

Bogdan FABIAŃSKI*

STEROWNIK DRUKARKI TRÓJWYMIAROWEJ Z OBSŁUGĄ NOWYCH TECHNOLOGII

W artykule zaprezentowano projekt nowego sterownika drukarki trójwymiarowej powstały na bazie doświadczeń w dotychczasowej eksploatacji urządzeń przeznaczonych na rynek masowy. Wprowadzono w technologię druku przestrzennego oraz zarysowano jego historię. W tym kontekście zaproponowano rozwiązania poprawiające stabilność działania oraz funkcjonalność w stosunku do pierwotnej konstrukcji opartej na osiągnięciach w dziedzinie otwartego oprogramowania. Zwiększono kontrolę nad procesem druku poprzez zastosowanie sprzężeń zwrotnych umożliwiających detekcję błędów ruchu. Dzięki równoległej obsłudze do siedmiu napędów z silnikami krokowymi możliwe stało się zastosowanie wielokolorowej głowicy i dalszy postęp technologiczny. Nowy projekt oraz dedykowany program sterownika opartego na nowoczesnym i wydajnym układzie STM32F4 stanowi znaczny wkład w nową gałąź rozwoju druku trójwymiarowego w dziedzinie otwartego oprogramowania. Zastosowanie wielu interfejsów komunikacyjnych ułatwiło obsługę z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi oraz torów dostępu – w tym bezprzewodowej WiFi. Dodatkowo, dostęp do magistral stosowanych w masowej produkcji otwiera nowe możliwości integracji z automatyką przemysłową. Opisy implementacji funkcjonalnych zweryfikowano oraz uzupełniono badaniami laboratoryjnymi.

SŁOWA KLUCZOWE: druk 3D, system wbudowany, układ sterowania, projekt RepRap

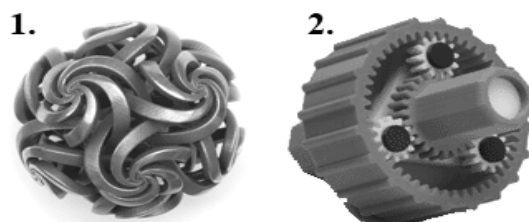
1. WPROWADZENIE

Idea druku przestrzennego (trójwymiarowego) rozumianego jako proces tworzenia obiektów rzeczywistych o dowolnym kształcie na bazie modelu komputerowego nie jest nowa. Technologia została opracowana już w 1980 roku prowadząc do powstania pierwszej działającej konstrukcji w 1984 roku w firmie 3D Systems [1].

Istnieje kilka metod druku przestrzennego. Do bardziej popularnych należą: FDM – ang.: *Fused Deposition Modeling* oraz DMLS – ang.: *Direct Metal Laser Sintering*. Odpowiednie przykłady wydruków zaprezentowano na rysunku 1.

Pierwsza metoda (FDM) bazuje na ekstrakcji uplastycznionego materiału za pomocą ruchomej dyszy punkt do punktu, warstwa po warstwie realizując zadaną geometrię modelu obiektu przestrzennego.

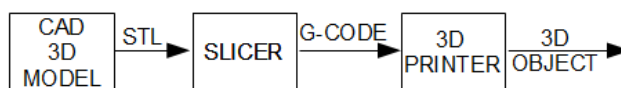
* Politechnika Poznańska.



Rys. 1. Przykładowe wydruki przestrzenne: 1- w technologii DMLS; 2- w technologii FDM

Technologia FDM wymagająca użycia dyszy limituje zastosowanie materiałów o wysokich temperaturach topnienia (np. metali), ale powszechnie stosuje się różnego rodzaju tworzywa sztuczne oraz kompozyty. W DMLS ruchomą dyszę zastąpiono sterowaną wiązką lasera kierowaną na sproszkowany surowiec prowadząc do jego zespolenia. Odpowiednia trajektoria wiązki w połączeniu z nanoszeniem kolejnych warstw proszku daje w wyniku pożądaną wydruk obiektu.

