

Adam Piłat*, Paweł Piątek*

Wykorzystanie technologii FPGA w Katedrze Automatyki AGH do badań nad sterowaniem układami MagLev

1. Wprowadzenie

Technologię FPGA w badaniach systemów MagLev zastosowano po raz pierwszy w Laboratorium Sterowania Cyfrowego Katedry Automatyki w roku 2000. Pierwszy układ z rodziny Spartan firmy Xilinx został umieszczony na karcie kontrolno-pomiarowej z magistralą ISA [6]. Karta ta stanowi wyposażenie laboratoryjnych stanowisk badawczych. W układzie FPGA zaimplementowano dedykowane funkcje logiczne pozwalające na podłączenie stanowisk laboratoryjnych do sprzętu komputerowego i środowiska MATLAB/Simulink. Pierwsze wykorzystanie technologii FPGA wynikało z potrzeby podłączenia systemu łożyska magnetycznych do zintegrowanego środowiska kontrolno-pomiarowego MATLAB/Simulink. Zastosowanie technologii FPGA umożliwiło przeniesienie typowych zadań formowania i przetwarzania sygnałów do warstwy sprzętowej, a tym samym pozwoliło na odciążenie systemu sterującego w czasie rzeczywistym. Dzięki temu większa ilość zasobów systemu komputerowego mogła zostać przydzielona algorytmom sterującym, co pozwoliło na realizację liniowych, nieliniowych i inteligentnych algorytmów sterowania systemem łożysk magnetycznych. Dlatego też odciążenie systemu sterującego stanowiło kluczowe zadanie, które to z powodzeniem zostało zrealizowane. Dalsze prace badawcze skupiły się na implementacji cyfrowego regulatora PID bezpośrednio w warstwie sprzętowej – w układzie FPGA. Zadanie to wymagało opracowania metodyki syntezy regulatora cyfrowego z uwzględnieniem specyfiki architektury układu FPGA. W wyniku zdobytych doświadczeń opracowano dedykowaną kartę kontrolno-pomiarową dla systemów wielowymiarowych charakteryzujących się stałymi czasowymi rzędu mikro- i milisekund.

Układy FPGA do sterowania systemami MagLev stosuje się w wielu ośrodkach naukowych zajmujących się tą technologią. W większości przypadków opracowywane są in-

* Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

dywidualne rozwiązania sprzętowe dopasowywane do stawianych wymagań i realizowanych celów sterowania. W niniejszej pracy przedstawiono wykorzystanie tej technologii w badaniach prowadzonych w Katedrze Automatyki AGH.

