

dr inż. Adam Piłat
AGH Katedra Automatyki
mgr inż. Jakub Klocek
OPTISTER Kraków

MODUŁOWA APARATURA DO ZADAŃ DIAGNOSTYKI I STEROWANIA

Niniejsze opracowanie przedstawia konfigurowalną aparaturę kontrolno-pomiarową dedykowaną do zadań diagnostyki i sterowania. Główną cechą omawianej platformy sprzętowo-programowej jest jej uniwersalność ze względu na liczbę wejść i wyjść oraz funkcjonalność. Modułowa konstrukcja warstwy sprzętowej umożliwia dostosowanie aparatury zarówno do zadań monitorowania, sterowania i przetwarzania sygnałów analogowo-cyfrowych. Takie urządzenie może być skonfigurowane według potrzeb pod konkretne zastosowanie. Opracowanie przedstawia wybrane przykłady i możliwości zastosowania aparatury. Zamieszczono przykładowe architektury programowe dedykowane do zadań akwizycji i sterowania z wykorzystaniem tej aparatury. Walory sprzętowe zilustrowano zapisem z kilku testów sygnałowych.

MODULAR APPARATUS FOR DIAGNOSIS AND CONTROL TASKS

This elaboration presents the reconfigurable apparatus for diagnosis and control tasks. The main feature of the presented hardware-software solution is the flexibility for applications determined by the configurable number of inputs and outputs as well as functionality. The modular construction allows to adapt the apparatus for monitoring, control and signal processing tasks. Such device can be easily configured to the dedicated application. The selected examples and possible apparatus applications are presented. A few typical software configurations dedicated to the data acquisition and control tasks are given. The hardware features are illustrated by the experimental data from a few signal tests.

