

Dr hab. inż. Andrzej SZELMANOWSKI, prof. ITWL
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa
andrzej.szelmanowski@itwl.pl

Warszawa, 25 sierpnia 2021 r.

RECENZJA **rozprawy doktorskiej**

mgr. inż. Sławomira ŁUNIEWSKIEGO

**pt.: „KONSTRUKCJA I OPROGRAMOWANIE LED-OWEGO
WYŚWIETLACZA KULISTEGO DO ZOBRAZOWANIA
RZECZYWISTOŚCI WIRTUALNEJ”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska **mgr. inż. Sławomira Łuniewskiego** pt.: „**Konstrukcja i oprogramowanie LED-owego wyświetlacza kulistego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej**”, wykonana pod kierunkiem **prof. dr. hab. inż. Bogdana Zygmunta** z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, obecnie zatrudnionego w Telesystem-Mesko sp. z o.o. (promotora) oraz **dr. inż. Waldemara Śmietańskiego** z Wojskowej Akademii Technicznej (promotora pomocniczego).

Recenzja została opracowana na podstawie pisma otrzymanego od **prof. dr. hab. inż. Jerzego Małachowskiego**, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej (pismo WAT z dnia 06.07.2021 r.) z dołączonym egzemplarzem rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem oraz zlecenia **dr. hab. inż. Stanisława Kachela, prof. WAT**, Dziekana Wydziału Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie (umowa WAT z dnia 16.07.2021 r.).

2. Ocena podjętego tematu pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy tematyki zobrazowania przestrzennego (3D), wykorzystywanego m.in. w budownictwie i inżynierii lądowej, medycynie, biznesie reklamowym, turystyce i branży rozrywkowej, ale także, co ciekawe, w nabełmowych systemach celowniczych (np. specjalizowane wyświetlacze nabełmowe, wykorzystujące zobrazowanie pozyskiwane z układu kamer TV/FLIR umieszczonych na poszyciu samolotu F-35 w czasie jego lądowania na lotniskowcu).



Zagadnienie prezentacji obrazu przestrzennego jest niezwykle złożonym problemem, którego rozwiązanie wymaga zastosowania innowacyjnych metod oraz złożonej technologii, wykorzystującej m.in. skanery optyczne 3D i wyświetlacze holograficzne. Metody zobrazowania informacji 3D i jej analizy, oraz urządzenia do ich realizacji technicznej, są obecnie jednym z najszybciej rozwijających się obszarów w zakresie komunikacji człowieka z maszyną lub z drugim człowiekiem za pośrednictwem takiej maszyny, często wspomaganą za pomocą rozbudowanych algorytmów sztucznej inteligencji. Zobrazowanie 3D jest wskazane do przedstawiania informacji w zakresie obrazów przestrzennych (widoki otaczających nas przedmiotów w trójwymiarowej rzeczywistości), ale także obrazów wirtualnych, wyjaśniających nowe lub złożone pojęcia z m.in. fizyki, chemii, biologii, geografii (np. wyobrażenia hiperprzestrzeni i obiektów świata kwantowego, struktura przestrzenna chromosomów, zagadnienia nawigacji okołoziemskiej, ziemskie zjawiska pogodowe itp.).

Przykładem realizacji zobrazowania przestrzennego są filmy 3D, wykorzystujące szereg technik, w których dzięki różnorodnej technologii uzyskuje się iluzję głębi ruchomych obrazów. Główną metodą pozwalającą na uzyskanie wrażenia głębi jest przedstawienie dwóch różnych obrazów prawemu i lewemu oku obserwatora. Podstawowe techniki generowania zobrazowania przestrzennego wykorzystują: obrazy anaglificzne (stanowiące kombinację na jednym zdjęciu lub filmie dwóch obrazów – czerwonego oraz zielonego lub niebieskiego), naprzemienne sekwencje klatek (widzowi dostarczana jest podwojona liczba klatek na sekundę, zazwyczaj 48 zamiast 24, lub 120 zamiast 60) oraz technologię wykorzystującą polaryzację fali świetlnej (obrazy z projektorów przechodzą przez polaryzatory optyczne, obrócone względem siebie o 90°). W każdym z powyższych przypadków wykorzystywane są specjalne okulary spełniające rolę analizatora, przepuszczając jedynie obraz przeznaczony dla danego oka. Powstają też rozwiązania techniczne nie wymagające takiego wspomagania np. zobrazowanie stosowane w metodach autostereoskopii.

