

doi:10.15199/48.2021.02.21

## Zastosowanie układów programowalnych do cyfrowego sterowania modelami obiektów

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zbudowane w Katedrze Automatyki Okrętowej Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, do badań naukowych i dydaktyki, modele rzeczywistych obiektów, tj. model pojazdu, model elektrowni okrętowej oraz grawerkę laserową. Urządzenia te są sterowane przy pomocy algorytmów zaimplementowanych w strukturach układów programowalnych FPGA oraz CPLD.

**Abstract.** Nowadays, while conducting scientific, research, development and design works, various tools are most often used to test and implement new systems and devices. Thanks to this work it is possible to create new solutions and test them. New devices and systems have completely taken over almost every area of the modern world, i.e. industry, communication, medicine, and household. Programmable Logic Devices (PLD) are very often used in these works, especially Field Programmable Gate Array (FPGA) and Complex Programmable Logic Devices (CPLD). Most of the electronic integrated circuits currently being created during prototype construction are implemented in FPGA circuit structures. Programmable systems are also used to digitally control various objects. The article presents models of real objects constructed at the Department of Ship Automation of the Gdynia Maritime University for scientific research and teaching, i.e. vehicle model, ship power plant model and laser engraving machine. These devices are controlled using algorithms implemented in the structures of programmable FPGA and CPLD systems. (**Application of programmable systems for digital control of object models**).

**Słowa kluczowe:** technika cyfrowa, elektronika, układy programowalne, język programowania sprzętu VHDL, cyfrowe sterowanie.

**Keywords:** digital technology, electronics, programmable devices, VHDL programming language, digital control, simulations.

### Wstęp

Współcześnie podczas prowadzenia prac naukowych, badawczo – rozwojowych oraz projektowych najczęściej korzysta się z różnych narzędzi umożliwiających testowanie i implementację nowych systemów i urządzeń. Dzięki tym pracom możliwe jest tworzenie nowych rozwiązań oraz ich testowanie. Nowe urządzenia oraz systemy zawiadujące wiele dziedzin współczesnego świata, przykładowo przemysł, komunikację, medycynę, gospodarstwa domowe. W tych branżach bardzo często są wykorzystywane układy programowalne PLD (Programmable Logic Devices), a szczególnie układy FPGA (Field Programmable Gate Array) oraz CPLD (Complex Programmable Logic Devices). Duża ilość obecnie tworzonych elektronicznych układów scalonych podczas budowy prototypów jest implementowana w strukturach układów FPGA. Układy programowalne są często wykorzystywane do cyfrowego sterowania różnymi obiektami.

Technika cyfrowa (TC) jest jednym z istotnych przedmiotów w programie nauczania przyszłych inżynierów elektroników i elektryków. Dużą rolę w poznaniu zagadnień z zakresu TC spełniają zajęcia laboratoryjne, które wymagają zapewnienia specjalistycznego sprzętu. Nauczanie TC nie jest łatwe, co spowodowane jest powiązaniem z różnymi dziedzinami, np. elektroniką, cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Ze względu na często występujące problemy w nauczaniu TC niezbędne jest stosowanie środowiska, do którego student może uzyskać dostęp, ponosząc niewielkie lub zerowe koszty. Takie warunki spełnia środowisko Quartus, które w wersji edukacyjnej umożliwia poznanie zasad cyfrowego sterowania z wykorzystaniem układów programowalnych. W Katedrze Automatyki Okrętowej (KAO) Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (UMG) do prac naukowo-badawczych oraz dydaktyki są wykorzystywane modele sterowane cyfrowo. Algorytmy sterowania zostały opracowane w języku programowania sprzętu VHDL, zarówno w edytorze tekstowym i graficznym. Część modeli została zbudowana w KAO samodzielnie, np. model robota kroczącego, model wielozadaniowego pojazdu, model sejfu, model centrali wentylacyjnej, sterowanego domu, wciągarki okrętowej, przenośnika taśmowego, model sterownika diod LED RGB mocy [1 - 6]. Zostały również wykorzystane modele w postaci zabawek, przykładowo model koparki, dźwigu, sztaplarki, autonomicznego robota – Robowisdom, radiowo

sterowanego auta, które zostały odpowiednio przystosowane na potrzeby badań i dydaktyki [1 - 8]. Jako zestawy uruchomieniowe są wykorzystywane platformy DE2-115 oraz zestawy opracowane i wykonane w KAO.

W artykule przedstawiono, zbudowane w KAO do badań naukowych i dydaktyki, modele rzeczywistych obiektów, tj. model pojazdu, model elektrowni okrętowej oraz grawerkę laserową. Urządzenia te są sterowane przy pomocy opracowanych algorytmów zaimplementowanych w strukturach układów programowalnych FPGA oraz CPLD firmy Altera/Intel.

