sterująca obejmuje:

- płytę z mikrokontrolerem, którego zadaniem jest komunikacja za pomocą interfejsu RS-232 (lub USB) ze sterownikami nadrzędnymi, na których zaimplementowany jest algorytm regulacji procesu (komputer PC, mikroprocesor, układ FPGA, sterownik PLC);
- w przykładowej konfiguracji (rys. 4) algorytm regulacji zaimplementowany jest na komputerze PC w środowisku MATLAB.

Rozpatrując opisany proces z punktu widzenia sygnałów wejściowych (sterujących) i wyjściowych (regulowanych) można stwierdzić, że układ ma 6 wejść, którymi można oddziaływać na 4 wyjścia. Sygnały wejściowe (sterujące) są następujące:

- wentylatory W1, W2, W3, W4,
- grzałki G1, G2.

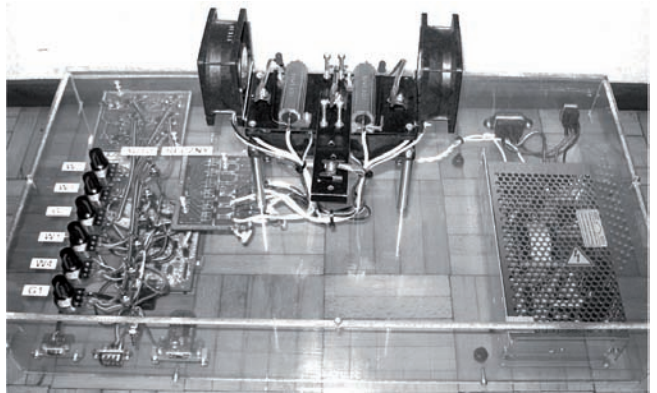
Zarówno do sterowania wentylatorami, jak i grzałkami wykorzystano sygnał PWM. Generowane sygnały przekazywane są do płytki mocy, która posiada odpowiednią wydajność prądową do sterowania elementami wykonawczymi. Mierzonymi sygnałami wyjściowymi (regulowanymi) są temperatury T1, T2, T3, T4.

Warto podkreślić, że urządzenie jest łatwo konfigurowalne, umożliwia implementację i badanie algorytmów regulacji procesów o różnym stopniu złożoności, określonej liczbą wejść i wyjść. Dzięki zaproponowanej konstrukcji urządzenia można sterować obiektami w wersjach jedno wejście – jedno wyjście aż do obiektu sześć wejść – cztery wyjścia. Możliwe są oczywiście wszystkie kombinacje pośrednie. W procesie istnieją silne sprzężenia skrośne między poszczególnymi torami wejście-wyjście, co stanowi trudność dla algorytmu regulacji, szczególnie złożonego z kilku algorytmów jednopętlowych. Przykładowo, ogrzewanie grzałką G1 podnosi jednocześnie temperaturę T1 i T3. Wentylator W1 zmniejsza temperaturę T1, T3 a także T2. Możliwe jest założenie specjalnej przegrody oddzielającej lewą stronę obiektu od prawej strony obiektu, dzięki czemu blokowany jest wpływ wentylatora W1 na temperaturę T2. Analogicznie blokowany jest wpływ wentylatora W2 na czujnik temperatury T1.

Część mechaniczna nie przewiduje symulacji uszkodzeń elementów wykonawczych. Symulację uszkodzeń można realizować po stronie elektronicznej za pomocą ręcznego panelu sterowania. Do dyspozycji użytkownika przewidziane zostało sześć przełączników pracy automatycznej i ręcznej. Przy pracy automatycznej sygnały sterowania PWM są doprowadzone bezpośrednio do płyty tranzystorów mocy. Przy pracy ręcznej sygnał z mikroprocesora jest odłączony, a na jego miejsce do płyty tranzystorów mocy dołączony jest sygnał z ręcznego regulatora wypełnienia PWM. Zadawanie wypełnienia odbywa się wówczas przy pomocy odpowiedniego potencjometru. Takie rozwiązanie pozwala na pełną symulację zakłóceń i uszkodzeń urządzeń wykonawczych, co pozwala badać odporność algorytmów regulacji.