Wśród projektorów 3D do wyświetlania obrazów przestrzennych wymienić można: ekrany obrotowe (półprzezroczysta powierzchnia takiego ekranu obraca się z dużą prędkością rzędu setek lub nawet tysięcy obrotów na minutę, dzięki czemu w całym obrębie bryły wyświetlacza generowany jest obraz, który jest półprzezroczysty i zamknięty pod osłoną), ekrany wolumetryczne (w danym momencie kilka lub kilkanaście ekranów przepuszcza całkowicie światło i tylko jeden z nich działa jako zwykły ekran, na którym generowany jest obraz, co daje efekt wielu poziomów głębi), wyświetlacze laserowe (niewielki fragment specjalnego szkła służy jako ekran, a dwa lasery podczerwone, o nieznacznie różniących się długości fali, pobudzają jony wewnątrz ekranu do świecenia, zaś w punktach gdzie wiązki się krzyżują, uzyskuje się trójwymiarowy obraz) oraz wyświetlacze plazmowe (wykorzystujące laser pracujący w podczerwieni, który emituje kilkaset impulsów na sekundę, każdy o czasie trwania rzędu nanosekundy, a dzięki wprowadzonej soczewce cała wiązka skupiana jest w jednym punkcie, tworząc świecącą kulę plazmy).



Obecnie jedną z najnowocześniejszych technologii stosowanych w prezentowaniu zarówno statycznych jak i dynamicznych obrazów przestrzennych są wyświetlacze holograficzne. Wytwarzają one „zawieszone w przestrzeni” obrazy 3D, zawierające np. markę, produkty lub usługi danej firmy, które stanowią nowoczesną formę reklamy przyciągającą uwagę najbardziej wymagających klientów. Wyświetlacze holograficzne posiadają dwu-, cztero- oraz sześcioramienne wirniki obracające się szybciej niż możliwości przetwarzania ludzkiego oka (ponad 30 klatek na sekundę) wytwarzając „unoszący się” w przestrzeni obraz 3D. Wysoka rozdzielczość od Full HD do 4K oraz bardzo duża jasność, sięgająca tysięcy cd/m^2 , umożliwiają doskonałe trójwymiarowe zobrazowanie nawet w świetle dziennym.

Zadaniem podjętym przez Doktoranta w recenzowanej rozprawie było opracowanie autorskiego urządzenia mechatronicznego, wykorzystywanego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej z głębią obrazu. Celem podjętej pracy było opracowanie projektu, konstrukcji i oprogramowania sterującego działaniem takiego urządzenia zrealizowanego w postaci LED-owego wyświetlacza kulistego. Realizacja tej pracy pozwoliła na weryfikację przyjętej w niej tezy o możliwości opracowania urządzenia prezentującego obraz wirtualnej rzeczywistości stworzony na zasadzie połączenia technologii informatycznej oraz skanowania mechanicznego. W ramach realizacji podjętego zadania Doktorant opracował oryginalne rozwiązanie techniczne, wykorzystujące wyświetlacz kulisty z czterowarstwowym ruchomym układem projekcyjnym i aktywnymi emiterami światła w postaci diod LED. Na podstawie powyższego należy przyjąć, że podjęta przez Doktoranta problematyka stanowi obecnie jedno z ciekawszych i perspektywicznych, a jednocześnie dość skomplikowanych zagadnień badawczych i konstrukcyjnych, występujących w obszarze metod i urządzeń do generacji zobrazowania przestrzennego 3D.

O ważności podjętego przez Doktoranta problemu świadczą też patenty (przede wszystkim amerykańskie i chińskie), których daty publikacji przypadają głównie na lata 2017-2020. Zastrzeżenia w nich zawarte dotyczą sposobu budowy urządzeń do wyświetlania stabilnych dynamicznie obrazów przestrzennych o wysokiej rozdzielczości, wykorzystujących multimedialne ekrany obrotowe, pełnokolorowe stereoskopowe wyświetlacze wielowymiarowe, urządzenia wyświetlające kulę świetlną, a także obiekty latające do tworzenia graficznych i rekonfigurowalnych struktur 3D. Patenty te dotyczą także sposobu generowania stabilnego obrazu przestrzennego z wyświetlaczy zbudowanych z punktowych źródeł świetlnych, w tym z diod LED-owych, ale o jednej warstwie zobrazowania głębi. Na tym tle urządzenie opracowane i przedstawione przez Doktoranta jest oryginalnym oraz nowatorskim rozwiązaniem, mieszczącym się w czołówce światowej, choć trudno porównywać jego walory do rozwiązań zagranicznych bez szczegółowej znajomości ich realizacji technicznej i bezpośredniej oceny jakości wytwarzanego zobrazowania.

Oceniam, że podjęta tematyka pracy w zakresie zobrazowania przestrzennego jest dysertacyjna, mieści się w obszarze dyscypliny „inżynieria mechaniczna”, a przyjęty cel i sposób jego realizacji są prawidłowe i w pełni zrozumiałe.