2. Technologia FPGA

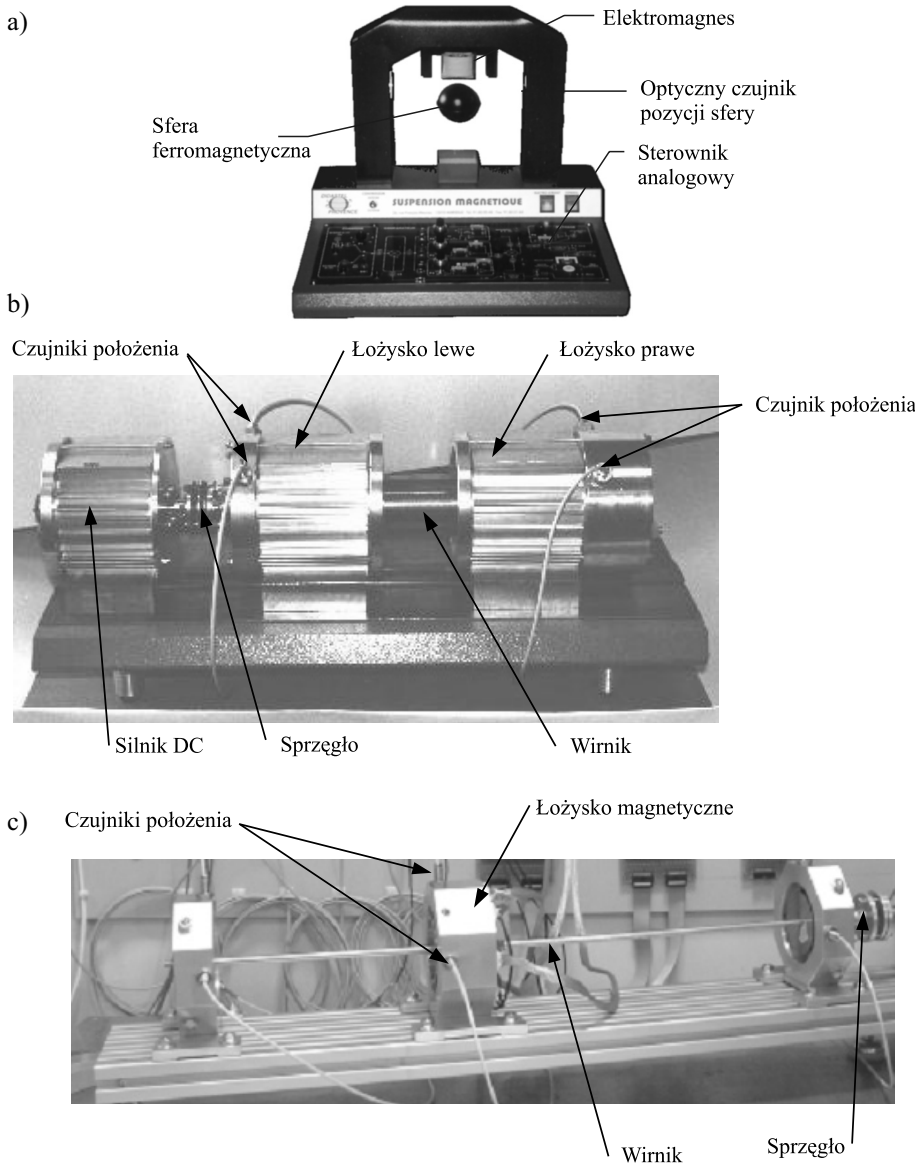
FPGA (*Field Programmable Gate Array*) są cyfrowymi układami logicznymi, które mogą zostać zaprogramowane w sposób określony przez użytkownika, aby spełniać dedykowane funkcje. Pozwala to na dostosowanie konfiguracji układu do określonych potrzeb i realizowanych zadań. Ponadto wiele układów i konfiguracji cyfrowych można zaimplementować w jednym układzie, co znacząco obniża koszty produkcji i przyspiesza realizację projektu. W użytych rozwiązaniach sprzętowych cyfrowe przetwarzanie sygnałów może odbywać się w sposób równoległy z maksymalną częstotliwością 40 MHz. Wykorzystanie języka opisu sprzętu, np. VHDL (*Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language*) [8], pozwala na indywidualne zaprojektowanie konfiguracji układu FPGA w sposób behawioralny. Obecnie na świecie prowadzone są intensywnie prace badawcze i rozwojowe ukierunkowane na opracowane metodyki i narzędzi do modelowania złożonych architektur z wykorzystaniem języków wysokiego poziomu, np. VHPI (*VHDL Procedural Interface*) [23], Handle C, System C. Również rozwijana jest technika *Hardware-Software Co-Design* umożliwiająca efektywne wykorzystanie zasobów sprzętowych, które pewnie nie zastąpi precyzji i optymalizacji kodu, jaki można opracować w języku, np. VHDL. Nasuwa się tutaj analogia do programowania mikroprocesorów – język assembler i C.

3. Systemy MagLev

Systemy MagLev (*Magnetic Levitation*) umożliwiają bezkontaktowe unoszenie obiektów ferromagnetycznych w polu magnetycznym.