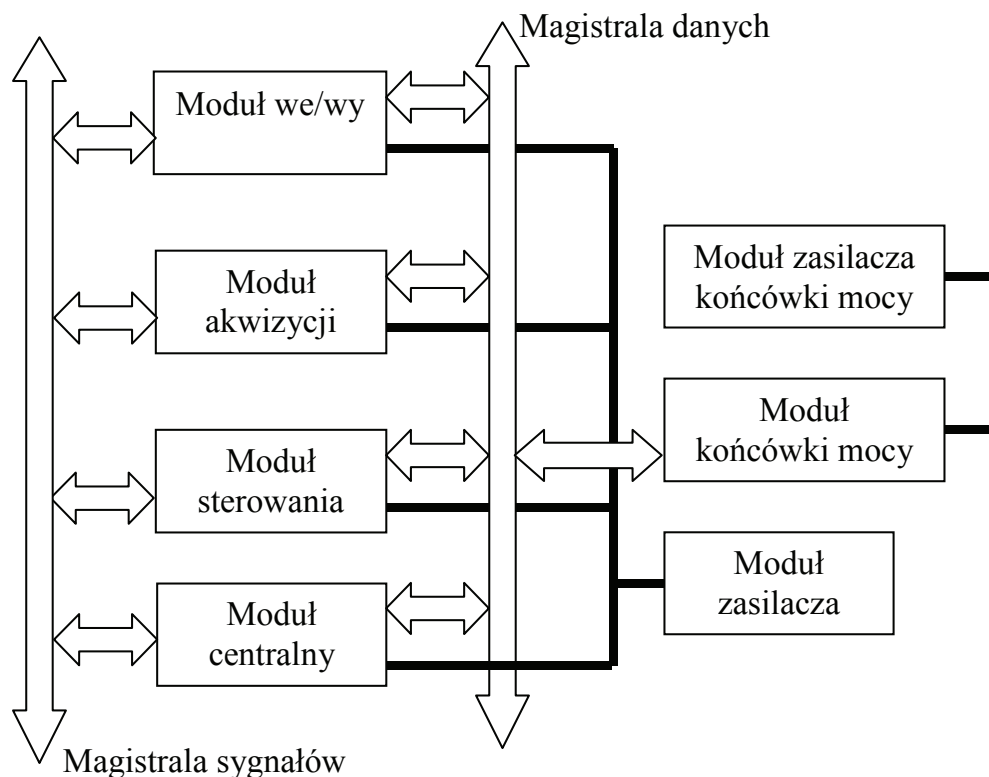
1. MOTYWACJA

Główną motywacją do wytworzenia opisywanej aparatury są prowadzone badania nad układami aktywnej lewitacji magnetycznej [4, 5]. Wykorzystywane rozwiązania sprzętowe [3, 5, 6, 7] o szczególnych wymaganiach dot. sterowania, a wynikających z własności dynamicznych i skutkujących w relatywnie wysokich częstotliwościach próbkowania rzędu 1–20 kHz i więcej w zależności od konfiguracji, posiadają swoiste wady i zalety. Potrzeba realizacji zadań sterowania w warstwie sprzętowej po ich uprzednim przetestowaniu w zintegrowanym środowisku projektowania, modelowania i symulacji przyczyniła się do niniejszego rozwiązania sprzętowego. Podjęto decyzję o budowie indywidualnego rozwiązania sprzętowego o określonej wydajności i cechach istotnych z punktu widzenia aplikacji kontrolno-pomiarowych układami wielowymiarowymi. Ponadto, ze względu na wymagania czasowe układów aktywnej lewitacji magnetycznej koniecznym było opracowanie platformy spełniającej określone reżimy czasowe narzucone przez dynamikę układów aktywnej lewitacji magnetycznej. Warto nadmienić, że obecność na rynku uniwersalnych rozwiązań (oferowanych przez wiodących producentów aparatury kontrolno-pomiarowej możliwej do zastosowania w aplikacjach kontrolno-pomiarowych (dSPACE [1],

National Instruments [8], MATHWORKS [9, 2]) o pewnej nadmiarowości rozwiązań do przetwarzania sygnałów przy jednoczesnym braku układów zasilania mocy oraz ich wysoki koszt działały motywująco do opracowania indywidualnego rozwiązania. Wytworzona aparatura jest konkurencyjna cenowo oraz daje pełną kontrolę nad wykonywanymi operacjami przetwarzania sygnałów i obsługi urządzeń wejścia/wyjścia.

2. ARCHITEKTURA APARATURY



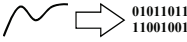
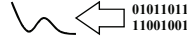



Jak wspomniano, główną motywacją do opracowania opisywanej aparatury były prowadzone badania nad układami aktywnej lewitacji magnetycznej, które stawiają wysokie wymagania aplikacjom sterowania ze względu na możliwość programowego nastawiania własności dynamicznych. Dzięki wysokim wymaganiom stawianym przez układy aktywnej lewitacji magnetycznej opracowana platforma sprzętowa została tak przemyślana, aby można ją było zastosować w aplikacjach monitorowania i sterowania różnych urządzeń i procesów technologicznych. Opracowane rozwiązanie pozwala na dostosowanie konfiguracji aparatury pod konkretne zastosowanie. Zastosowanie magistrali sygnałowej i danych pozwala swobodny przesył sygnałów analogowych i cyfrowych pomiędzy poszczególnymi modułami. Modułowa konstrukcja sprawia, iż aparatura ta może być rozwijana i wyposażona w kolejne moduły w zależności od zapotrzebowania.



Rys. 1. Architektura aparatury

Założenie modularności i konfigurowalności sprzętu zostało spełnione i możliwym jest w zakresie ograniczeń sprzętowych, konfigurowanie zestawu w zależności od zastosowania. Z założenia platforma ta ma służyć do badania i sterowania obiektami wielowymiarowymi (ang. MIMO), nie pomijając jednak układów jednowymiarowych (ang. SISO).

Tabela 1. Zestawienie modułów K.A.D.S.

<p>Moduł główny</p> 	<p>Moduł główny komputera jest niezbędny do skonfigurowania aparatury – wzajemnych połączeń między modułami oraz stanowi jednostkę komunikacyjną z zewnętrznym komputerem klasy PC lub laptopem przez złącze USB i/lub opcjonalnie Ethernet. Moduł główny zawiera centralną jednostkę sterującą, która jest dedykowana do nadrzędnych zadań sterowania i wymiany danych z urządzeniami zewnętrznymi i modułami sterownika. Jednostka centralna – mikroprocesor 32-bitowy.</p>
<p>Moduł wejścia/wyjścia</p> 	<p>Moduł wejścia/wyjścia umożliwia dowolną konfigurację sygnałów wejściowych lub wyjściowych w ilości do 8 sztuk. Moduł ten może być użyty wielokrotnie w aparaturze w celu zapewnienia dostatecznej ilości wejść/wyjść do obsługi sterowanego procesu. Sygnały wejściowe są podłączane poprzez precyzyjne złączone złącza niskoszumowe</p>
<p>Moduł A/C</p> 	<p>Moduł akwizycji zawiera do 8 torów pomiarowych oraz pamięć o konfigurowalnej pojemności od 1 MB do 2 GB. Moduł ten realizuje zadania akwizycji jak i obliczeniowe (sterujące). Jednostka centralna – mikroprocesor 32-bitowy.</p>
<p>Moduł C/A</p> 	<p>Moduł sterowania zawiera do 8 torów wyjściowych sterujących oraz pamięć o konfigurowalnej pojemności od 1 MB do 2 GB. Moduł ten realizuje zadania obliczeniowe i sterowania. Jednostka centralna – mikroprocesor 32-bitowy.</p>
<p>Końcówka mocy</p> 	<p>Moduł ten zawiera 2 sterowane wyjścia mocy do zasilania urządzeń zewnętrznych takich jak silniki DC, pompy, siłowniki i inne urządzenia automatyki. Zakres napięć wyjściowych to 0–50 V i prąd o natężeniu 0–3 A na kanał. Do każdego z modułów końcówki mocy jest niezbędny moduł zasilania końcówki mocy.</p>
<p>Zasilacz aparatury,</p> 	<p>Moduł zasilacza; zasila sterownik konfigurowalny; musi być zainstalowany w sterowniku w liczbie 1 szt.</p>
<p>Zasilacz końcówki mocy</p> 	<p>Moduł zasilający końcówkę mocy obsługuje jedną bądź dwie końcówki mocy w zależności od obciążenia prądowego.</p>