3

3. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 125 stron druku i jest podzielona na następujące rozdziały: Wprowadzenie, 7 rozdziałów głównych pracy, Podsumowanie oraz Literaturę. Wprowadzenie obejmuje przegląd aktualnego stanu wiedzy i analizę wybranej problematyki oraz zawiera jasno sformułowany cel i tezę naukową pracy.

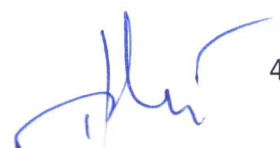
Rozdziały główne rozprawy zawierają najważniejsze wyniki i osiągnięcia Doktoranta w zakresie określenia i rozwiązania problemu naukowo-technicznego w zakresie zaprojektowania, budowy i weryfikacji poprawności działania modelu fizycznego LED-owego wyświetlacza kulistego umożliwiającego generowanie obrazów przestrzennych z informacją o głębi. Z uwagi na podjęty problem badawczy praca ma charakter konstrukcyjno-technologiczny, choć została wzbogacona o wątki naukowe w zakresie modelowania i symulacji komputerowej, które ją dopełniają, a zarazem wyczerpują wymagania istnienia aspektu naukowego rozprawy doktorskiej.

Materiał ilustracyjny przedstawiony w rozprawie ujmuje dokonania Doktoranta w zakresie zastosowania metody zobrazowania 3D wykorzystującej wyświetlacze wolumetryczne, których przykładem jest opracowany i zbudowany LED-owy wyświetlacz kulisty z czterema warstwami zobrazowania dającymi efekt głębi.

Publikacje przedstawione przez Doktoranta w wykazie literatury obejmują 67 pozycji, w tym 59 wydanych po 2000 roku (co stanowi 88%). Wśród tej liczby znajduje się 27 monografii i artykułów zagranicznych (co stanowi 40%). Wśród publikacji polskich znajdują się 3 samodzielne publikacje Doktoranta oraz 1 współautorski artykuł, opublikowany w renomowanym czasopiśmie międzynarodowym.

Praca jest twórczym rozwinięciem wcześniej podejmowanych przez Doktoranta tematów, w tym oryginalnych rozwiązań konstrukcyjnych przedstawionych w jego pracy inżynierskiej (Literatura, poz. 38) i pracy magisterskiej (Literatura, poz. 37). Rozwinięcie to obejmuje m.in. zwiększenie liczby warstw głębi do 4 (urządzenie prezentowane w pracy magisterskiej posiadało jedną warstwę), zwiększenie rozdzielczości matrycy (urządzenie prezentowane w pracy magisterskiej tworzyło matrycę dynamiczną złożoną z 4.608 pikseli (48x96 – 48 diod na pasku LED-owym, wyświetlających dane 96 razy w ciągu jednego obrotu). Nowym elementem jest wzbogacenie urządzenia o regulator cyfrowy, sterujący układem napędowym z silnikiem prądu stałego do stabilizacji prędkości obrotowej, niezwykle ważnej dla jakości oglądanego zobrazowania 3D. Nowe urządzenie nie zawiera też dodatkowej ramy, ułatwiającej zachowanie osiowości ruchu obrotowego dla wirującego układu linijek LED-owych, co wymusiło w nowym rozwiązaniu zastosowanie wyrafinowanego układu wyważania dynamicznego z zastosowaniem metody amplitudowo-fazowej.

Oceniam, że układ pracy jest poprawny, przedstawiony materiał ilustracyjny i użyta terminologia są prawidłowe, a dobór literatury jest celowy, poprawny i wystarczający dla prezentacji obecnego stanu wiedzy i realizacji pracy.



4. Szczegółowa analiza i ocena merytoryczna pracy

Analiza i ocena merytoryczna obejmuje poszczególne elementy składowe pracy zawierające: Wykaz ważniejszych skrótów, oznaczeń i indeksów, Wprowadzenie, 7 rozdziałów głównych pracy, Podsumowanie oraz Literaturę.

W „Wykazie ważniejszych skrótów, oznaczeń i indeksów” podane zostały najważniejsze skróty nazw urządzeń i pojęć, a także oznaczenia wielkości fizycznych i parametrów związanych z pozyskiwaniem, przetwarzaniem i wyświetlaniem obrazów 2D i 3D, ułatwiające analizę treści merytorycznej pracy.

W rozdziale 1. „Wprowadzenie” Doktorant przedstawił przyjęte do realizacji zadanie opracowania oryginalnego i nie mającego odpowiednika w dostępnych na świecie urządzeniach, mechanicznego wyświetlacza kulistego z czterema paskami diod LED, umożliwiającego prezentowanie obrazów przestrzennych z informacją o głębi obrazu. Wskazał w nim na zaawansowanie swojego rozwiązania na poziomie światowym. Przyniesione patenty w tym obszarze (głównie amerykańskie i chińskie) pozwalają na zakwalifikowanie prezentowanego w pracy rozwiązania do czołówki światowej. Doktorant w sposób syntetyczny dokonał przeglądu literatury naukowej oraz baz patentowych z zakresu wybranej technologii wyświetlania trójwymiarowego. Jako podsumowanie analizy stanu wiedzy w zakresie urządzeń do zobrazowania 3D Doktorant przedstawił wybrany problem badawczy oraz podał cel i tezę pracy.