Prowadzone badania skupiają się na aktywnych systemach MagLev, których działanie i własności zależą od opracowanego i zaimplementowanego prawa sterowania [1, 2, 4, 5, 10]. Aktywne sterowanie wymaga pomiaru własności związanych z działaniem siłownika elektromagnetycznego i/lub dynamiką obiektu. Opracowane regulatory liniowe, nieliniowe [4] i rozmyte [22] pozwoliły ocenić skuteczność i możliwości zastosowania tej technologii w systemach badawczych i przemysłowych. Zdobyte doświadczenie pozwala na skonstruowanie aplikacji do dedykowanych zastosowań. Kluczową zaletą tej technologii jest eliminacja tarcia i wszelkich mediów smarujących, co sprawia, iż jest ona bezwzględnie czysta. Ponadto kontrola parametrów pracy, czyli własności statycznych i dynamicznych, pozwala na stabilizację obiektu lewitującego w zadanym położeniu, aktywne tłumienie

drgań, bezkontaktowy pomiar własności fizycznych i inne. Na wyposażeniu Katedry Automatyki znajdują się dwa stanowiska badawcze: zawieszenie magnetyczne [19] (rys. 1a), system łożysk magnetycznych [20] (rys. 1b) oraz rekonfigurowalny system do badania łożysk magnetycznych [18] (rys. 1c).

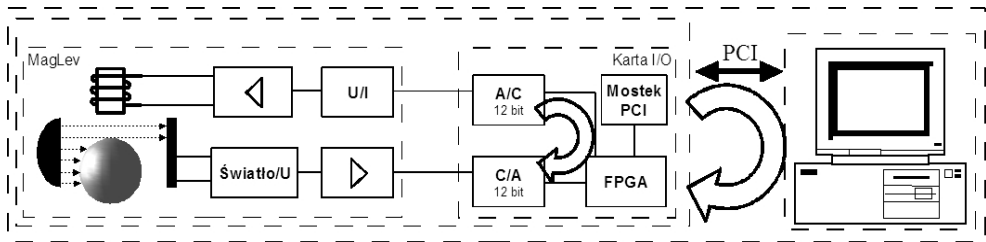


Rys. 1. Systemy magnetycznej lewitacji

4. Dedykowane rozwiązania do zadań pomiarowych i sterowania

Analizując literaturę poświęconą systemom magnetycznej lewitacji, można stwierdzić, że w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów najczęściej są stosowane systemy dSpace, karty kontrolno-pomiarowe i systemy docelowe firmy National Instruments. Wykorzystywane są również mniej popularne rozwiązania, najczęściej indywidualnie opracowane w grupach badawczych [3, 11]. Te niekonwencjonalne rozwiązania niejednokrotnie posiadają przewagę nad urządzeniami ogólnego stosowania, które z założenia nie są dedykowane do systemów MagLev. Stąd też wieloletnie prace badawcze z wykorzystaniem systemu magnetycznego zawieszenia, ewoluujące od systemów komputerowych do systemów wbudowanych, zawierały wątek związany z dedykowanym sprzętem kontrolno-pomiarowym. Badania prowadzono, wykorzystując zintegrowane środowisko komputerowe zawierające kartę kontrolno-pomiarową z układem FPGA zaprogramowanym dedykowaną logiką. Badania prowadzono w dwóch niżej wymienionych wariantach (rys. 2), zamykając pętlę sprzężenia zwrotnego:

- 1) tor regulacji wykorzystujący magistralę PCI i oprogramowanie czasu rzeczywistego [14, 20, 21];
- 2) regulator wbudowany w układ FPGA [17].



Rys. 2. Sposoby objęcia sprzężeniem zwrotnym systemu magnetycznej lewitacji

W przypadku sterowania systemami MagLev w konfiguracji SISO (*Single Input Single Output*), MISO (*Multi Input Single Output*) lub MIMO (*Multi Input Multi Output*) nie bez znaczenia jest sposób akwizycji danych. W kartach ogólnego stosowania o dużej liczbie wejść analogowych (typowo 16) wykorzystywany jest jeden przetwornik wraz z układem przełączającym (*Multiplexing*). Można też znaleźć rozwiązania droższe z kilkoma przetwornikami, lecz liczba kanałów wejściowych jest zazwyczaj mniejsza niż w ww. rozwiązaniu. Jeszcze inne rozwiązanie stanowią „zatrzaski analogowe” (*Sample and Hold*) stosowane wraz z kartami multipleksowanymi. Koszty ww. rozwiązań zwiększają się wraz z kolejno wykorzystanymi technologiami. W zależności od rozwiązania stosowana jest odpowiednia technika odczytu wartości sygnałów analogowych. Zazwyczaj jest ona realizo-