### 4. Realizacja sprzętowa

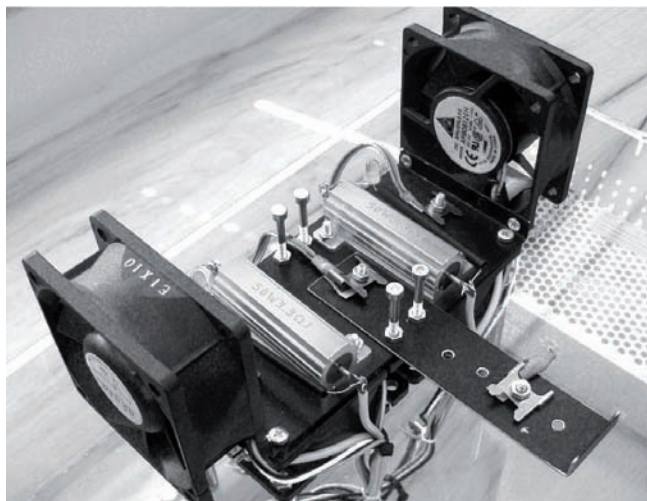
Na rys. 5 przedstawiono widok z góry wykonanego stanowiska. Na frontowej ścianie znajdują się złącze USB do programowania mikroprocesora, złącze typu DB9 do komunikacji z mikroprocesorem za pomocą standardu RS-232 (3,3 V) oraz złącze konwertera USB–RS-232. Na tylnej ścianie znajduje się gniazdo zasilania 230 V oraz wyłącznik zasilania.



Rys. 5. Zdjęcie stanowiska – widok z góry  
Fig. 5. Picture of the test-bench – view from the top

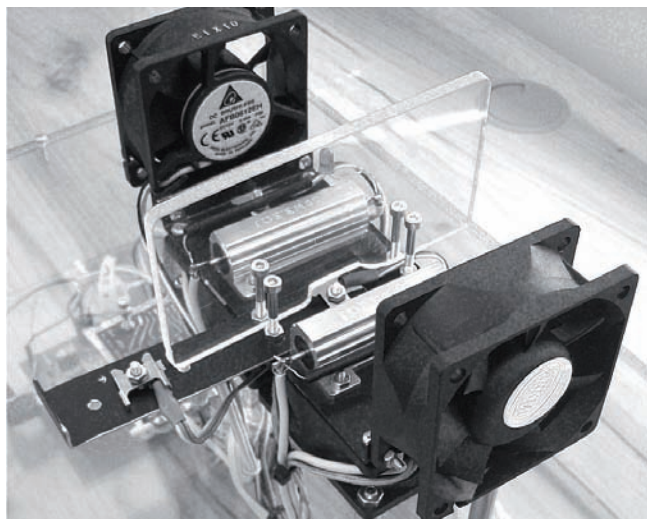
Na rys. 6 przedstawiono sam obiekt regulacji bez włożonej przesłony oddzielającej lewą stronę od prawej strony stanowiska. W takiej konfiguracji wentylatory boczne oddziałują na trzy czujniki temperatury. Na rys. 7 przedstawiono sam obiekt regulacji z zastosowaną przesłoną oddzielającą lewą stronę od prawej strony stanowiska. W takiej konfiguracji wentylatory boczne oddziałują tylko na czujnik temperatury od swojej strony oraz środkowy.

Na rys. 8 przedstawiono widok płyty z mikroprocesorem sterującym stanowiskiem. Jest to zestaw ewaluacyjny STM32F4 Discovery. Procesor sterujący to ST32F407VGT oparty na rdze-



Rys. 6. Zdjęcie obiektu regulacji bez przysłony  
Fig. 6. Picture of the object without aperture

niu Cortex-M4F firmy ARM. Jednostka może pracować z częstotliwością do 168 MHz, ma pamięć 1 MB flash oraz 192 kB pamięci RAM. Dzięki wysokiej częstotliwości pracy i dużej ilości pamięci możliwe było zaimplementowanie odpowiedniego programu sterującego pracą na podstawie otrzymywanych rozkazów. Ponadto istnieje możliwość implementacji algorytmu regulacji bezpośrednio w wyżej wymienionym układzie. Wówczas nie jest wymagany dodatkowy sterownik nadrzędny.