Wraz z otwarciem technologii (wygaśnięcie patentów międzynarodowych) powstała idea powszechnych, samoreplikujących się maszyn, której wyrazem są właśnie drukarki trójwymiarowe. Wokół tej idei rozpoczęto prace nad projektem *RepRap* (skrót od ang.: **REPLICating RAPid prototyper**) [2]. Podstawą *RepRap* jest otwartość bazująca na publicznej licencji GNU (ang.: **General Public License**). Stosunkowo niskie koszty użycia technologii FDM (także FFF od ang.: **Fused Filament Fabrication**) wpisały się w domenę projektu. *RepRap* to nie tylko otwarte oprogramowanie, ale także otwartość dokumentacji konstrukcyjnej podzespołów, modeli elementów możliwych do powielenia czy projektów kompletnych drukarek. Opis podstaw teorii druku 3D można znaleźć w [3] (w kontekście *biodruku*).



Rys. 2. Ścieżka projektowa modelu obiektu 3D z wykorzystaniem systemów CAD/CAM

W procesie generowania trajektorii głowicy drukarki używa się kodów maszynowych języka G (ang.: *G-Code*) znanych ze stosowania w obrabiarkach numerycznych. Proces generowania tego kodu został zautomatyzowany wpisując się w domenę szybkiego prototypowania. W łańcuchu czynności koniecznych do uzyskania zadanego wydruku następują po sobie (rysunek 2): zaprojektowanie obiektu przestrzennego za pomocą dowolnego programu CAD do edycji 3D umożliwiającego zapis w formacie STL (format pliku stworzony przez 3D Systems na potrzeby drukowania przestrzennego metodą stereolitografii [4]). Dalej stosuje się program (ogólnie z ang.: *Slicer*) do wygenerowania poszczególnych warstw modelu do druku FDM oraz wynikowego kodu maszynowego do bezpośredniego użycia w drukarkach przestrzennych. Autorski projekt oprogramowania

realizującego zadanie przetwarzania modelu 3D na potrzeby druku przestrzennego zaprezentowano w pracach [5] oraz [6].

2. OPIS KONSTRUKCJI

2.1. Sterownik referencyjny

Realizując jedno z podstawowych założeń ruchu *RepRap* co do powszechnego dostępu do elementów składowych drukarki projekty konstrukcji układu sterującego bazują na stosunkowo tanich płytach rozwojowych [7]. W modelu referencyjnym zastosowano popularną płytę bazową Arduino z 8-bitowym mikrokontrolerem z rodziny ATmega oraz nakładkę *Pololu* [8]. Podstawowe i konieczne zadania realizowane w sterowniku można podzielić na następujące kategorie: sterowanie napędami, regulacja temperatury, detekcja położenia zerowego głowicy drukującej, deskrypcja kodu maszynowego, obsługa pamięci masowej z instrukcjami kodu maszynowego lub interfejs do specjalizowanego programu hosta. Sterownik referencyjny charakteryzuje się istotnymi wadami oraz ograniczeniami funkcjonalnymi, które doprowadziły do powstania idei projektu autorskiego sterownika drukarki 3D stanowiącego istotny wkład w rozwój technologii masowego druku przestrzennego.

Stosunkowo niewielka powierzchnia obudowy układu A4988 [9] w praktyce prowadzi do znacznego nagrzewania się struktury półprzewodnikowej oraz okresowego wyłączania bez zapewnienia intensywnego chłodzenia aktywnego w połączeniu z wydającym radiator. W omawianym układzie istnieje konieczność manualnego ustawiania wartości skutecznej prądu/momentu, a ponadto brakuje informacji zwrotnej o procesie ruchu silnika. Czujniki temperatury w postaci termistorów NTC posiadają znaczną nieliniowość charakterystyki $R(T)$ wymagając tym samym algorytmów jej korekcji.

Interfejs USB z pośrednictwem układu FTDI ogranicza potencjalne pasmo standardu USB do możliwości UART mikrokontrolera oraz maksymalnej przepustowości samego FTDI 1[Mbps].