W rozdziale 2. „Przegląd istniejących technologii wyświetlania trójwymiarowego” została przedstawiona klasyfikacja najważniejszych technologii 3D, obejmująca: grafikę komputerową (wykorzystującą metody śledzenia promieni, energetyczną i renderowanie objętości), stereoskopię binokularową (stosującą metody anaglifową, polaryzacyjną i migawkową) oraz autostereoskopię (obejmującą wyświetlacze wielowidokowe, wolumetryczne i holograficzne). Doktorant dokonał klasyfikacji technologii w obszarze zobrazowania 3D. Osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie na podstawie analizy literatury [3, 4, 5] schematu podziału technologii wyświetlania trójwymiarowego (rys. 2.). Cennym elementem tego opisu jest podanie kilku przykładów wyświetlaczy holograficznych (stanowiących najnowszy trend w obszarze wyświetlaczy 3D). Doktorant umiejętnie umieścił swoje rozwiązanie konstrukcyjne w postaci sferycznego wyświetlacza z wirującą linijką LED-ową w grupie wyświetlaczy wolumetrycznych w układzie dynamicznym z ekranem aktywnym. Pewnym niedociągnięciem w pracy jest brak przywołania pozycji literatury przy omawianiu niektórych rodzajów technologii zobrazowania (w grafice komputerowej i stereoskopii binokularowej), co utrudnia analizę i ocenę przedstawianych informacji. Jako najbardziej obiecujące technologie wyświetlania 3D Doktorant wymienił wyświetlacze holograficzne (wiernie odtwarzające trójwymiarowość) i wyświetlacze nagłowne HMD (w zakresie stereoskopii binokularowej), przytaczając ich główne zalety (zobrazowanie rzeczywistości rozszerzonej) i ograniczenia (m.in. konflikt akomodacyjno-zbieżnościowy). Na zakończenie tego rozdziału Doktorant podał cel i zakres pracy, w postaci wykazu zadań szczegółowych, oraz przyjętą tezę pracy.

W rozdziale 3. „*Idea projekcji LED-owego wyświetlacza kulistego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej*” przedstawiona została idea i koncepcja konstrukcyjna prezentowanego rozwiązania. Doktorant omówił zasady tworzenia rzeczywistości wirtualnej oraz właściwości opracowanego wyświetlacza. Wskazał na innowacyjność prezentowanego rozwiązania w odniesieniu do istniejących na rynku wyświetlaczy wolumetrycznych z dynamicznym układem skanowania. Zastosowanie w nim przez Doktoranta czterech linii LED-owych, umieszczonych w różnych odległościach od osi obrotu układu projekcyjnego, powoduje powstanie niezależnych, „zawieszonych w przestrzeni” jedna za drugą warstw zobrazowania, a w konsekwencji pozwala uzyskać trójwymiarowy obraz z efektem głębi. Cechą szczególną tej konstrukcji jest kulisty kształt obszaru zobrazowania, dzięki czemu możliwe jest obserwowanie obrazów trójwymiarowych ze wszystkich stron i dowolnych kątów. Dodatkowo opracowany model wyświetlacza kulistego jest w stanie spełnić wymagania dotyczące zbieżności i akomodacji. Mankamentem takiego sposobu wyświetlania jest nieusuwanie ukrytych linii obiektów w zależności od kąta ich obserwacji (co może pogarszać dokładność wizualizacji) oraz ograniczona rozdzielczość trzeciego wymiaru (wynikająca z liczby linii LED-owych zastosowanych w wyświetlaczu kulistym). Cechą niepożądaną opracowanego rozwiązania jest też obecność strefy martwej w środku przestrzeni projekcyjnej (wynikająca z ograniczeń mechanicznych).

W rozdziale 4. „*Struktura i własności funkcjonalne LED-owego wyświetlacza kulistego*” Doktorant opisał zasadnicze części konstrukcyjne zbudowanego modelu fizycznego wyświetlacza kulistego, obejmujące nieruchomą podstawę oraz ruchomy układ czterech wirujących linijek LED-owych. W tabeli 1 Doktorant podał parametry charakteryzujące matryce dynamiczne tworzone przez poszczególne warstwy (pierwsza 250x130 pikseli, druga 250x120 pikseli, trzecia 250x110 pikseli i czwarta 250x100 pikseli), z których wynika ogromna złożoność problemu sterowania diodami LED w taki sposób, aby uzyskiwać nie tylko obrazy statyczne ale również animacje. Doktorant podał, że oceniana struktura konstrukcyjna jest autorskim rozwiązaniem technicznym powstałym w oparciu o zdobyte już doświadczenie, a opracowane wcześniejsze wersje wyświetlacza kulistego (m.in. linijka 48x96 pikseli) umożliwiły wprowadzenie optymalizacji, nie przedstawił jednak wprost, czego te optymalizacje dotyczyły w nowej wersji wyświetlacza kulistego. Brak też wprowadzenia w tym rozdziale wydzielonych fragmentów, opisujących oddzielnie strukturę wyświetlacza i oddzielne jego własności funkcjonalne, co ułatwiłoby analizę merytoryczną pracy.