wana programowo i wymiana sygnałów sterujących oraz danych następuje z wykorzystaniem magistrali komputera (ISA, PCI). Drugi sposób to realizacja sprzętowa, wówczas karta dokonuje pomiaru według zaprogramowanego cyklu, a odczyt wartości jest możliwy z rejestrów karty. Wspomniane rozwiązania mają wpływ na jakość zastosowanego prawa sterowania i łatwo można zauważyć różnice w strukturze oraz realizacji algorytmu sterowania (SISO, MISO, MIMO) wynikające z zastosowania poszczególnych rozwiązań.

4.1. Dedykowane karty kontrolno-pomiarowe

Podczas budowy stanowiska aktywnych łożysk magnetycznych [21] zaistniała potrzeba podłączenia do typowego systemu komputerowego. Ponieważ planowano zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego w tym systemie komputerowym, konieczne było podłączenie wszystkich niezbędnych do sterowania sygnałów, czyli:

- czterech sensorów pozycji lewitującego wałka (po dwa na łożysko),
- enkodera czujnika położenia kąowego lewitującego wałka,
- ośmiu sygnałów PWM do sterowania końcówkami mocy elektromagnesów (po cztery na łożysko),
- jednego sygnału PWM oraz sygnałów logicznych do sterowania silnikiem napędzającym lewitujący wałek.

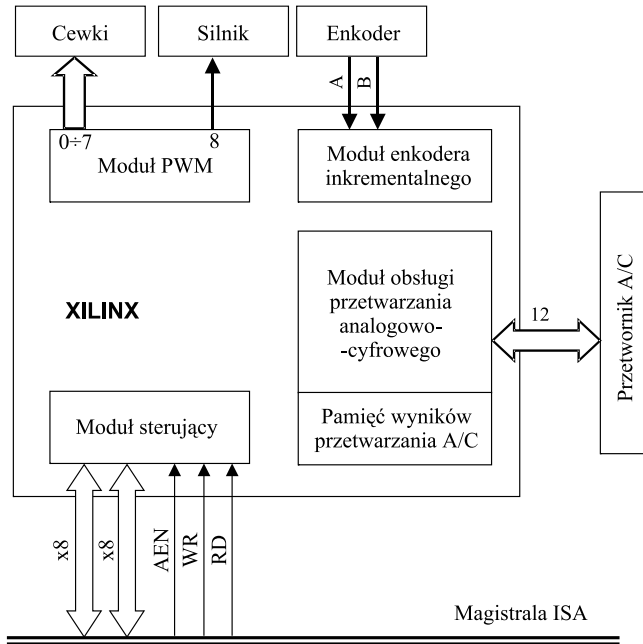
Do doprowadzenia/odprowadzenia takich sygnałów do/z komputera zwykle stosuje się gotowe karty kontrolno-pomiarowe, które są produkowane przez wielu producentów. W tym przypadku takie rozwiązanie byłoby jednak kosztowne, ponieważ wymagałoby wykorzystania kilku kart. Zdecydowano więc o zakupie karty wyposażonej w układ FPGA oraz odpowiednią liczbę wejść analogowo-cyfrowych. Dzięki temu w układzie FPGA można zbudować własną, dedykowaną do konkretnych zastosowań logikę. W tym przypadku możliwe było dostarczenie odpowiedniej ilości sygnałów PWM oraz zbudowanie portu enkodera inkrementalnego (analizatora sygnałów i licznika).

Rysunek 3 przedstawia schemat blokowy logiki zbudowanej do obsługi systemu łożysk magnetycznych [21].