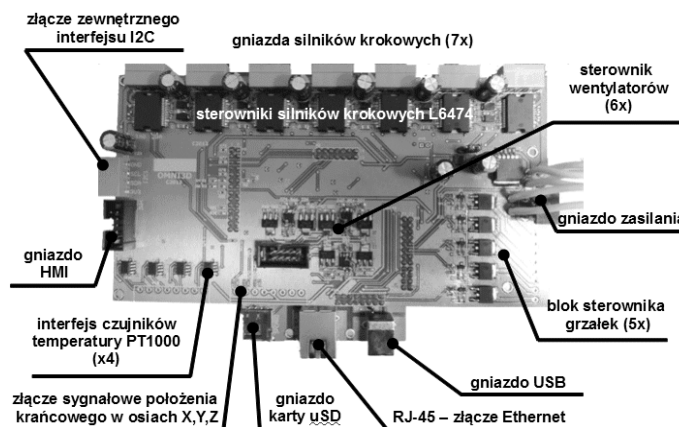
Jednostka centralna oparta na architekturze 8-bit oraz maksymalnej częstotliwości pracy na poziomie 16 [MHz] (16 [MIPS]) [10] ogranicza maksymalne prędkości pracy urządzenia oraz dalszą komplikację algorytmów sterowania (większość zakłada operacje na 32 bitowych typach zmiennych).

2.2. Nowy sterownik drukarki

Celem nadrzędnym nowego projektu była eliminacja wymienionych ograniczeń sterownika referencyjnego poprzez:

- zastosowanie znacznie wydajniejszego mikrokontrolera z rodziny STM32F4 [11] z maksymalną mocą obliczeniową na poziomie 210 [MIPS] oraz sprzętową jednostką obliczeń zmiennoprzecinkowych,
- użycie sterowników L6474 z mniejszą rezystancją przewodzenia $R_{DS(On)}$ tranzystorów stopnia wyjściowego (180/370 [mOhm] wobec 320 [mOhm] w sterowniku A4988), niższą rezystancją cieplną (12 [K/W] wobec 32[K/W]), większą wartością skuteczną ciągłego prądu fazy (3 [A] do 2 [A]), interfejsem SPI z możliwością konfiguracji amplitudy prądu oraz sygnałem sprzężenia zwrotnego od wykrytych błędów [12],
- zastosowanie czujników temperatury na bazie PT1000 zachowujących liniowość charakterystyki $R(T)$,
- realizację interfejsu pamięci masowej w oparciu o SDIO (natywny int. kart SD),
- implementację wbudowanego interfejsu USB w wersji FS z wykorzystaniem klasy urządzeń CDC współpracującej bezpośrednio z MS Windows.

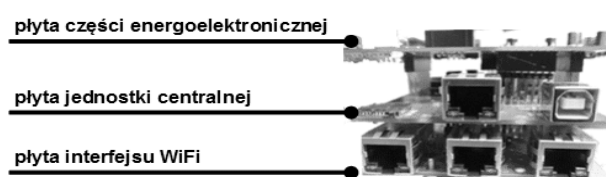
Jak przedstawiono na rysunkach 3 i 4, sterownik składa się z trzech rozdzielnych płyt: energoelektronicznej, mikroprocesorowej oraz opcjonalnej płyty komunikacji bezprzewodowej WiFi wykorzystującej moduł WizFi630. Moduł ten został wybrany ze względu na obsługę interfejsu IEEE802.11b/g/n zapewniając pełną przepustowość magistrali oraz możliwość komunikacji za pośrednictwem przewodów Ethernet. Płyta mocy przedstawiona na rysunku 3 zapewnia konieczne interfejsy do sterowania drukarką wykraczając znacznie poza możliwości sterownika referencyjnego.



Rys. 3. Opis sterownika – widok z góry

Sterownik grzałki oparto o tranzystor mocy AP9962 (40[V]/32[A]) w kompaktowej obudowie DPAK z pośrednim stopniem mocy złożonym z komplementarnych tranzystorów MOSFET.