W rozdziale 5. „*Model matematyczny kulistego wyświetlacza*” przedstawiony został model wyświetlania obrazu na wyświetlaczu kulistym z wirującą linijką diod LED-owych, opisujący sposób wizualizacji najpierw jednej warstwy obrazu, a następnie wszystkich czterech warstw dla wizualizacji zjawiska głębi. Doktorant opracował, na podstawie analizy dostępnej literatury [52, 54], algorytm „krojenia” modelu geometrycznego na warstwy obrazów dwuwymiarowych (rys. 23.), który wykorzystał do przygotowania danych dla zobrazowania przestrzennego. W modelu tym prezentowany za pomocą wyświetlacza kulistego obraz rzeczywistości wirtualnej jest

efektem zobrazowania w przestrzeni wielu widoków jako warstw ułożonych jedna za drugą. Doktorant zaprezentował wyniki symulacji projekcji obrazu w oparciu o metodę skanowania mechanicznego. Kluczowym elementem tego modelu jest opis działania układu linijki zawierającej poszczególne diody LED w czasie wykonywania jednego obrotu wokół osi wyświetlacza. Dodatkowo w rozdziale tym został omówiony sposób identyfikacji parametrów modelu opisującego dynamikę ruchomej części prezentowanego wyświetlacza (zawierającą m.in. silnik prądu stałego i przekładnię jednostopniową). Do wyznaczenia postaci transmitancji identyfikowanego układu napędowego i wartości współczynników występujących w przyjętym modelu opisującym jego właściwości dynamiczne Doktorant wykorzystał specjalizowane narzędzie System Identification Toolbox (wykorzystywane w programie Matlab). Do regulacji stanów nieustalonych i stabilizacji prędkości obrotowej elementu wirującego, niezbędnej dla prawidłowego powstawania obrazu przestrzennego, Doktorant wprowadził dodatkowo regulator cyfrowy PID, dla którego przedstawił sposób doboru parametrów przy zastosowaniu wymuszenia w postaci skoku jednostkowego i narzędzia PID Tuner (wykorzystywanego w programie Matlab). Jednakże w tym rozdziale, dla oceny poprawności otrzymanej postaci transmitancji układu i wartości jej współczynników, Doktorant mógł przedstawić także alternatywny sposób identyfikacji właściwości dynamicznych zastosowanego zespołu napędowego poprzez wykorzystanie opisu np. za pomocą wektora stanu (dla równań opisujących działanie silnika prądu stałego i przekładni jednostopniowej z wirującym układem linijek LED-owych) oraz wykorzystanie prostego funkcjonatu jakości, opisującego średniokwadratowe błędy identyfikacji modelu rzeczywistego układu napędowego względem estymatora w postaci założonego modelu dynamicznego i wyznaczenie wartości parametrów regulatora zapewniających osiągnięcie jego minimum.

W rozdziale 6. „Projekt, konstrukcja i uruchomienie LED-owego wyświetlacza kulistego” przedstawiony został projekt konstrukcji mechanicznej wyświetlacza, obejmujący podstawę wyświetlacza, jego układ napędowy, wirujący układ linijek LED-owych oraz czujnik do określania jego chwilowego położenia kąowego. Doktorant wprowadził ten czujnik w celu zapewnienia stabilizacji prędkości obrotowej wirującego układu linijek LED-owych, gdyż w wykorzystywanej przez niego metodzie wyświetlania opartej na skanowaniu mechanicznym kluczowe jest zmienianie stanów punktów świetlnych (w postaci diod LED) w ściśle określonych położeniach kątowych przy każdym następnym jego obrocie, co pozwala na uzyskanie kolejnych „klatek” wyświetlanych obrazów bez przesunięć i zniekształceń. Przedstawiony w tym rozdziale opis poszczególnych elementów składowych wyświetlacza kulistego, jak i narzędzi programistycznych wykorzystywanych do ich powstania, świadczy jednoznacznie o konstrukcyjno-technologicznym charakterze rozprawy doktorskiej. Przedstawione w nim zostały m.in. zagadnienia związane z optymalizacją kształtu dla zmniejszenia sił aerodynamicznych oraz masy dla ograniczenia wpływu przeciążeń od sił odśrodkowych i problemu wytrzymałości wirującego układu linijek LED-owych. Jako szczególnie istotne zagadnienie mechaniczne, wpływające bezpośrednio na bezpieczeństwo obserwatorów, Doktorant omówił główne metody wyważania