W układzie FPGA skonfigurowano (rys. 3) moduł generatora sygnału PWM posiadający możliwość generowania sygnału PWM o tej samej częstotliwości, lecz o różnym wypełnieniu dla każdego z dziewięciu kanałów, moduł enkodera inkrementalnego umożliwiający odczyt fal pomiarowych z enkodera (zliczający impulsy i określający kierunek obrotów) oraz moduł obsługi przetwarzania analogowo-cyfrowego umożliwiający odczyt 12 kanałów analogowych.

Moduły obsługi enkodera i końcówek mocy PWM są wykonywane równolegle, a sprzętowe generowanie sygnału PWM o zadanej częstotliwości i programowalnym wypełnieniu zagwarantowało równoległe przetwarzanie sygnałów do wszystkich układów zasilania cewek. Odczyt informacji z enkodera – dekodowanie impulsów i ich zliczanie –

pozwoiliło na odczyt położenia kąowego wału z rejestru karty. Takie przeniesienie najczęściej wykonywanych, standardowych operacji na warstwę sprzętową umożliwiło realizowanie zaawansowanych algorytmów sterowania, jako zadań systemu czasu rzeczywistego, systemem łożysk magnetycznych.



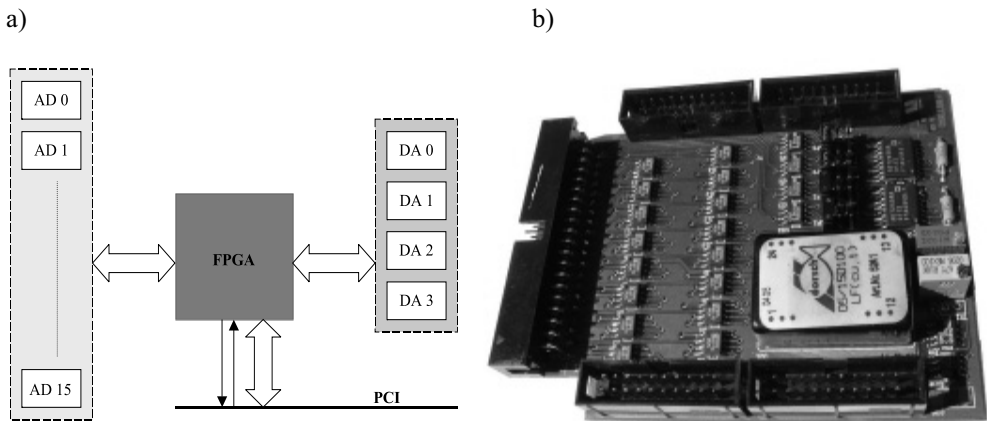
Rys. 3. Konfiguracja układu XILINX

Główną zaletą kart RTDAC4 była magistrala PCI. Jej zastosowanie pozwoliło na zwiększenie przepustowości kanału wymiany danych pomiędzy warstwą sprzętową a programową. Kolejna generacja kart z serii RTDAC posiada układ firmy XILINX o większej pojemności. Zastosowano również lepszej klasy przetworniki A/C. W celu podłączenia systemu magnetycznej lewitacji opracowano logikę zawierającą dwa generatory sygnału PWM oraz 16 multipleksowanych wejść analogowych [7].

4.2. Logika karty FastDAC

Prowadzone prace badawcze nad systemami magnetycznej lewitacji oraz budowa nowego stanowiska badawczego [18] były motywacją do zrealizowania kolejnego elementu systemu kontrolno-pomiarowego. W wyniku zdobytych doświadczeń zaprojektowana została karta kontrolno-pomiarowa dedykowana do wielokanałowej i równoległej akwizycji danych.