W aparaturze mogą zostać zainstalowane następujące moduły:

- moduł centralny służący do konfiguracji sterownika,
- moduł wejścia/wyjścia zawierający elementy łączeniowe z czujnikami i zewnętrznymi urządzeniami wykonawczymi posiadającymi własne stopnie mocy,
- moduł akwizycji zawierający do ośmiu kanałów analogowo-cyfrowych umożliwiający rejestrację sygnałów pomiarowych i sterujących w pamięci,

- moduł sterowania zawierający do ośmiu kanałów cyfrowo-analogowych umożliwiający sterowanie elementami automatyki. Sygnał podłączany jest do modułu wejścia/wyjścia lub końcówek mocy,
- moduł końcówki mocy zawierający dwa kanały wyjściowe służące do bezpośredniego sterowania zewnętrznymi elementami wykonawczymi takimi jak pompy, silniki, siłowniki itp.,
- moduł zasilacza służący do zasilania sterownika,
- moduł zasilania końcówki mocy służący do zasilania modułu końcówki mocy.

Aparatura składa się z zestawu modułów, które są umieszczane w obudowie przemysłowej (standard 19"). Obudowa ta zawiera panel tylny stanowiący element łączeniowy poszczególne moduły. Panel ten zawiera 9 gniazd, do których możliwe jest podłączenie poszczególnych modułów, gniazdo do podłączenia modułu zasilania i miejsce na wstawienie modułów zasilania końcówek. Zaprojektowana aparatura została opracowana tak, aby można było ją umieszczać w standardowych obudowach zgodnych ze standardami IEC. I tak można ją zamontować w eurokasecie przeznaczony do montażu w przemysłowych szafach sterowniczych, jeśli zajdzie potrzeba przeniesienia w obrębie fabryki można umieścić ją w przenośnej obudowie typu comptec. W przypadku zastosowania laboratoryjnego/badawczego umieszczana jest w estetycznej obudowie ratiopacPRO, która może być w formie kasety 19" z rączkami, w obudowie pionowej (ang. *tower*) lub oscyloskopowej (z rączką ułatwiającą przenoszenie).

W celu zilustrowania możliwości konfiguracyjnych pojedynczego zestawu w tabeli 2 zestawiono wybrane i typowe konfiguracje. Cechują je różne ilości poszczególnych modułów w zależności od docelowego przeznaczenia. Na tym etapie należy zaznaczyć, iż autonomiczne konfiguracje aparatów mogą być między sobą łączone poprzez moduł wejścia/wyjścia stanowiący most analogowy pomiędzy aparatami. Dzięki temu możliwym jest skonfigurowanie jednego zestawu jako typowo pomiarowego a drugiego jako bezpośrednio sterującego urządzeniami (z modułami końcówek mocy). Dzięki tej dodatkowej uniwersalności i modułowości możliwym jest realizowanie złożonych zadań monitorowania i sterowania procesami i obiektami wielowymiarowymi.

Konfiguracja 1 to zestaw dedykowany do zadań sterowania. Moduły We/Wy konfiguruje się jako kanały wejściowe lub wyjściowe. Dzięki temu dwa pierwsze moduły są przewidziane do dostarczania sygnałów do przetworników A/C a trzeci do wyprowadzenia sygnałów sterujących ze sterownika. Dodatkowo w tej konfiguracji dwie dwukanałowe końcówki mocy pozwalają na bezpośrednie sterowanie czterema urządzeniami. Ostatecznie w tej konfiguracji można sterować systemami o maksymalnie 16 wejściach i 10 wyjściach. Podobną architekturę ma sterownik 2, w którym użyto wyłącznie układów mocy do sterowania, co sprawiło, iż w stosunku do poprzedniej konfiguracji wysterowuje się 6 urządzeń wykonawczych, jednakże żadne zewnętrzne urządzenia mocy nie są już wymagane. Konfiguracja numer 3 zakłada, iż system posiada własne stopnie mocy przy urządzeniach wykonawczych i potrzebne jest przetwarzanie 16 sygnałów wejściowych i 16 wyjściowych. Taka konfiguracja pozwala na sterowanie systemami wielowymiarowymi. Zastępując moduł C/A modułem A/C można przetwarzać 24 sygnały pomiarowe i generować 8 sterowań. Konfiguracja numer 4 jest dedykowana do realizacji zadań pomiarowych, bowiem umożliwia odczyt sygnałów z 32 źródeł.