 7

elementów obrotowych oraz opracowany przez niego sposób uruchamiania zbudowanego wyświetlacza jako urządzenia wirującego oraz jego wyważania dynamicznego za pomocą metody amplitudowo-fazowej (z wykorzystaniem układu czujników przyspieszeń liniowych i oscyloskopu cyfrowego). Jako źródło napędu zastosowany został silnik prądu stałego z wbudowanym halotronowym układem detekcji położenia rotora. Brak jednak w pracy dyskusji o możliwości wykorzystania innych typów silników elektrycznych np. silnika krokowego z elektronicznym podziałem kroku. Z uwagi na wymaganą stabilność prędkości obrotowej, zasadnym wydaje się także ocena możliwości zastosowania zawieszenia magnetycznego (łożysk magnetycznych) zarówno do napędu układu i stabilizacji prędkości obrotowej, jak i utrzymywania osiowości wirującego układu linijek LED-owych.

W rozdziale 7. „*Opracowanie obwodów elektronicznych i oprogramowania mikrokontrolerów*” zawarte zostały szczegółowe opisy doboru podzespołów elektronicznych, w tym m.in. zasady doboru i wyniki badań diod LED-owych oraz mikrokontrolerów wykorzystywanych do ich sterowania. Doktorant przedstawił własne projekty czterech obwodów linijek LED-owych, obwodu modułu sterującego napędem wirującej części wyświetlacza oraz interfejsem użytkownika, a także projekt obwodu modułu komunikacyjnego w technologii Bluetooth. O złożoności problemu sterowania świadczy konieczność odświeżania (z przyjętą częstotliwością 30 razy na sekundę) generowanego przez diody obrazu złożonego ze 115.000 pikseli. Opracowane przez Doktoranta oprogramowanie bazuje na opracowanych przez niego modelach matematycznych, zarówno w zakresie metody projekcji obrazu, jak i metody regulacji prędkości obrotowej układu linijek LED-owych. Wymiernym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie algorytmów działania głównego programu sterującego linijką LED-ową oraz algorytmu działania programu sterującego modulem napędu i interfejsem użytkownika wykorzystującym system czasu rzeczywistego FreeRTOS. W rozdziale zostały przedstawione oryginalne wyniki badań „bezwładności” działania diod LED charakteryzujące czasy narastania i opadania sygnałów reprezentujących natężenia światła dla poszczególnych barw RGB. Otrzymane rezultaty w postaci działających obwodów elektronicznych i oprogramowania dla LED-owego wyświetlacza kulistego wymagały bardzo dużego zakresu wykonanej przez Doktoranta pracy projektowej i konstrukcyjnej (realizowanej m.in. przy wykorzystaniu środowiska Altium Designer). Wykonane badania świadczą także o interdyscyplinarności podjętej pracy (inżynieria mechaniczna, automatyka, elektronika, elektrotechnika, informatyka, optyka).

W rozdziale 8. „*Opracowanie i uruchomienie oprogramowania narzędziowego i zarządzającego urządzeniem*” zaprezentowane zostało środowisko programistyczne Visual Studio, biblioteki OpenCV oraz aplikacje: narzędziowa i zarządzająca LED-owym wyświetlaczem kulistym. Doktorant opracował i uruchomił oprogramowanie narzędziowe i zarządzające pracą LED-owego wyświetlacza kulistego, którego ogólny opis został przedstawiony w tym rozdziale. Wskazane jest, aby szczegóły tego oprogramowania, jako oprogramowania integrującego poszczególne moduły funkcjonalne wyświetlacza kulistego, podlegały ochronie (jako kody źródłowe).