Rys. 7. Zdjęcie obiektu regulacji z przysłoną  
Fig. 7. Picture of the object with aperture

## 5. Oprogramowanie sterujące

Do obsługi stanowiska opracowano zestaw funkcji dostępnych z poziomu języka MATLAB. Schemat komunikacji między stanowiskiem a skryptem w języku MATLAB z punktu widzenia skryptu wygląda następująco:

1. inicjalizacja komunikacji,
2. wysłanie zapytania lub komendy,
3. oczekiwanie i odbiór odpowiedzi,
4. powrót do pkt. 2.

Komunikacja nie musi być przerywana przez automatyczne zrywanie istniejącego połączenia w trakcie inicjalizacji. Dopiero po upewnieniu się, że połączenie jest dostępne, następuje ponowne jego zestawienie.

### 5.1. Grupowanie sygnałów

Stanowisko umożliwia grupowanie sygnałów wejściowych. Oznacza to, że każdemu sygnałowi wejściowemu (w postaci wartości wypełnienia fali PWM) przypisany jest numer tego wejścia, numer grupy sygnałów, do której należy oraz waga. Przykładowo, dla 6 sygnałów wejściowych może to wyglądać następująco:

	Wejście 1	Wejście 2	Wejście 3	Wejście 4	Wejście 5	Wejście 6
EID	0	1	2	3	4	5
GID	1	1	2	2	2	3
Waga	1	-1	0	10	40	2

EID (ang. *Element Id*) oznacza numer elementu, GID (ang. *Group Id*) oznacza numer grupy sygnałów, do której został dany element przypisany. Działanie grupowania elementów wymaga przyjęcia pewnych założeń:

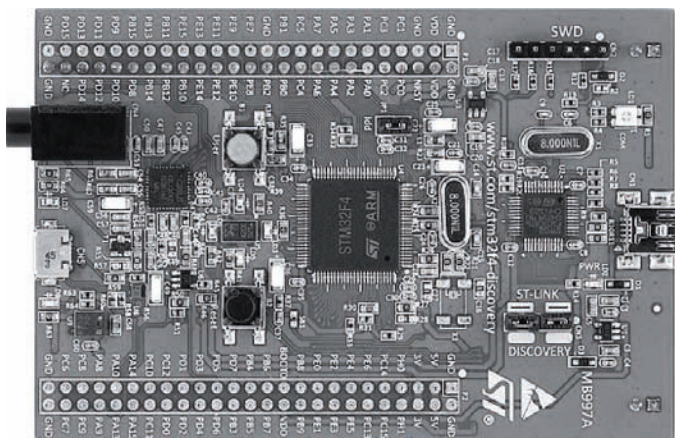
- użytkownik ustawia wartość sygnału wyłącznie dla całych grup,
- wartości wag mogą być dodatnie lub ujemne,
- w szczególności każdy element może należeć do osobnej grupy lub wszystkie elementy mogą należeć do jednej grupy.

Wyznaczenie wartości sygnału dla poszczególnych elementów polega na przemnożeniu wartości sygnału grupy, do której należy element przez wartość przypisaną mu wagi. Jeśli wartość ta jest mniejsza od zera – wartość sygnału dla tego elementu jest równa 0 (gdyż wypełnienie fali PWM nie może być ujemne).

Grupowanie sygnałów wejściowych pozwala na utworzenie elementu złożonego, który np. będzie działał, jako grzałka dla dodatnich sygnałów wejściowych lub jako wentylator dla sygnałów ujemnych. W powyższym przykładzie tak została zaprojektowana grupa o numerze 1. Jeśli użytkownik przypisze grupie 1 wartość sygnału 100, wtedy na wejście 1 zostanie wystawiony sygnał o wartości  $\max\{0, 1 \cdot 100\} = 100$ , natomiast na wejście 2 zostanie wystawiony sygnał o wartości  $\max\{0, -1 \cdot 100\} = 0$ . W przypadku, gdy użytkownik przypisze grupie 1 wartość sygnału -25, wtedy na wejście 1 zostanie wystawiony sygnał o wartości  $\max\{0, 1 \cdot (-25)\} = 0$ , a na wejście 2 zostanie wystawiony sygnał o wartości  $\max\{0, -1 \cdot (-25)\} = 25$ . Jeśli wejście 1 utożsamimy z grzałką, a wejście 2 z wentylatorem, powstaje element złożony, który chłodzi dla ujemnych wartości sygnału wejściowego i grzeje dla wartości dodatnich.