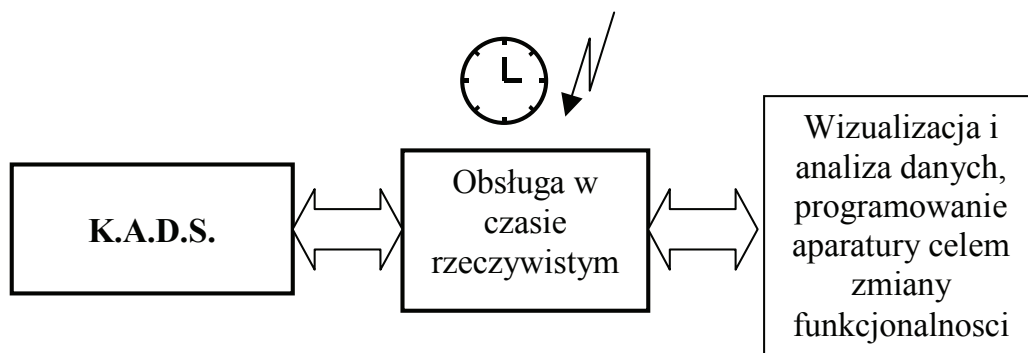
Tabela 2. Zestawienie wybranych konfiguracji

Slot	Konfiguracja 1	Konfiguracja 2	Konfiguracja 3	Konfiguracja 4
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8		Zasilacz mocy 1		
9				
10				
11				
12				

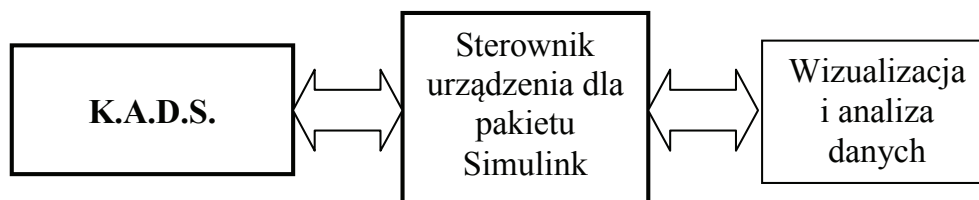
3. OBSŁUGA PROGRAMOWA

Moduł główny stanowiący jednostkę centralną pozwala na wymianę danych pomiędzy aparaturą a komputerem nadrzędnym. Oprogramowanie konfigurujące oraz wymiany danych pozwala na konfigurację aparatury oraz prowadzenie eksperymentów. Integracja na platformie Windows z oprogramowaniem MATLAB/Simulink umożliwia wizualizację danych, programowanie modułów przetwarzania C/A oraz realizację nadrzędnych zadań sterowania i optymalizacji. Zastosowanie modułu do zegarowych wywołań cyklicznych z maksymalną częstotliwością 1 kHz gwarantuje zachowanie reżimów czasowych (rys. 2 i 4). Tym samym zadania analizy danych, modyfikacji sterowania oraz rekonfigurowanie aparatury może być przeprowadzone z zachowaniem reżimów czasowych. Inną możliwą konfiguracją jest podłączenie aparatury do środowiska Simulink i wykorzystanie go do analizy i wizualizacji danych pomiarowych oraz rekonfiguracji aparatury (rys. 3). W podstawowej postaci Simulink nie zapewnia reżimów czasu rzeczywistego. Doposażenie Simulink-a w taką warstwę umożliwia realizację zadań sterowania w czasie rzeczywistym. Najbardziej zaawansowanym zastosowaniem aparatury jest wykorzystanie jej jako docelowego układu sterowania z nadrzędną warstwą optymalizacji i adaptacji sterowania.