8

W rozdziale 9. „Podsumowanie” Doktorant w sposób syntetyczny omówił główne etapy i wyniki pracy, a także problemy badawcze jakie z powodzeniem rozwiązał. Wykazał, że realizacja przyjętego celu pracy uwarunkowana była wieloma zadaniami, obejmującymi zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie modelu fizycznego wyświetlacza kulistego z układem czterech linijek LED-owych. Wymagało to przede wszystkim opracowania i wykonania obwodów elektronicznych i oprogramowania dla mikrokontrolerów budowanych układów, a także opracowania oprogramowania narzędziowego i zarządzającego pracą całego urządzenia. Doktorant podkreślił, że prace konstrukcyjne były następstwem wcześniej wykonanych badań teoretycznych, obejmujących m.in. opracowanie modelu matematycznego opisującego zasady tworzenia zobrażenia przestrzennego oraz wykonanie symulacji efektów wizualnych dla obrazów jedno- i wielowarstwowych. Doktorant wskazał na oryginalność zbudowanego wyświetlacza kulistego, która polega na jednoczesnym wyświetlaniu różnych obrazów na wielu sferach, skutkiem czego powstaje efekt optyczny istnienia trzeciego wymiaru dla nakładających się obrazów. Doktorant podkreślił, że wyróżniającą cechą jego urządzenia jest możliwość obserwowania generowanych obrazów przestrzennych ze wszystkich stron i dowolnych kątów, a także przyjęta na etapie projektowania modułowość konstrukcji, która cechuje zarówno elementy mechaniczne jak i rozwiązania elektroniczno-programowe. W rozdziale tym określone zostały także możliwości zastosowania zbudowanego urządzenia na rynku komercyjnym oraz w zastosowaniach obronnych.

Pracę kończy rozdział „Literatura”, zawierający wykaz przytaczanej w rozprawie bibliografii. Bibliografia wymieniona została w kolejności cytowania, a nie w ułożeniu alfabetycznym. Doktorant zebrał najważniejsze publikacje w obszarze zagadnień związanych z teorią i praktyką systemów zobrażenia 3D, ale także podał strony internetowe prezentujące teorię i przykłady zastosowań takich urządzeń. Wszystkie wymienione w wykazie literatury publikacje zostały przywołane w tekście rozprawy doktorskiej, w odpowiednich miejscach pracy i w odpowiedni sposób (poza nielicznymi wyjątkami przedstawionymi w uwagach szczegółowych). Doktorant wymienił 10 patentów (5 amerykańskich, 5 chińskich), głównie z lat 2017-2020, ujmujących rozwiązania techniczne w obszarze urządzeń i sposobów zobrażenia przestrzennego, w tym urządzeń rotacyjnych oraz wykorzystujących diody LED. W bibliografii została także wymieniona publikacja dotycząca zbudowanego przez Doktoranta urządzenia, zamieszczona w renomowanym czasopiśmie zagranicznym Journal of Electronic Communication and Computer Engineering, str. 80-83, 2017.

Oceniam, że praca została zrealizowana w sposób spójny według nakreślonego planu, a zawartość merytoryczna pracy w pełni odzwierciedla przyjęty cel pracy i służy do udowodnienia postawionej tezy pracy. Przyjęta w pracy metodyka postępowania jest logiczna, od zdefiniowania problemu badawczego, poprzez opracowanie modeli matematycznych i algorytmów zobrażenia i sterowania, budowę części mechanicznej i oprogramowania, aż do badań weryfikacyjnych, które potwierdziły poprawność działania zbudowanego urządzenia.



9

5. Uwagi szczegółowe do pracy

Najważniejszym osiągnięciem naukowym Doktoranta zaprezentowanym w rozprawie doktorskiej jest opracowanie modeli matematycznych w zakresie metody projekcji obrazu za pomocą LED-owego wyświetlacza kulistego, jak i metody regulacji prędkości obrotowej układu linijek LED-owych. Wymiernym osiągnięciem użytecznym Doktoranta jest opracowanie algorytmów działania głównego programu sterującego linijką LED-ową oraz algorytmu działania programu sterującego modułem napędu i interfejsem użytkownika wykorzystującym system czasu rzeczywistego.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej Doktorant nie ustrzegł się drobnych błędów, nie mających jednak znaczącego wpływu na wartość całej pracy.

Na str. 11, akapit drugi, Doktorant porównał swoje osiągnięcia konstrukcyjne z pracy inżynierskiej (2011) i magisterskiej (2014) do czołówki międzynarodowej nie podając na to dowodów, a wystarczyło przytoczyć w tym akapicie związane tematycznie patenty zagraniczne, m.in. patent amerykański (2018, bibliografia, poz. 34) oraz dwa patenty chińskie: (2017, bibliografia, poz. 29) i (2018, bibliografia, poz. 30).

Na str. 11 Doktorant podał główny cel rozprawy (akapit pierwszy) i tezę rozprawy (akapit czwarty), a następnie je powtórzył na str. 40, pkt. 2.7.

Na str. 18 zaprezentowany rysunek (Rys. 4. Rendering objętościowy) znajduje się w pkt. 2.2.2. Metoda energetyczna, a powinien być zamieszczony w pkt. 2.2.3. Renderowanie objętości.

Na str. 40 Doktorant niepotrzebnie zacytował fragment ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017, poz. 1789), art. 13, ust.1, którym wskazuje recenzentowi ocenę rozprawy jako pracy o charakterze projektowo-konstrukcyjnym.

Na str. 60, na rysunku 27, niewłaściwe oznaczenie kąta obrotu w płaszczyźnie x-y w odniesieniu do opisu zawartego w tekście (jest „ ϕ ”, a powinno być „ φ ”).