### 5.2. Opóźnienie programowe

Stanowisko zostało zaprojektowane tak, aby istniała możliwość dodawania opóźnień zarówno sygnałów wejściowych, jak i wyjściowych. Opóźnienia znacznie utrudniają zaprojektowanie dobrze działającego algorytmu regulacji.



Rys. 8. Płyta z mikroprocesorem sterującym  
Fig. 8. PCB board with control microprocessor

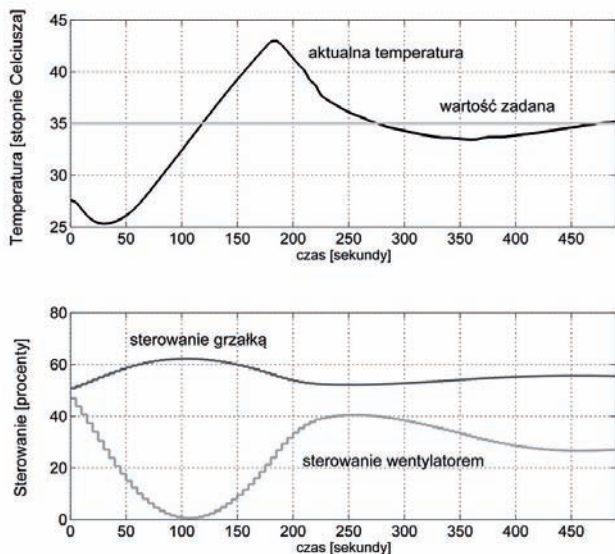
Przykładowo: zakłada się, że każdy element należy do osobnej grupy, z czego tylko pierwszy element ma programowe opóźnienie o wartości 5. Oznacza to, że przekazanie do stanowiska informacji o zmianie sygnału sterującego elementu pierwszego spowoduje faktyczne ustawienie dla niego sygnału sterującego dopiero po 5 chwilach dyskretnego czasu (jedna chwila jest równa okresowi próbkowania, tj. 1 s). Wszystkie wartości sterowania są kolejgowane, co pozwala na zapamiętanie kolejnych wartości sygnału sterującego, jakie mają zostać użyte w zależności od elementu.

Analogicznie działa opóźnienie dotyczące wyjść stanowiska, tj. czujników temperatury. Wartości zmierzone przez poszczególne czujniki są kolejgowane w kolejkach o długości odpowiadającej wartościom opóźnienia dla każdego z czujników. Odczyt wartości temperatury jest opóźniany o liczbę chwil dyskretnych równych opóźnieniu.

### 6. Przykład wykorzystania stanowiska laboratoryjnego

Aby zademonstrować działanie zbudowanego stanowiska laboratoryjnego zaprojektowano algorytm regulacji predykcyjnej typu DMC, w którym do predykcji stosuje się prosty model liniowy w postaci odpowiedzi skokowej [7]. Założono, że rozważa się proces w konfiguracji z dwoma wejściami i jednym wyjściem. Wejściowe sygnały sterujące (PWM) dotyczą grzałki G1 i wentylatora W1, natomiast wyjściowy sygnał sterowany jest mierzony przez czujnik temperatury T1. Na rys. 9 przedstawiono przykładowy przebieg eksperymentu polegającego na regulacji temperatury T1, przy czym jej początkowa wartość wynosi 27,5 °C, wartość zadana wynosi 35 °C. W początkowych chwilach regulacji widać przewagę sterowania grzałki. Po przekroczeniu wartości zadanej sterowanie grzałki spada, a sterowanie wentylatora rośnie. Początkowo nie widać żadnego wpływu działania wentylatora. Było to spowodowane zbyt małym sterowaniem, a co za tym idzie małym współczynnikiem wypełnienia PWM. Aby ruszyć, wentylator musi otrzymać sterowanie na poziomie około 20%. W dalszym czasie regulowana temperatura zaczyna się stabilizować na zadanej pozycji.