### Model auta

Główną konstrukcją pojazdu (rys. 1) zbudowanego w KAO stanowi platforma nośna wycięta na obrabiarce laserowej z poliwęglanu. Pojazd został wyposażony w cztery koła jezdne (o średnicy 55 mm) napędzane czterema silnikami elektrycznymi, każdy o znamionowym napięciu 6 V DC, przy czym każde koło jest napędzane osobnym silnikiem. Koła jezdne zostały zintegrowane z przekładnią kątową 90 stopni. Silniki są zasilane parami w konfiguracji: osobno strona lewa i osobno strona prawa. Zbudowany pojazd porusza się w czterech kierunkach: lewo, prawo, przód, tył. Natomiast skręty pojazdu zostały zrealizowane na zasadzie odwzorowania pracy czołgu. Taki sposób wykonywania manewrów zapewnił bardzo mały promień skrętu i dużą zwrotność pojazdu. Pojazd jest sterowany za pomocą przełączników umieszczonych na platformie uruchomieniowej DE2-115. W skład pojazdu wchodzi również układy elektroniczne odpowiadające za sterowanie oraz za komunikację. Zastosowano także platformy uruchomieniowe Arduino odpowiadające za komunikację z platformą DE2-115. Jako źródło zasilania pojazdu, elektroniki oraz systemu komunikacji wykorzystano sześć baterii AA o napięciu 1,5 V każda. W modelu zamontowano także nadajnik radiowy oraz ultradźwiękowy czujnik odległości HC-SR04 obsługiwany przez platformę Arduino UNO [9]. Czujnik odległości ostrzega o zbliżającej się przeszkodzie oraz w przypadku małej odległości od niej zatrzymuje pojazd. Jest to czujnik działający w zakresie od 2 do 200 cm. Model został ponadto wyposażony w sygnalizację świetlną i dźwiękową. Pojazd został skomunikowany z platformą uruchomieniową DE2-115, wyposażoną w układ FPGA z rodziny Cyclone, z wykorzystaniem systemu bezprzewodowej komunikacji radiowej. Komunikacja ta została zrealizowana

poprzez platformę Arduino UNO umieszczoną na pojeździe oraz platformę Arduino Leonardo, którą podłączono do wyjść cyfrowych platformy DE2-115. Platformy Arduino porozumiewają się pomiędzy sobą poprzez sygnały radiowe nadawane / odbierane przez dwa transceivery pracujące w paśmie ISM (Industrial, Scientific, Medical) na częstotliwości 2,4 GHz, przy czym wykorzystanie tego pasma nie wymaga licencji. Do Arduino UNO podłączono:

- ✓ do sygnałów wejściowych - zestaw nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver, służący do realizacji komunikacji radiowej między DE2-115 i pojazdem,
- ✓ do sygnałów wyjściowych mostek H realizujący zasilanie silników elektrycznych.

Natomiast do wyjść układu Arduino Leonardo podłączono zestaw nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver.

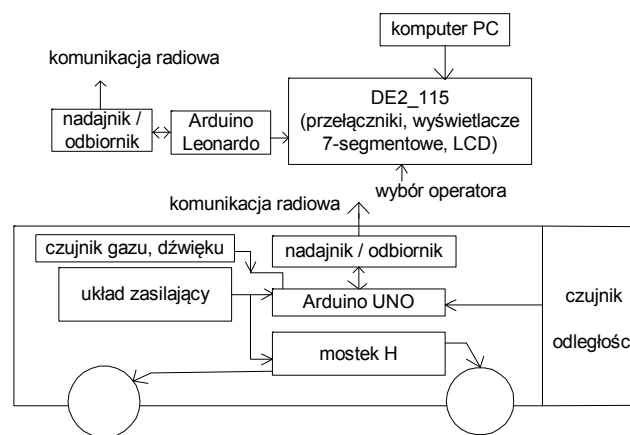


Rys. 1. Model pojazdu

Algorytm sterowania został zrealizowany z wykorzystaniem edytora tekstowego języka VHDL w środowisku Quartus oraz języka C. Dodatkowo w pojeździe zamontowano czujnik dźwięku, czujnik stężenia tlenu węgla oraz stężenia gazów palnych, których wartości są odczytywane i wysyłane za pośrednictwem sieci bezprzewodowej do specjalnie utworzonej aplikacji. Uaktywnianie czujników pomiarowych jest możliwe z poziomu stworzonej aplikacji, która współpracuje ze smartfonem. Interfejs został opracowany w środowisku internetowym Mit AppInventor 2 [12]. Środowisko to służy do projektowania i tworzenia aplikacji mobilnych dla urządzeń działających w systemie Android. Interfejs został