Płynne sterowanie wentylatorami dla sygnału wejściowego typu MSI zapewniono poprzez aktywny filtr dolnoprzepustowy 1-szego rzędu (RC w konfiguracji ze wzmacniaczem operacyjnym) oraz buforze opartym o parę komplementarną tranzystorów bipolarnych BCP55 oraz BCP52 w obudowie SOT223 (moc maksymalna ok. 5[W] przy standardowych wymaganiach 1 [W]).



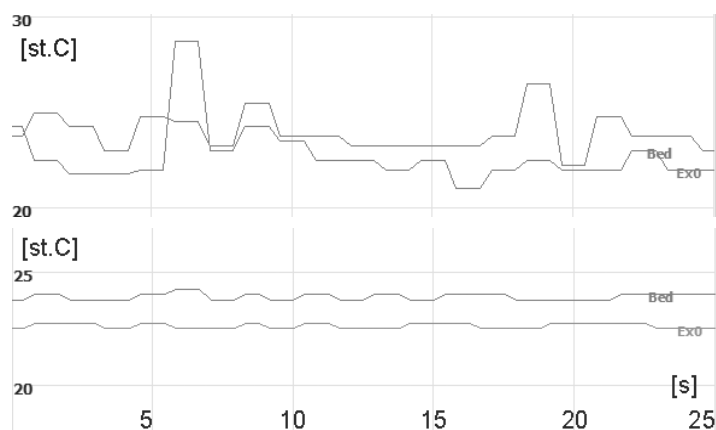
Rys. 4. Opis sterownika – widok od frontu

Obwód pomiarowy czujnika temperatury PT1000 oparto o podwójny wzmacniacz operacyjny, w którym jeden pracuje w konfiguracji źródła prądowego (o wydajności 1,3 [mA]), a drugi jako wzmacniacz różnicowy o jednokrotnym wzmacnieniu.

3. BADANIA

3.1. Przetworniki temperatury

Wyzwaniem dla analogowych torów pomiarowych w sterowniku jest prowadzenie przewodów transmisji tych sygnałów współbieżnie z przewodami mocy zasilającymi silniki oraz poszczególne grzałki (prąd grzałek to niemal prostokątny przebieg o poziomach 0-12 [A]).

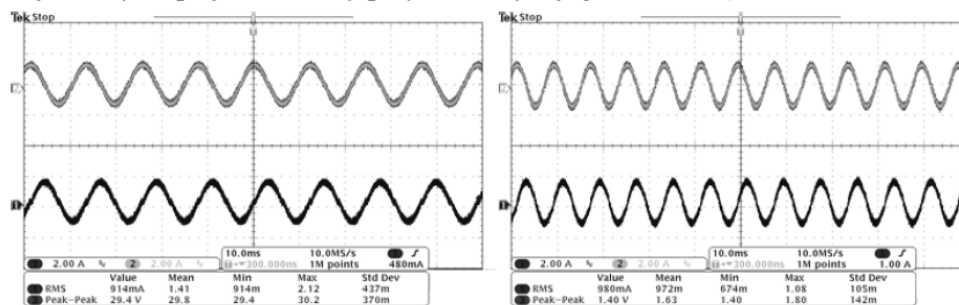


Rys. 5. Rejestracja wartości temperatury stołu (*Bed*) oraz głowicy (*Ex0*); efekt bez filtracji – przebieg górny; efekt z filtracją na bazie mediany – wykres dolny