Na karcie zastosowano 16 szeregowych 12-bitowych przetworników analogowo-cyfrowych oraz dwa podwójne szeregowe 12-bitowe przetworniki cyfrowo-analogowe. Zalecane zastosowanie przetworników szeregowych jest minimalizacja połączeń. Ze względu na zastosowanie układu FPGA transmisja szeregową została zrealizowana z maksymalną częstotliwością ograniczoną jedynie poprzez częstotliwość zegara układu FPGA (40 MHz) i parametry uzależnień czasowych sygnałów przetworników. Modułową strukturę karty FastDaq przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Modułowa struktura karty FastDaq:
a) schemat blokowy; b) moduł przetworników

Uzyskana wydajność pomiarowa rekompensuje wyższe nakłady finansowe, jakie zostały poniesione w związku z zastosowaniem 16 przetworników A/C. Z punktu widzenia układu sterowania dla systemów magnetycznej lewitacji przeprowadzenie pomiaru w tej samej chwili pozwala precyzyjnie określić aktualną dynamikę obiektu. Brak opóźnień i związanej z tym programowej korekty lub też uwzględniania w torze sprzężenia zwrotnego sprawia, że zaoszczędzona moc obliczeniowa może zostać spożytkowana na rzecz zaawansowanego algorytmu sterowania.

Mając na uwadze wpływ poszczególnych rozwiązań na działanie algorytmu sterowania, można powiedzieć, że karta FastDaq jest specjalizowanym urządzeniem do zastosowań w sterowaniu cyfrowym nie tylko układami MagLev, które są szczególnie wymagające, ale i innymi, w których punktualność oraz czas wykonania zadań pomiarowych i sterowania są bardzo istotne.

W tabeli 1 zestawiono informacje o zrealizowanych konfiguracjach sprzętowych kart kontrolno-pomiarowych bazujących na układach FPGA i wykorzystanych do sterowania systemami MagLev.

Tabela 1
Informacje o zrealizowanych konfiguracjach sprzętowych
kart kontrolno-pomiarowych

Karta Właściwość	RTDAC3	RTDAC4/ML2	RTDAC/ML1	FastDAC
Obsługa przetworników A/C	12 z MUX	16 z MUX	2 z MUX	16
Obsługa przetworników C/A	0	4	1	4
Generowanie sygnału PWM	9	2	1	0
Typ układu FPGA	XCS30	XC2S150	XC2S150	XC2S150
Implementacja regulatora PID	NIE	NIE	TAK	NIE
Sterowanie przetwornikami	Programowe/ ISA	Programowe/ PCI	Sprzętowe	Sprzętowe

5. Regulator PID zbudowany w logice układu FPGA

Kolejnym etapem wykorzystywania technologii FPGA do sterowania układami Mag-Lev jest umieszczenie struktury regulatora bezpośrednio w logice układu. Zapewnia to osiągnięcie wysokiej częstotliwości sterowania, wysokiej punktualności oraz wysokiej pewności działania sterownika. Układy magnetycznych zawieszonych można uznać za obiekty krytyczne czasowo w rozumieniu definicji przedstawionej w pracach P. Piątka [13, 17]. Oznacza to, że sterowanie nimi za pomocą klasycznych technologii wykorzystujących układy mikroprocesorowe jest utrudnione lub w niektórych przypadkach niemożliwe. Umieszczenie algorytmu regulatora w logice układu FPGA pozwala na znaczne skrócenie czasu wyliczenia sterowania. Dzięki temu można zwiększyć częstotliwość sterowania lub poprawić właściwości czasowe układu sterowania. W tym drugim przypadku skraca się czas wykonywania obliczeń przy zachowaniu tego samego okresu sterowania. W wyniku tego zabiegu można uzyskać lepsze spełnienie zasady przyczynowości w układzie sterowania [16, 17].

Można wyodrębnić dwa podstawowe sposoby realizacji algorytmu regulatora w postaci logiki układu FPGA:

- 1) stworzenie struktury mikroprocesorowej umieszczonej w logice FPGA (tzw. „soft-processor”), a następnie umieszczenie algorytmu regulatora w programie tegoż mikroprocesora;
- 2) stworzenie struktury odzwierciedlającej algorytm regulatora bezpośrednio w strukturze układu, np. poprzez zakodowanie algorytmu w jednym języku opisu sprzętu.