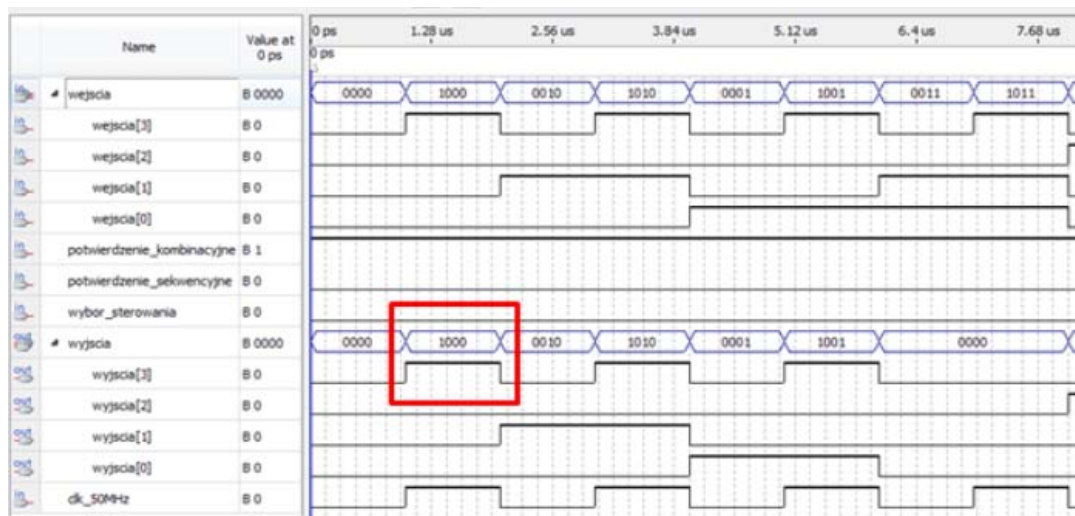
opracowany poprzez przeglądarkę internetową oraz aplikację, które wykorzystują środowisko Java. Można go testować we wbudowanym emulatorze lub zainstalować bezpośrednio na urządzeniu z systemem Android.

Głównym elementem systemu sterowania pojazdem jest układ FPGA, w którym zaimplementowano algorytm sterowania. Poprzez wejścia i wyjścia układu FPGA platforma DE2-115 realizuje sprzężenie zwrotne. Sygnały z wejścia DE2-115, przesyłane do sterownika radiowego, określają rodzaj ruchu pojazdu. Zależy on od bieżącego stanu pojazdu, wyboru trybu pracy (sterowanie ręczne lub automatyczne), stanu wejść *Stop*, *Reset*, *Potwierdzenie*. Do sygnalizacji stanów pojazdu wykorzystano elementy znajdujące się na płytce DE2-115, tj. wyświetlacz 7 segmentowy, wyświetlacz LCD. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania modelem pojazdu.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania modelem pojazdu

Dodatkowo na rysunku 3 zostały przedstawione przykładowe przebiegi czasowe, które potwierdzają prawidłową pracę zaimplementowanego algorytmu sterowania. Przykładowo dla stanu 1000 model pojazdu porusza się w lewo, wówczas też na wyjściu 3 pojawia się stan wysoki.



Rys. 3. Przykładowe przebiegi czasowe

Zastosowane do budowy pojazdu rozwiązania zapewniają duże możliwości rozbudowy, model jest w dalszym ciągu testowany i modyfikowany. Przeprowadzane są próby związane z wykorzystaniem czujników odległości pozwalających na wymuszenie optymalnej zmiany kierunku jazdy po wykryciu przeszkody, np. zatrzymanie pojazdu, obrót o określony kąt i kontynuacja jazdy. Przewiduje się także zastosowanie różnego rodzaju filtrów w celu poprawy skuteczności działania detektorów przeszkody oraz w celu eliminacji pojawiających się fałszywych sygnałów. Przeprowadzane są także prace związane z pominięciem platformy Arduino Leonardo współpracującej z zestawem DE2-115. Zestaw ten obsługuje komunikację radiową 2,4 GHz, możliwe jest więc bezpośrednio komunikowanie się tej platformy z układem na pojeździe. Przewiduje się także zbadanie innych urządzeń służących do bezprzewodowej transmisji danych, np. systemu IrDA. Przewiduje się również zainstalowanie czujników temperatury, wilgotności oraz ciśnienia powietrza, których wartości będą odczytywane i wysyłane za pośrednictwem sieci bezprzewodowej do utworzonej aplikacji. Pojazd można także rozbudować w zakresie układu jezdznego. Silniki elektryczne służące do napędzania kół można podłączyć w innych konfiguracjach. Propozycje rozbudowy modelu pojazdu są jednak ograniczone jego gabarytami, układem zasilania oraz względami ekonomicznymi.