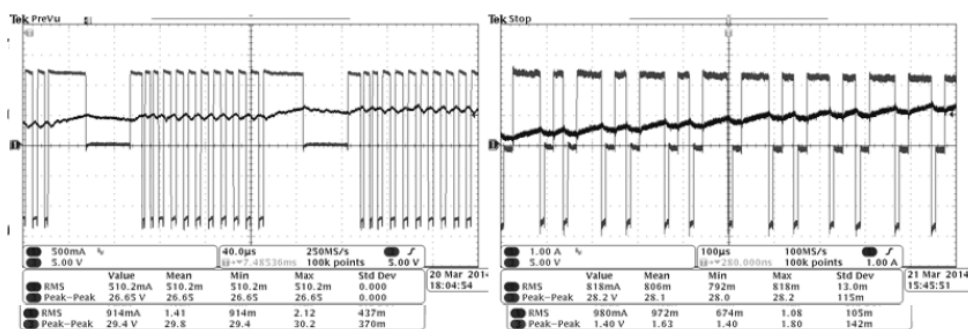
Wartości wynikające z bezpośrednich pomiarów przetworników analogowo-cyfrowych poddano więc filtracji z zastosowaniem różnych algorytmów. Efekty implementacji przedstawiono na rysunku 5, na którym widnieją przebiegi rejestracji temperatury bez jakiegokolwiek filtracji oraz z filtrem opartym na algorytmie medianowym. Filtr ten polega na zgromadzeniu w pamięci liczby M kolejnych próbek, uszeregowaniu ich od najmniejszej do największej, odrzuceniu N skrajnych wartości (największych i najmniejszych) oraz uśrednieniu pozostałej liczby $L = M - 2N$ próbek. Algorytm ten wykazuje znaczną odporność na chwilowe zakłócenia bez wrażliwości na ich wartości.

3.2. Napędy

Jak można zaobserwować na zestawionych przebiegach z rysunku 6 napędy charakteryzują się zbliżonymi przebiegami prądów fazowych przy trybie sterowania z mikro krokiem 1/16. Jednakże widoczne są także różnice w sposobie kluczowania obu jednostek (rysunek 7), co uzewnętrzniane jest różnicą w wydawanym dźwięku podczas pracy (subiektywnie dźwięk nowego sterownika zdaje się być lepiej tolerowany przy zbliżonym jego natężeniu).

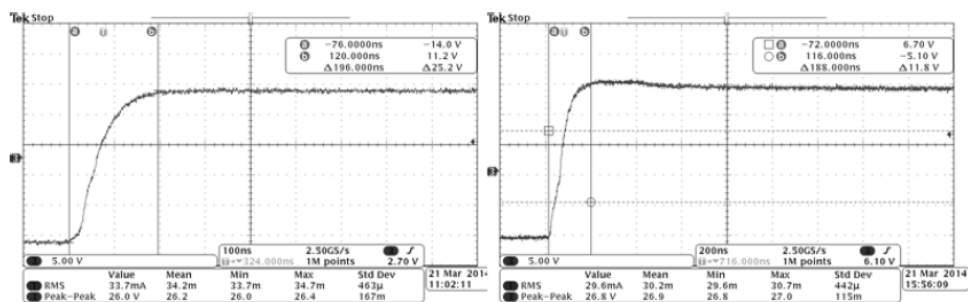


Rys. 6. Rejestracja przebiegów prądów fazowych; z lewej – dla nowego sterownika L6484; z prawej – referencyjnego A4988



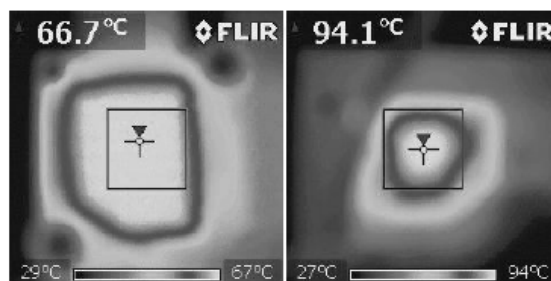
Rys. 7. Porównanie strategii kluczowania prądów fazowych; z lewej – dla nowego sterownika L6484; z prawej – referencyjnego A4988

Jak wynika z rysunku 8 także stromości zboczy napięciowych są porównywalne i zbliżone do parametrów katalogowych (180 [V/us]), chociaż nowy sterownik pozwala na zwiększenie stromości zboczy redukując straty łączeniowe kosztem zwiększonej emisji zakłóceń elektromagnetycznych.



Rys. 8. Stromości zboczy narastających napięć w kluczowanych fazach; z lewej – dla nowego sterownika L6484; z prawej – referencyjnego A4988

Na rysunku 9 przedstawiono reprezentacyjne zestawienie obrazów z kamery termowizyjnej, na których widoczne są porównywane sterowniki pracujące w identycznych punktach pracy. Sterownik L6474 osiąga temperaturę o 30% niższą niż konstrukcja A4988 zmniejszając tym samym ryzyko przegrzania struktury.