Oczywiście istnieje możliwość zmiany konfiguracji procesu i rozważenie do regulacji procesu o maksymalnie sześciu zmiennych wejściowych i maksymalnie czterech zmiennych wyjściowych. Oprócz badania skuteczności algorytmów przy zmianach wartości zadanych wielkości wyjściowych, dodatkowo istnieje

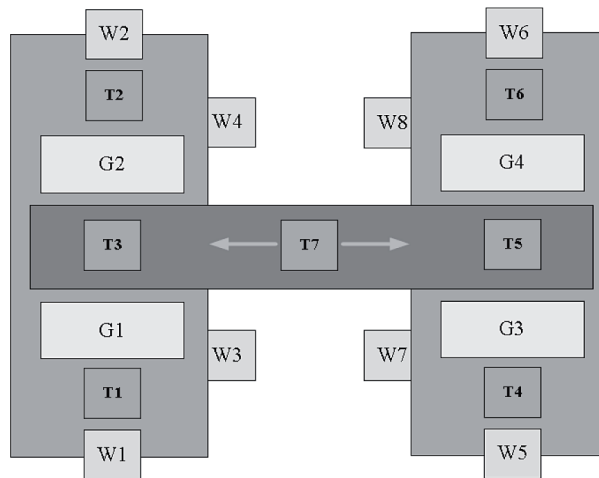


Rys. 9. Wyniki regulacji temperatury T1 przy wykorzystaniu regulatora DMC  
 Fig. 9. Experiments with control of the temperature T1 using the DMC algorithm

możliwość badania pracy algorytmów regulacji przy zakłóceniach procesu wywołanych przez przestawienie poszczególnych elementów sterujących w tryb pracy ręcznej.

### 7. Możliwości rozszerzenia

Struktura stanowiska pozwala za konstruowanie większych obiektów regulacji. Na rys. 10 przedstawiono złożenie dwóch podstawowych obiektów, w wyniku którego uzyskano proces o 12 wejściach i 7 wyjściach. Modułowa konstrukcja pozwala na zwiększanie wymiarów procesu w dość łatwy sposób.



Rys. 10. Możliwość rozszerzenia procesu  
 Fig. 10. The possibility of extending the process

### 8. Podsumowanie

W pracy przedstawiono projekt i opisano szczegóły realizacji stanowiska laboratoryjnego, które umożliwia testowanie wielowymiarowych algorytmów regulacji. Zrealizowane stanowisko spełnia postawione założenia. Dzięki zaproponowanej strukturze można regulować procesy jednowymiarowe, a także wielowymiarowe, o różnej liczbie wejść i wyjść (maksymalnie 6 wejść i 4 wyjścia). Istnieje możliwość konfiguracji dodatkowych opóźnień, zmieniających dynamikę procesu, a także symulacji uszkodzeń urządzeń wykonawczych. Uniwersalny interfejs umożliwia podłączenie różnych urządzeń z zaimplementowanym odpowiednim algorytmem regulacji. Istnieje możliwość realizacji algorytmu regulacji na komputerze PC, np. w języku MATLAB, w układzie mikroprocesorowym, układzie FPGA lub sterowniku logicznym. Zaprezentowane stanowisko laboratoryjne może być wykorzystane w trakcie zajęć laboratoryjnych związanych z projektowaniem algorytmów regulacji oraz diagnostyki (detekcji uszkodzeń).

### Bibliografia

- Currie J., Prince-Pike A., Wilson D., *Auto-code generation for fast embedded Model Predictive Controllers*, Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Auckland, New-Zealand 2012, 116–122.
- Johansen T.A., *Towards dependable embedded model predictive control*, "IEEE Systems Journal". DOI: 10.1109/JSYST.2014.2368129.
- Johnson M.A., Moradi M.H., *PID Control: New Identification and Design Methods*, Springer, Londyn 2005.
- Maciejowski J.M., *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, Harlow 2002.
- Petko M., Lubieniecki M., Staworko M., *Automatyczna implementacja programowo-sprzętowa algorytmów sterowania w układach FPGA*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 55, Nr 5, 2009, 297–300.