### Model elektrowni okrętowej

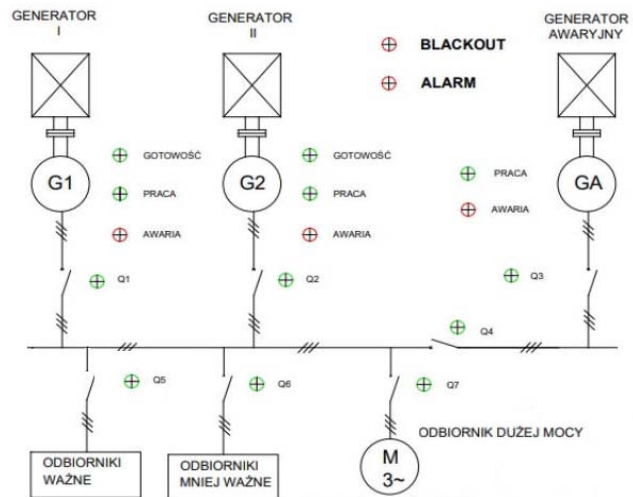
Elektrownia okrętowa jest elementem systemu elektroenergetycznego statku. Wytwarza ona energię elektryczną, którą następnie rozdziela na poszczególne elementy systemu. Główne wymagania stawiane elektrowni okrętowej to niezawodność. Ciągłość zasilania jest niezbędną do poprawnej pracy systemów okrętowych. W układach rzeczywistych wymagana jest pełna automatyzacja systemu elektroenergetycznego, co wpływa na bezpieczeństwo żeglugi, statku, załogi oraz ekonomiczność zasilania. Istotne jest także zabezpieczenie elektrowni przed błędną obsługą. Dlatego stosuje się odpowiednie zabezpieczenia i układy. System energetyczny projektuje się tak, aby obsługa statku w stanie normalnej pracy wykonywała jak najmniej prac łączeniowych. W elektrowni okrętowej automatyzuje się funkcje: rozruchu i zatrzymania zespołu prądowłórczego, synchronizacji prądnic, regulacji prędkości obrotowej i częstotliwości, optymalnego rozdziału mocy czynnej na pracujące zespoły prądowłórcze, regulacji napięcia z równoczesnym rozdziałem mocy biernej na zespoły, analizy stanu obciążenia i doboru liczby zespołów do pracy z uwzględnieniem możliwości automatycznego wyłączenia mniej ważnych odbiorników, załączania odbiorników dużej mocy, analizy sytuacji awaryjnej umożliwiającą szybką lokalizację uszkodzenia. Na statku powinny być co najmniej dwa zespoły prądowłórcze z niezależnym napędem, które muszą być zdolne do pracy we wszystkich warunkach eksploatacyjnych.

Symulator elektrowni okrętowej wykonano w obudowie metalowej z płytą główną z przezroczystej pleksi. Przejrzystość płyty czołowej, która zawiera schemat ideowy (rys. 4), pozwala na analizę poszczególnych etapów pracy elektrowni okrętowej. Na modelu zostały umieszczone diody sygnalizujące aktualny stan pracy generatora oraz sygnalizujące awarie. Przy wyłącznikach zainstalowano diody określające aktualne jego położenie. Umieszczono też diody sygnalizujące stan blackout'u. Wewnątrz modelu znajduje się również buzzer. Model zasilany jest napięciem 3,3V DC pochodzącym z platformy DE2-115.

Zbudowany model spełnia następujące założenia:

- ✓ dobrze odzwierciedla pracę rzeczywistej elektrowni okrętowej,

- ✓ makieta elektrowni przedstawia pracę 2 generatorów prądowłórczych, 1 generatora awaryjnego, zawiera odbiorniki ważne, mało ważne oraz 1 odbiornik dużej mocy. Model zawiera również diody sygnalizujące awarie oraz blackout, występuje sygnalizacja akustyczna blackout'u,
- ✓ istnieje możliwość zwiększania/zmniejszania obciążenia odbiornika dużej mocy,
- ✓ sterowanie modelem odbywa się poprzez algorytm zaimplementowany w układzie FPGA, model jest połączony za pomocą taśmy SATA z platformą DE2-115,
- ✓ występuje sygnalizacja aktualnego obciążenia elektrowni na wyświetlaczach 7-segmentowych oraz wyświetlaczu LCD platformy DE2-115.