Rys. 9. Obraz z kamery termowizyjnej – temperatura powierzchni sterownika; z lewej – sterownik L6474; z prawej – A4988

4. PODSUMOWANIE

W artykule dokonano wprowadzenia w technologię druku przestrzennego w kontekście historycznym naświetlając główne przyczyny powstania projektu drukarek dla masowego odbiorcy *RepRap*. Wskazano na zasadnicze wady konstrukcyjne oraz funkcjonalne dominujących obecnie otwartych projektów sterowników bazujących na platformie *Arduino* oraz płycie *Pololu*. Konieczność poprawy funkcjonalności stosowanych konstrukcji w zakresie stabilności działania, łatwości obsługi oraz

nowych technologii druku (z wykorzystaniem 4 głowic drukujących) stała się motywacją do zaprojektowania nowego sterownika. Opisano nową konstrukcję wraz z jej modułami składowymi oraz poszczególnymi interfejsami. Zweryfikowano działanie nowej platformy wraz z jej kompatybilnością z hostem w oparciu o dedykowany program powstały na bazie wysokowydajnego kodu *TeaCup*. W ramach wstępnych badań dokonano zestawienia pracy napędów ze sterownikami L6474 oraz A4988 potwierdzając lepsze właściwości termiczne układu L6474.

LITERATURA

- [1] *3D printing*, http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing, Wikipedia, 2014.
- [2] Projekt *RepRap*, http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Project, 2013.
- [3] Anastasiou A., Tsirmpas C., Rompas A., Giokas K., Koutsouris D., *3D printing: Basic concepts mathematics and technologies*, IEEE 13th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE), p.1-4, 2013.
- [4] Brown A.C., de Beer D., *Development of a stereolithography (STL) slicing and G-code generation algorithm for an entry level 3-D printer*, p. 1-5, IEEE AFRICON conference, 2013.
- [5] Schmidt, R., Ratto, M., *Design-to-Fabricate: Maker Hardware Requires Maker Software*, IEEE Computer Graphics and Applications, v.33, i. 6, p.26-34, 2013.
- [6] Valero-Gomez A., Gonzalez-Gomez J., Almagro M., Salichs, M.A., *Boosting mechanical design with the C++ OOML and open source 3D printers*, Global Engineering Education Conference (EDUCON), p.1-7, 2012.
- [7] Kentzer J., Koch B. M., Jones R.W., Villumsen E., *An open source hardware-based mechatronics project: The replicating rapid 3-D printer*, 4th International Conference on Mechatronics (ICOM), p.1-8, 2011.
- [8] Projekt *Pololu*: http://reprap.org/wiki/Arduino_Mega_Pololu_Shield, 2012.
- [9] *A4988- Microstepping Driver*, nota katalogowa, nota katalogowa Allegro Mic., 2011.
- [10] *ATmega1280*, nota katalogowa, Atmel Corp., 2007.
- [11] *STM32F407XX*, nota katalogowa, STMicroelectronics Corp., 2013.
- [12] *L6474*, nota katalogowa, STMicroelectronics Corp., 2011.

NEW, DESKTOP 3D PRINTER CONTROL SYSTEM

The paper presents the design of a new three-dimensional printer control system developed on the basis of experience in the current operation of equipment for the desktop market. 3D printing technology basics and its history were introduced. Solutions that improved operational stability and functionality compared to the original design based on the achievements in the domain of open source software were proposed. Increased control over the printing process was described as the error feedback signal from motor drivers was utilized in the system. Thanks to the use up to seven stepper motor drives it was possible to use multi-colored head. The use of multiple communication interfaces - including WiFi - increased flexibility and usage of printer that could be accessed from compact devices - not only PCs - and from almost everywhere. Furthermore, the access to the bus used in the mass production systems opens up new possibilities for integration with industrial automation.