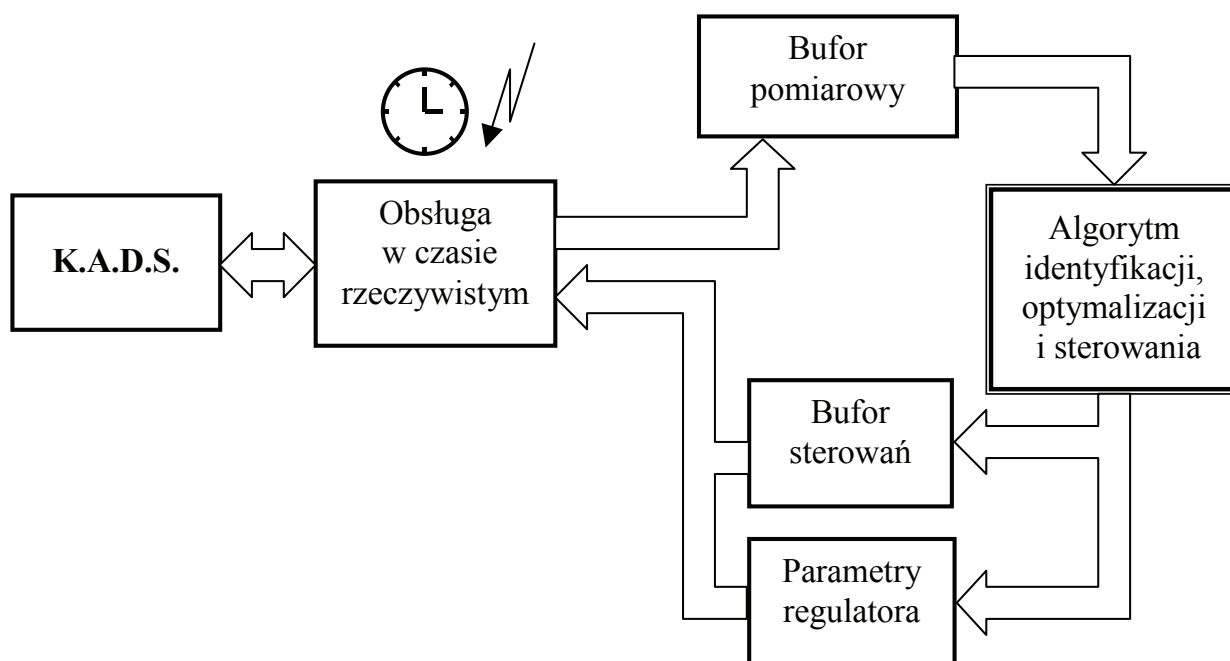
Buforowa wymiana danych pozwala na prowadzenie różnorodnych eksperymentów i zastosowanie aparatury w wielu aplikacjach przemysłowych (chemicznych, transportu ciepła, masy, urządzeniach elektromechanicznych, mechatronicznych, itp.) oraz badawczych (rys. 4).



Rys. 2. Akwizycja danych, generowanie sygnałów, adaptacja sterowania lub nadrzędne sterowanie z wykorzystaniem pakietu MATLAB