Rys. 4. Widok płyty czołowej modelu elektrowni

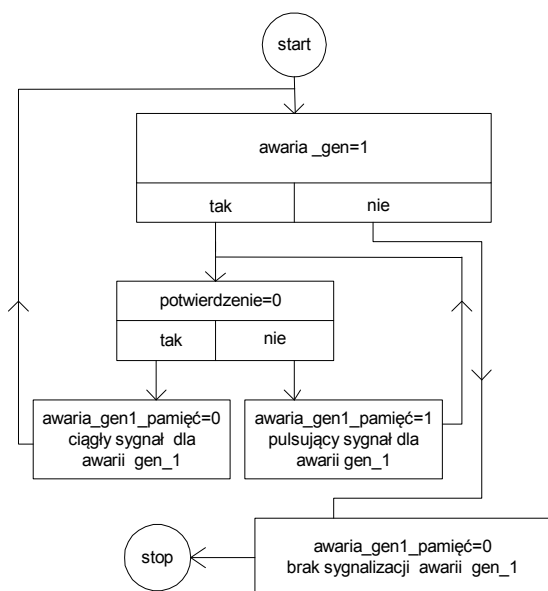
Do sterowania pracą modelu elektrowni okrętowej wykorzystano platformę DE2-115, język VHDL oraz edytor tekstowy środowiska Quartus. W projekcie wykorzystano 16 przełączników, 3 przyciski, 18 diod, wyświetlacze 7-segmentowe, LCD oraz złącze JP1. Za pomocą tego złącza połączono zestaw DE2-115 z modelem. W algorytmie sterowania wykorzystano:

- ✓ 20 sygnałów wejściowych,
- ✓ 28 sygnałów wyjściowych do obsługi wyświetlaczy 7-segmentowych,
- ✓ 8 sygnałów wyjściowych do obsługi wyświetlacza LCD,
- ✓ 34 sygnały wyjściowe do sygnalizacji stanów pracy układu na platformie DE2-115 i na modelu.

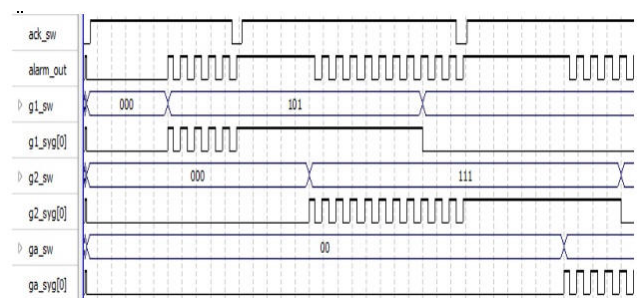
W przypadku wystąpienia jakiegokolwiek zakłócenia uruchamiany jest alarm, który sygnalizowany jest za pomocą migającej diody. Potwierdzenie awarii sygnalizowane jest ciągłym świeceniem diody, które trwa aż do usunięcia wszystkich występujących awarii. Gdy pojawia się nowy alarm należy go zawsze potwierdzić, dopiero wówczas możliwe jest wykonanie jakiegokolwiek operacji, np. uruchomienie generatora. Na rysunku 5 przedstawiono algorytm pracy układu wykrywającego awarię pojedynczego generatora. Na podobnej zasadzie następuje wykrycie awarii generatora 2, generatora awaryjnego oraz alarmu zbiorczego. Uzyskane przykładowe przebiegi czasowe (rys. 6) pozwalają na potwierdzenie prawidłowego działania elektrowni okrętowej.

Podczas pracy w trybie manualnym operator decyduje o tym, jakie generatory zostaną załączone do szyny głównej. Decyduje również o załączeniu wyłącznika sekcyjnego. Układ posiada następujące zabezpieczenia:

- ✓ nie można załączyć wyłącznika generatora, gdy generator nie został w pełni uruchomiony. Operator może załączyć wyłącznik, co zostanie zapisane w pamięci procesora. Po uruchomieniu generatora układ załączy wyłącznik główny generatora głównego lub awaryjnego,
- ✓ synchronizacja obu prądnic do pracy na wspólną sieć zasilającą przebiega w sposób półautomatyczny, tzn. operator załącza 2-gą prądnicę do pracy na wspólną sieć, a układ sam dokonuje synchronizacji, co jest sygnalizowane miganiem diody przy wyłączniku głównym,
- ✓ generator główny i awaryjny nie mogą pracować jednocześnie. Dlatego też generator główny ma priorytet, tzn. gdy pracuje generator awaryjny i zostanie załączony generator główny, to automatycznie zostanie wyłączony wyłącznik generatora awaryjnego,
- ✓ w przypadku konieczności załączenia napięcia i uruchomienia wszystkich generatorów należy wyłączyć wyłącznik sekcyjny,
- ✓ pozycja wyłącznika sekcyjnego zależy od operatora, niezależnie od stanów innych wyłączników,
- ✓ po przekroczeniu 120% obciążalności elektrycznej generatora 1-go lub 2-go następuje automatyczne wyłączenie wyłącznika, stan ten zeruje się po ponownym załączeniu wyłącznika generatora.