Pierwszy sposób nie będzie tutaj opisywany, ponieważ nie różni się zbytnio od regulatorów realizowanych w klasycznych systemach mikroprocesorowych. Interesujący z punktu widzenia sterowania, jak i samej realizacji jest drugi sposób. W tym wypadku algorytm jest reprezentowany przez logiczny układ kombinacyjny lub sekwencyjny.

Najważniejsze zalety tego typu realizacji wymieniono poniżej.

- Możliwość równoległego realizowania obliczeń. Dzięki temu można znacznie przyspieszyć wyliczanie algorytmu. Wykonywanie zadań jest w tym wypadku całkowicie równoległe, a nie, jak w wielu mikroprocesorowych systemach czasu rzeczywistego, quasi-równoległe.
- Zwiększenie punktualności zadania czasu rzeczywistego. W przypadku obiektów krytycznych czasowo może to prowadzić do poprawy jakości sterowania.
- Zwiększeniem pewności działania systemu sterowania.
- Możliwość integracji w jednym układzie scalonym większości lub nawet całości funkcjonalności systemu sterowania. Dzięki układom FPGA o bardzo dużych pojemnościach można integrować w jednym układzie scalonym różne funkcje, np. algorytm regulatora bezpośredniego, algorytmy optymalizacji (wykonywane za pomocą „soft-procesora”), komunikację z innymi systemami, sterowanie układami wykonawczymi i czujnikami.
- Możliwość łatwej zmiany konfiguracji systemu sterowania. Dzięki rekonfiguracji całego układu można również zmienić szerokości słów obliczeniowych, co nie jest możliwe w klasycznych systemach mikroprocesorowych.

Oprócz zalet należy również wymienić wady tego typu systemów sterowania. Najważniejsze z nich to:

- utrudnione lub niemożliwe wykorzystanie zmiennoprzecinkowych formatów danych,
- konieczność stosowania odpowiednich technik projektowych [17],
- duża pracochłonność tworzenia projektów dla układów FPGA,
- utrudnione testowanie aplikacji.

Układy magnetycznych zwiesznień są zwykle wydajniejsze i szybsze od stosowanych powszechnie systemów sterowania. Zastosowanie do sterowania tego typu obiektami systemów sterowania wykorzystujących technologię FPGA jest więc uzasadnione. Dzięki temu można uzyskać poprawę jakości sterowania. Potwierdziły to np. eksperymenty przeprowadzone podczas realizacji pracy doktorskiej [27].

6. Wnioski

Prowadzone badania w Katedrze Automatyki AGH pokazują, że w przypadku sterowania systemami wykorzystującymi zjawisko magnetycznej lewitacji wymagana jest wysoka jakość przetwarzania sygnałów oraz równoległe i maksymalnie szybkie wyznaczanie wartości sygnałów sterujących. Dedykowane architektury kontrolno-pomiarowe umożli-

wiają prowadzenie badań identyfikacji i sterowania z wykorzystaniem konfigurowalnego środowiska MATLAB/Simulink. Opracowane modele służą do opracowania algorytmu sterowania, który to jest testowany w środowisku czasu rzeczywistego. Implementacja wybranych konfiguracji regulatora w układzie FPGA pozwoliła na zrealizowanie wbudowanego sterownika sprzętowego. Prowadzone badania potwierdzają słuszność zastosowania technologii FPGA do sterowania systemami MagLev. W najbliższych planach badawczych jest budowa dedykowanego sterownika dla systemów MagLev opartego na programowalnych układach przetwarzania sygnałów.