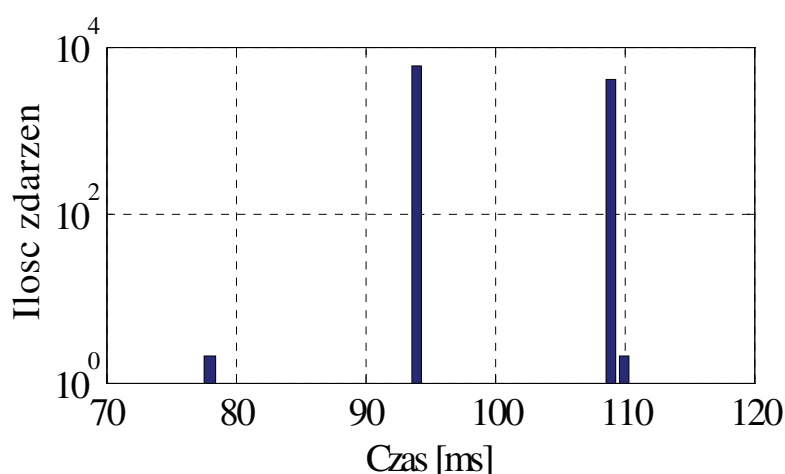


Rys. 3. Akwizycja danych z wykorzystaniem pakietu Simulink



Rys. 4. Użycie aparatury w aplikacji nadrzędnego sterowania i optymalizacji

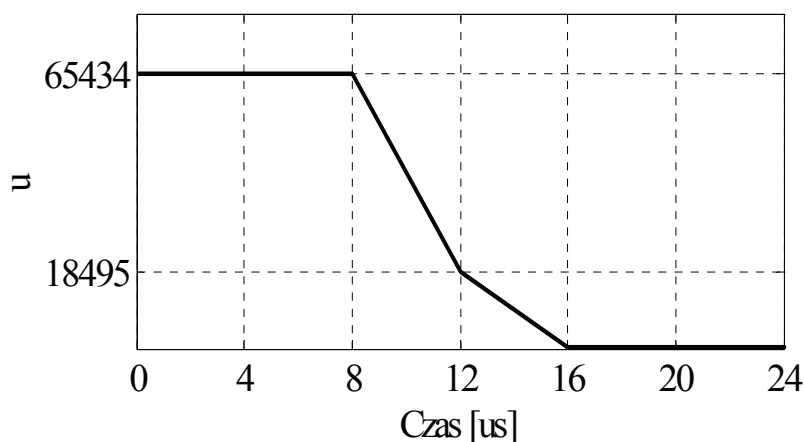
Dla 10 tys. zarejestrowanych zdarzeń przez moduł obsługi w czasie rzeczywistym (rys. 2 i 4), dokonano analizy czasu wystąpienia i zaobserwowano następujące wskaźniki procentowe: 0,02 %, 59,97 %, 39,99 %, 0,02 % odpowiednio dla chwil czasu: 78,0016 ms, 94,0000 ms, 108,9999 ms, 109,9984 ms (rys. 5). Obserwowany brak punktualności (ang. *jitter*) jest związany z działaniem mechanizmu czasowego na platformie Windows. Brak punktualności na poziomie -6 ms i $+9$ ms z punktu widzenia aplikacji sterowania nadrzędnego jest akceptowalny, bowiem algorytm ten ma dokonywać zadań decyzyjnych co do wypracowania nowego sterowania bądź zmiany nastaw układu regulacji bezpośredniej.



Rys. 5. Histogram zdarzeń dla procedury czasu rzeczywistego z żądaniem wykonania co 100 ms

4. POMIARY TESTOWE

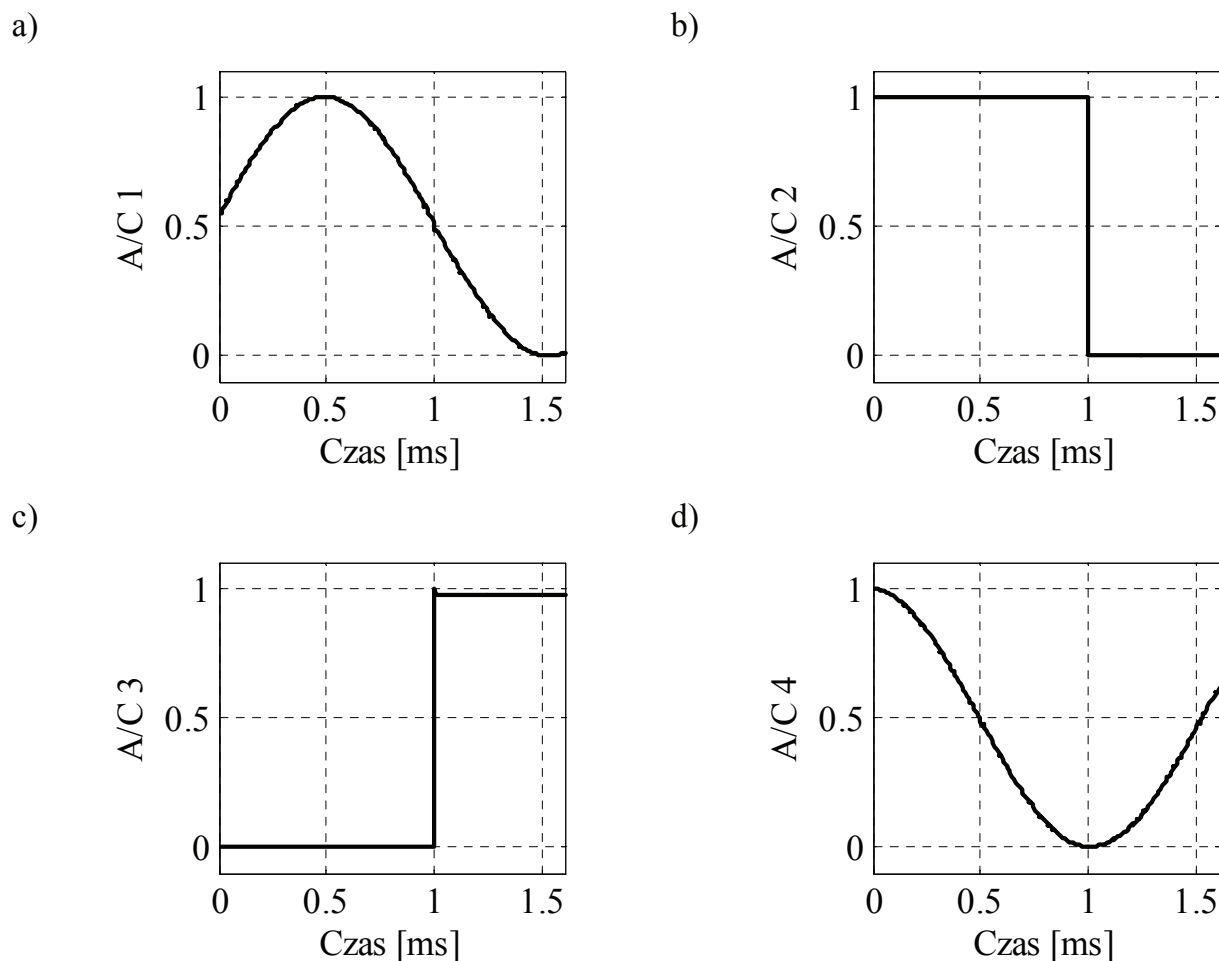
W celu wizualizacji działania aparatury przeprowadzono test polegający na generowaniu sygnału prostokątnego przez moduł C/A oraz jego pomiarze przez moduł A/C. Jako sygnał testowy wybrano sygnał prostokątny. Od tego typu sygnału, zwłaszcza w aplikacjach sterowania czasooptymalnego wymaga się precyzji w generowaniu zbocza, punktualności i powtarzalności. Na rys. 6 przedstawiono zbocze opadające sygnału zarejestrowane przez moduł A/C pracujący z próbkowaniem 250 kHz (okres próbkowania 4 μ s).