Rys. 5. Algorytm wykrywania i sygnalizowania awarii w pojedynczym generatorze



Rys.6. Przykładowe przebiegi czasowe dla alarmów pojedynczych oraz zbiorczego

Sterowanie załączeniem odbiorników polega na uaktywnieniu odpowiednich przełączników platformy DE2-115.

Gdy nie będzie blackout'u to mogą zostać załączone odpowiednie odbiorniki:

- ✓ jeżeli na sieć pracuje tylko generator awaryjny to będzie możliwość załączenia tylko odbiorników ważnych,
- ✓ jeżeli na sieć pracuje przynajmniej 1 generator główny to będzie możliwość załączenia wszystkich odbiorników, tzn. ważnych, mniej ważnych oraz odbiornika dużej mocy.

Obciążenie elektrowni okrętowej jest w sposób ciągły monitorowane. Jej aktualne obciążenie [w %] jest wyświetlane na wyświetlaczach 7-segmentowych platformy DE2-115. Po przekroczeniu 80% obciążalności generatora zapala się dodatkowy wyświetlacz, który cyfrą 8 sygnalizuje ten stan. Po przekroczeniu 120% obciążalności może nastąpić blackout. Odbiorniki ważne i mniej ważne posiadają programowo przyjęte określone wartości obciążenia. Operator, po załączeniu odbiornika dużej mocy, może zwiększać lub zmniejszać obciążenie o 5%. Model elektrowni rozdziela moc proporcjonalnie na dwa generatory, wówczas gdy pracują wspólnie na sieć zasilającą. Dlatego też po załączeniu wyłącznika drugiego generatora i po prawidłowej synchronizacji następuje podział mocy. Po załączeniu odbiornika dużej mocy jest możliwość zwiększania lub zmniejszania obciążenia za pomocą odpowiednich przycisków platformy DE2-115.

Generatory 1 i 2 mogą znajdować się w stanach awarii, gotowości, postoju oraz pracy. W zaprogramowanym układzie można dla każdego z generatorów ustawiać czasy rozruchu, zwalniania, przygotowywania, są one zapisane jako stałe. Dla generatora awaryjnego zasada pracy jest podobna. Jednak generator ten jest cały czas w stanie gotowości, powinien on możliwie szybko przejąć obciążenie po utracie zasilania. Aktualne stany generatorów są sygnalizowane na wyświetlaczu LCD.

Zbudowany model jest doskonałym stanowiskiem badawczym oraz dydaktycznym dla studentów UMG na specjalności Elektrotechnika Okrętowa oraz słuchaczy kursu Elektroautomatyk Okrętowy organizowanego przez Studium Doskonalenia Kadr UMG. Umożliwia poznanie zasad opracowania, implementacji i weryfikacji algorytmów cyfrowego sterowania.

### Grawerka laserowa CNC

Kolejnym modelem zaprojektowanym i zbudowanym w KAO, w ramach pracy dyplomowej [11], jest grawerka laserowa CNC (Computer Numerical Control), która umożliwia wypalanie elementów graficznych w różnego rodzaju materiałach, np. w drewnie, na papierze (rys. 7). Grawerka jest sterowana numerycznie, pracuje podobnie jak rzeczywiste urządzenie przemysłowe. Za realizację sterowania odpowiada platforma Raspberry PI i DE2-115. Raspberry PI pełni funkcję sterowania silnikami i laserem, została ona oprogramowana w języku Python. Natomiast platforma DE2-115 pełni funkcję pomocniczą dla potrzeb badawczych i laboratoryjnych. Algorytm sterowania został opracowany w języku VHDL i zaimplementowany w strukturze układu FPGA dostępnym na platformie DE2-115. Zastosowanie dwóch platform umożliwia wykorzystanie urządzenia w szerokim zakresie, zarówno w przemyśle jak i w warunkach laboratoryjnych. Model grawerki pełni podobną rolę jak ploter wspomniany w pracy [10]. Sterowanie pracą plotera cieszy się znacznym zainteresowaniem studentów, którzy przygotowują algorytmy o różnej skali trudności, do sterowania wykorzystując różne elementy, między innymi liczniki, przerzutniki, bramki, multipleksery lub demultipleksery. Jest to stanowisko, które umożliwia wykazanie się kreatywnością i samodzielnością myślenia. Ploter dostępny w laboratorium Techniki Cyfrowej KAO został już mocno

wyeksplloatowany, stąd konieczność wymiany sprzętu i zrealizowany pomysł budowy nowego urządzenia.