6. Qin S.J., Badgwell T.A., *A survey of industrial model predictive control technology*, "Control Engineering Practice", Vol. 11, No. 7, 2003, 733–764, DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.
7. Tatjewski P., *Advanced control of industrial processes, Structures and algorithms*, Springer, London 2007, DOI: 10.1007/978-1-84628-635-3.
8. Yang N., Li D., Zhang J., Xi Y., *Model predictive controller design and implementation on FPGA with application to motor servo system*, "Control Engineering Practice", Vol. 20, No. 11, 2012, 1229–1235, DOI: 10.1016/j.conengprac.2012.06.012.
9. Wang Q.G., Ye Z., Cai W.J., Hang C.C., *PID Control for multivariable processes*, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 373, Springer, Heidelberg 2008, DOI: 10.1007/978-3-540-78482-1.
10. Zometa P., Kogel M., Findeisen R., *μAO-MPC: a free code generation tool for embedded real-time linear model predictive control*, Proceedings of the American Control Conference (ACC), Washington, DC, 2013, 5320–5325, 10.1109/ACC.2013.6580668.

## Laboratory stand for the study of multivariable control algorithms

**Abstract:** The article describes the design and implementation of a laboratory test-bench which may be used to evaluate control algorithms. Mechanical and electronic details are presented. The software features that allow to control the test-bench are discussed. The test-bench is very flexible since it may be easily configured to act as a single-input single-output process and as a number of complicated multiple-input multiple-output processes. Existing possibilities of development of control algorithms implemented on embedded systems based on microprocessors, FPGAs and PLCs are discussed. Finally, an example implementation of a model predictive control algorithm on a microprocessor is detailed.

**Keywords:** predictive control, multiple-input multiple-output processes, embedded systems, microprocessors, FPGAs

### mgr inż. Andrzej Wojtulewicz

A.Wojtulewicz@stud.elka.pw.edu.pl

Urodzony w Pruszkowie 24 lipca 1988 r. W 2007 r. rozpoczął studia na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. W 2014 r. rozpoczął studia doktoranckie w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej. Od listopada 2009 r. był pracownikiem Centrum Badawczo Konstrukcyjnego Obrabiarek Serwis Sp. z o.o., gdzie zajmował się wdrażaniem systemów sterowania numerycznego dla maszyn przemysłowych. Od stycznia 2012 r. współpracuje z Mitsubishi Electric w zespole inżynierów aplikacyjnych, gdzie realizowane jest wdrażanie, programowanie i uruchomienie prototypowych rozwiązań z zakresu automatyki przemysłowej na bazie zaawansowanych procesorów. Interesuje się modelarstwem RC oraz wizualizacją dźwięku.



### dr hab. inż. Maciej Ławryńczuk

M.Lawrynczuk@ia.pw.edu.pl

Urodzony w Warszawie w 1972 r. Pracuje w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych, gdzie w 1998 r. uzyskał dyplom magistra inżyniera elektronika o specjalności automatyka i robotyka, w 2003 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka, natomiast w 2013 r. stopień naukowy doktora habilitowanego w tej samej dziedzinie. Jego zainteresowania naukowe to: zaawansowane algorytmy regulacji, w szczególności algorytmy regulacji predykcyjnej, algorytmy optymalizacji punktu pracy, techniki sztucznej inteligencji, w szczególności sieci neuronowe, zagadnienia modelowania i symulacji. Jest autorem (lub współautorem) 6 książek i ponad 100 publikacji naukowych. Brał udział w kilkunastu projektach badawczych oraz badawczo-rozwojowych.



### mgr inż. Patryk Chaber

P.Chaber@stud.elka.pw.edu.pl

Urodzony w Warszawie w 1990 r. W 2008 r. rozpoczął studia na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej na kierunku informatyka. Od 2014 r. jest doktorantem w Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej. Jego zainteresowania to sieci neuronowe, algorytmy regulacji predykcyjnej, mikrokontrolery, Internet of Things.