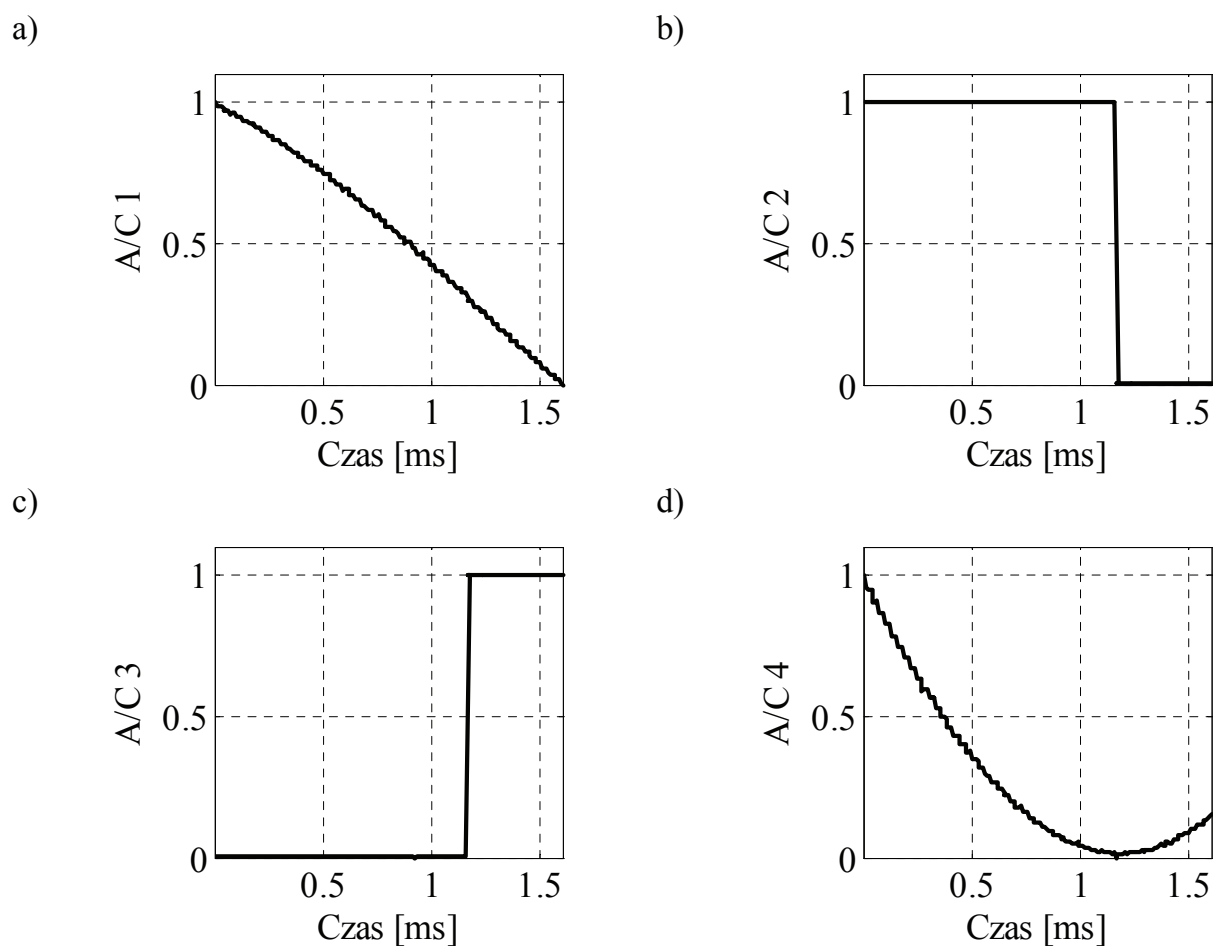
Rys. 6. Zarejestrowany przetwornikiem A/C sygnał skokowej zmiany napięcia na przetworniku C/A