Nowe stanowisko z grawerką służy do prac badawczych i nauki zasad projektowania układów sekwencyjnych. Poprzez zaprojektowanie odpowiedniej sekwencji uzyskuje się ruch lasera w płaszczyznach X Y, przy czym dla każdej osi należy zdefiniować po 4 bity. Układ umożliwia również podnoszenie i opuszczanie grawera co jest realizowane przy pomocy dodatkowego sygnału sterującego. Schemat blokowy modelu grawerki laserowej został przedstawiony na rysunku 8.



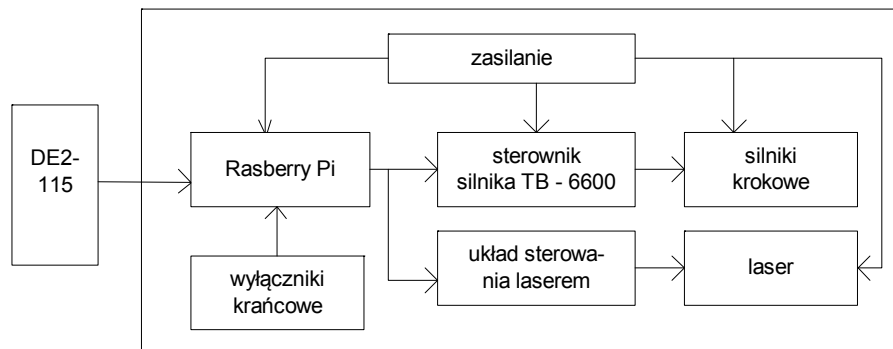
Rys. 7. Model laserowej grawerki CNC

Konstrukcja grawerki została wykonana z profili aluminiowych (40 mm x 40 mm) w technologii spawania. Charakteryzuje się ona dużą sztywnością. Natomiast brama lasera, która stanowi górny element, została zespolona z podstawą za pomocą połączenia śrubowego. Elementy przenoszące ruch maszyny zostały zbudowane z wykorzystaniem układów liniowych firmy Rexroth Bosch Group [13]. Dwa łożyska liniowe podtrzymują stół roboczy, natomiast trzecie podtrzymuje laser. Wysoką czułość i lekkość przesuwu zapewniają napędowe śruby trapezowe oraz system łożysk liniowych firmy Rexroth. Śruby trapezowe są ważnym elementem przeniesienia napędu grawerki, umożliwiając one bardzo dokładne przeniesienie momentu napędowego silnika na element poruszany. W grawercie laserowej elementem ruchomym jest stół roboczy, wykonany ze sztywnej blachy aluminiowej o grubości 4 mm i powierzchni roboczej 25 cm x 35 cm, poruszający się wzdłuż osi X oraz laser poruszający się wzdłuż osi Y. Momenty bezwładności układu ruchu urządzenia są

niwelowane poprzez elastyczne sprzęgła bezluzowe. W zbudowanej grawercie CNC funkcję pozycjonowania urządzenia w określonym punkcie początkowym X0 i Y0 pełnią czujniki krańcowe. Zapewniają one również ustawienie urządzenia w odpowiednim punkcie stołu roboczego. Czujniki, w przypadku przekroczenia zakresu ruchu stołu i lasera, pełnią także rolę wyłącznika awaryjnego. Ważną część zbudowanej grawerki CNC stanowi laser, jest to urządzenie wykonawcze, którego jakość decyduje o końcowym efekcie pracy. Wykorzystany laser posiada następujące parametry: moc – 500 mW, długość fali – 405 nm, napięcie zasilania – 12 V DC, prąd – 2 A, wymiary – 33 mm x 33 mm x 75 mm. W zbudowanej grawercie wykorzystano również dwa silniki krokowe bipolarnie oraz dwa analogowe sterowniki.

Zbudowana grawerka wykonuje kilka typów pracy, za które odpowiadają poszczególne algorytmy: tj. wykonuje ruch liniowy, ruch kołowy, oblicza ilość kroków, steruje silnikami, sprawdza warunki końcowe, odczytuje współrzędne. Przykładowo celem algorytmu ruchu liniowego jest takie sterowanie grawercą, aby w obrabianym materiale, pomiędzy określonymi współrzędnymi, została wypalona linia prosta. Natomiast zadaniem algorytmu ruchu kołowego jest zapewnienie takiej pracy, aby w obrabianym materiale, w zależności od parametrów wejściowych, został wypalony zadany łuk. Wykorzystuje on algorytm ruchu liniowego, ponieważ ruch kołowy jest składową odpowiednio dużej ilości ruchów liniowych. Zadaniem algorytmu sterowania pracą silnika jest wystawianie stanów wyjściowych każdego sterownika w taki sposób, aby silnik wykonywał z odpowiednią częstotliwością określone ruchy. Algorytm sprawdzenia warunków końcowych jest algorytmem pomocniczym. Jest on niezbędny przy wykonywaniu ruchów kołowych grawerki laserowej. Podstawowym algorytmem oprogramowania sterującego pracą grawerki jest algorytm odczytu współrzędnych.