Literatura

- [1] Bania P., *Model i sterowanie magnetyczną lewitacją*. AGH, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki, Kraków, 1999 (praca magisterska, opiekun W. Grega).
- [2] Bloch G., Lairi M., Millierieux G., *Real Time Feedforward Neural Control of a MagLev System*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [3] Fang Z., Carletta J.E., Veillette R.J., *A Methodology for FPGA-Based Control Implementation*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, No. 6, 2005, 977–987.
- [4] Grega W., Piłat A., *A Comparison of Nonlinear Controllers for Magnetic Levitation System*. 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando (Florida, USA), 22–25 July 2001.
- [5] Hajjaji A.E., Ouladsine M., *Real-Time Implementation of Fuzzy and Neural Controllers for Magnetic Levitation System*. Proceedings of the Mediterranean Conference on Electronics and Automatic Control, Marrakech (Maroc), 17–19 September 1998, 854–859.
- [6] InTeCo, RTDAC3 boards, User's guide, Kraków 2001.
- [7] InTeCo, RTDAC4 boards, User's guide, Kraków 2004.
- [8] Kalisz J. i inni, *Język VHDL w praktyce*. Warszawa, Wydawnictwa Łączności i Komunikacji 2002.
- [9] Kołek K., Turnau A., *FPGA as a Part of MS Windows Control Environment*. Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology, XXII Autumn Meeting of Polish Information Processing Society, Wis?a, vol. 1, 2006, 411–416.
- [10] Madejski M., *Regulacja adaptacyjna dla układu magnetycznej lewitacji*. Kraków, AGH, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki, 2001 (praca magisterska, opiekun W. Grega).
- [11] Oliveira V.A., Costa E.F., Vargas J.B., *Digital Implementation of a Magnetic Suspension Control System for Laboratory Experiments*. IEEE Transactions on Education, vol. 42, No. 4, 1999, 315–322.
- [12] Piątek P., *Implementacja algorytmów sterowania w technologii FPGA*. Seminarium „Przetwarzanie i analiza sygnałów w systemach wizji i sterowania”, Słok 14–15 czerwca 2002.
- [13] Piątek P., *Sterowanie magnetycznym zawieszeniem z wykorzystaniem szybkich sterowników opartych na technologii FPGA*. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa 27–30 czerwca 2005, tom II, 111–116.
- [14] Piątek P., *Badanie własności czasowych systemu sterowania magnetycznym zawieszeniem przy pomocy układu FPGA*. IV Krajowa konferencja „Metody i systemy komputerowe w badaniach naukowych i projektowaniu inżynierskim”, Kraków 2003, 433–436.
- [15] Piątek P., *Budowa karty szybkiego prototypowania dla komputera IBM PC*. Kraków, AGH, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki, 2000 (praca magisterska, opiekun K. Kołek).
- [16] Piątek P., Grega W., *A speed classification method for real-time controlled dynamic systems*. International Workshop on Real Time Software, Wisła październik 2007, 677–684.

- [17] Piątek P., *Wykorzystanie specjalizowanych architektur sprzętowych do realizacji krytycznych czasowo zadań sterowania*. Kraków, AGH, Katedra Automatyki, 2007 (praca doktorska, promotor W. Grega).
- [18] Piłat A., Grega W., *Reconfigurable test-rig for AMB control*. 7th Conference on Active Noise and Vibration Control Methods, Wigry (Poland) 8–12 June 2005.
- [19] Piłat A., *Magnetyczna lewitacja – opis systemu*. Kraków, AGH, Katedra Automatyki, 1999.
- [20] Piłat A., Piątek P., *Wpływ parametrów sterownika PWM na jakość sterowania magnetyczną lewitacją*. XIV krajowa konferencja automatyki, Zielona Góra 24–27 czerwca 2002, 1105–1108.
- [21] Piłat A., *Sterowanie układami magnetycznej lewitacji*. Kraków, AGH, Katedra Automatyki, 2002 (rozprawa doktorska, promotor W. Grega).
- [22] Piłat A., Turnau A., *Self-organizing fuzzy controller for magnetic levitation system*. Computer Methods and Systems, Cracow (Poland) 14–16 November 2005.
- [23] Shields J., *Modeling foreign architectures with VHPI*. Proceedings of VHDL International Users Forum Fall Workshop, 2000, Orlando (Florida, USA) 18–20 October 2000, 100–107.
- [24] Vásárhelyi J., Imecs M., Szabó C., Incze I., *Modelling Vector Control System Reconfiguration*. International Carpatian Control Conference ICCS 2004, Zakopane 25–28 May 2004.