Ten sam sygnał zmierzony oscyloskopem miał szerokość zbocza wynoszącą $1,36 \mu\text{s}$. Źródłem sygnału było napięcie wyjściowe przetwornika C/A o czasie ustalania 5 ns . Zarejestrowane przełączenie jest Zarejestrowanie pełnego przełączenia zajmuje $8 \mu\text{s}$ ze względu na częstotliwość próbkowania, to jednak w większości aplikacji sterowania czasooptymalnego jest bardzo dobrym wynikiem i nie będzie miało skutków w dynamice sterowanego układu o stałych czasowych większych niż $100 \mu\text{s}$.

Inną ważną z punktu widzenia aplikacji sterowania i pomiarów jest możliwość pracy wielokanałowej z programowalną częstotliwością próbkowania jednoczesnego lub nie. W pierwszym przypadku wszystkie kanały są próbkowane z tą samą częstotliwością, zaś w drugim z różną. Pozwala to na zastosowanie aparatury w aplikacjach sterowania o różnych stałych czasowych i optymalne dostosowanie częstotliwości próbkowania i zasobów pamięci do zadań sterowania. Na rys. 7 przedstawiono sygnały próbkowane z częstotliwością 160 kHz po normalizacji. Analizując dane obserwuje się całkowity brak przesłuchów między kanałami. Rys. 8 ilustruje akwizycję z częstotliwością 250 kHz czterech różnych sygnałów generowanych przez moduł C/A pracujący z częstotliwością 51 kHz . Otrzymane wyniki potwierdzają prawidłowość funkcjonowania aparatury i jej potencjalne możliwości z punktu widzenia zastosowania w aplikacjach diagnostyki i sterowania.



Rys. 7. Równoległe próbkowanie z częstotliwością 160 kHz na czterech kanałach różnych sygnałów generowanych z tą samą częstotliwością



Rys. 8. Równoległe próbkowanie z częstotliwością 250 kHz na czterech kanałach sygnałów generowanych z częstotliwością 51 kHz

5. PODSUMOWANIE

Opracowana modułowa aparatura (rys. 9) do zadań diagnostyki i sterowania stanowi ciekawą alternatywę dla rozwiązań dostępnych na rynku. Ma ona wiele istotnych cech znaczących z punktu widzenia sterowania bezpośredniego i nadrzędnego. Wielokanałowa akwizycja danych z programowaną częstotliwością pozwala na jednoczesną diagnostykę stanu całego systemu. Również jednoczesne generowanie sygnałów eliminuje występowanie opóźnień w torze sterowania. Modułowa konstrukcja pozwala na dostosowanie aparatury do wymagań stawianych zadaniom badawczym, diagnostycznym i sterowania.



Rys. 9. Pierwsze zdjęcia prototypu w fazie uruchomieniowej

PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w ramach projektu badawczego 3585/B/T02/2009/37 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

BIBLIOGRAFIA

1. dSPACE Systems, <http://www.dspaceinc.com>
2. MC Wavebook/516E, <http://www.mccdaq.com>
3. Piłat A., Piątek P.: Multichannel control & measurement board with parallel data processing, Recent advances in control and automation, Academic Publishing House EXIT 2008, pp. 373–380
4. Piłat A. Analiza sprężystości i tłumienia przy lokowaniu biegunów w systemie aktywnego zawieszenia magnetycznego, Automatyka 2009, t. 13 z. 1, pp. 43–54
5. Piłat A., Sterowanie systemami magnetycznej lewitacji – Rozprawa doktorska, Katedra Automatyki AGH, Kraków, 2002
6. Piłat A., Grega W.: Hardware and software architectures for reconfigurable time-critical control tasks, Computer Science, 2007 vol. 8, pp. 69–81
7. Rosół M., Piłat A., Turnau A.: Real-time controller design based on NI compact-RIO, Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology. Vol. 5, October 18–20, 2010, Wisła, Poland, pp. 825–830
8. Rozwiązania sprzętowe i Oprogramowanie LabVIEW, <http://www.ni.com>
9. xPCTarget, <http://www.mathworks.com/products/xpctarget/>