Podczas budowy modelu pojawiło się kilka problemów technologicznych, takich jak duże opory przesuwu zarówno prowadnic wózków liniowych jak i śruby trapezowej. Opory przesuwu zlikwidowano poprzez odpowiednie szlifowanie prowadnic, natomiast opory śruby usunięto poprzez zastosowanie odpowiedniego smaru. W trakcie uruchamiania zaobserwowano także drgania urządzenia, źródłem którego był wspornik silnika krokowego. Problem został usunięty poprzez usztywnienie wspornika silnika krokowego. Programowanie wiązało się również z kilkoma problemami, przykładowo przy wyznaczaniu i implementacji algorytmu ruchu kołowego oraz algorytmu zakończenia ruchu. Trudności te związane były z zagadnieniem prawidłowego zaokrąglania liczb.



Rys. 8. Schemat blokowy grawerki

## Podsumowanie

Układy programowalne doskonale nadają się do wykorzystania w układach automatyki, zarówno w przemyśle lądowym oraz w okrętownictwie. Stosuje się je w układach prostych i bardzo skomplikowanych, gdzie wykorzystywane są do sterowania procesami technologicznymi. Cechują się one dużą niezawodnością pracy, nawet w trudnych warunkach, posiadają również niewielkie gabaryty. Bardzo proste jest wprowadzanie modyfikacji w układach sterowania. Przedstawione modele i opracowane algorytmy sterowania stanowią dobre obiekty do wizualizacji pracy programu sterującego, do badań w zakresie współpracy różnych elementów i układów elektronicznych, cyfrowych, różnych platform uruchomieniowych. Są ponadto doskonałym obiektem umożliwiającym poznanie nowych urządzeń i algorytmów sterowania. Nie są to tylko badania symulacyjne, chociaż one też odgrywają istotną rolę. Nauka zasad cyfrowego sterowania z wykorzystaniem modeli jest bardziej efektywna niż tylko obserwacja np. przebiegów czasowych na ekranie monitora.

**Autora:** dr inż. Krystyna Maria Noga, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.noga@we.umg.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] Noga K.M., Nowe stanowiska dydaktyczne do nauki cyfrowego sterowania z wykorzystaniem układów programowalnych, *Zeszyty Naukowe WEiA Politechniki Gdańskiej*, Nr 30, 2011, 93–96
- [2] Noga K.M., Cyfrowe sterowanie z zastosowaniem układów programowalnych. *Zeszyty Naukowe WEiA Politechniki Gdańskiej*, Nr 40, 2014, 73-76
- [3] Noga K. M., Modele sterowane cyfrowo, *Zeszyty Naukowe WEiA Politechniki Gdańskiej*, Nr 46, 2015, 81-84
- [4] Noga K. M., Radwański M., Our Stations for Teaching Programmable Devices, *Innovations in E-learning, Instruction Technology, Assessment and Engineering Education*, Polytechnic University, USA, Springer 2008, 268-273
- [5] Noga K. M., M. Radwański M., Modern improvements in the digital logic laboratory, *Technological Developments in Networking, Education and Automation*, USA, Springer 2010, 109-114
- [6] Pęczkowski D., Noga K. M., Sterownik diod led RGB mocy, *Zeszyty Naukowe WEiA Politechniki Gdańskiej*, Nr 57, 2017, 89 – 94
- [7] Noga K. M., Wykorzystanie robota humanoidalnego ROBOWISDOM w dydaktyce techniki cyfrowej, *Zeszyty Naukowe WEiA Politechniki Gdańskiej*, Nr 51, 2016, 127-130
- [8] Noga K. M., Wykorzystanie platform Arduino UNO oraz DE2-115 do sterowania modelami aut, *Zeszyty Naukowe WEiA Politechniki Gdańskiej*, Nr 60, 2018 r., 85–90
- [9] [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc) (dostęp marzec 2020)
- [10] Noga K. M. - Nauczanie Techniki Cyfrowej na kierunku Elektrotechnika w Uniwersytecie Morskim w Gdyni, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 95, Nr 12/2019, 276 – 281
- [11] Kołodzik G., Dalecki D., Projekt i budowa programowanej grawerki laserowej CNC, praca dyplomowa inżynierska, UMG 2019
- [12] <http://ai2.appinventor.mit.edu/> (dostęp marzec 2020)
- [13] <https://www.boschrexroth.com/pl/pl/home/index> (dostęp marzec 2020)