Na str. 67 brak wzoru 24 lub błędna numeracja wzoru 25 (powinno być 24).

Na str. 112, na rys. 67, na schemacie blokowym algorytmu działania głównego programu sterującego linijką LED-ową, jest element „Start”, natomiast brak elementu „Koniec”. Nie ma też opisu ścieżki „Przesłano wszystkie dane?” dla przypadku „TAK”.

Na str. 115, na rys. 68, na schemacie blokowym działania programu modułu sterującego napędem i interfejsem użytkownika brak elementu „Koniec”.

Wiele przedstawionych w rozprawie rysunków, a jest ich 69, nie ma przywołania w tekście (oprócz rys. 8, 10, 13, 15, 16, 23, 28, 29, 30, 32, 34, 39, 43, 44, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 62, 67, 68). Brak podania jednostek miary na rys. 24, 25, 26, 29 i 32.

Wszystkie pozycje literaturowe wymienione w wykazie literatury zostały przywołane w tekście rozprawy, choć nie zawsze w odpowiedniej kolejności (pozycja 19 przed pozycją 18, pozycje 28-36 i 41-43 zostały przywołane przed pozycją 27, pozycja 49 przed pozycją 48, pozycja 53 przed pozycją 52, pozycja 64 przed pozycją 62. W wielu miejscach rozprawy brak przywołania odpowiednich pozycji literaturowych na wskazanie źródła do przedstawianych w rozprawie informacji, kluczowych dla oceny stanu wiedzy w obszarze metod i urządzeń do zobrazowania 3D.

W wykazie bibliografii Doktorant zamieścił pozycje charakteryzujące linki do strony internetowej, które nie zawierają daty dostępu do informacji (pozycje: 13, 19, 21, 25, 27, 41-45, 67). Dodatkowo Doktorant przytoczył, jako pozycje literaturowe, karty charakterystyki wybranych elementów elektronicznych (pozycje 60-63).

W pracy znajdują się również nieliczne błędy literowe i interpunkcyjne oraz zwroty i określenia przynależne do tzw. żargonu, których wykaz przekazałem Doktorantowi (uwagi dotyczą stron 6, 8, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 29, 31, 35, 37, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 53, 55, 59, 60, 65, 67, 70, 72, 73, 78, 79, 82, 84, 85, 88, 89, 90, 91, 95, 97, 99, 102, 103, 105, 106, 107, 109, 113, 117, 118, 120).

Na podstawie analizy i oceny zawartości merytorycznej recenzowanej pracy za oryginalne i znaczące osiągnięcia Doktoranta uważam:

- przeprowadzenie kompleksowej analizy i uporządkowanie wiedzy w zakresie obecnie stosowanych metod i urządzeń do generacji obrazów przestrzennych oraz zjawisk fizycznych i psychicznych warunkujących ich odbiór, ze szczególnym wskazaniem na wolumetryczne wyświetlacze 3D;
- określenie problemu badawczego obejmującego ocenę możliwości generacji obrazu przestrzennego poprzez wykorzystanie skanowania mechanicznego i odtworzenia go za pomocą wirującego wyświetlacza 3D;
- opracowanie nowatorskiej koncepcji obrotowego wyświetlacza kulistego 3D, wytwarzającego odczucie głębi obrazu i wykorzystującego diody LED-owe zabudowane na paskach wirujących z częstotliwością zapewniającą wrażenie ciągłości odbioru u obserwatora (w pracy przyjęto 30 Hz);
- opracowanie modelu matematycznego LED-owego wyświetlacza kulistego oraz przeprowadzenie jego badań w zakresie sposobu przygotowania danych i generacji obrazu (z wykorzystaniem algorytmu „krojenia” obrazu przestrzennego na warstwy obrazów dwuwymiarowych) oraz modelu sterowania ruchomej części konstrukcji wyświetlacza kulistego bazującej na silniku prądu stałego i przekładni jednostopniowej (z wykorzystaniem regulatora cyfrowego PID);
- zaprojektowanie, budowa i uruchomienie LED-owego wyświetlacza kulistego oraz jego modyfikacja poprzez wprowadzenie optoelektronicznego czujnika położenia kąтового wirującego układu linijek LED-owych i wyważenie dynamiczne tego układu za pomocą stanowiska wykorzystującego metodę amplitudowo-fazową;

- opracowanie obwodów elektronicznych, sterujących układem napędowym oraz układem zobrazowania, wykonanie badań „bezwładności” zapłonu i gaśnięcia diod LED dla poszczególnych kolorów RGB, a następnie oprogramowanie i uruchomienie mikrokontrolerów, sterujących pracą układu linijek LED-owych podczas tworzenia ponad 100 tysięcy pikseli przy każdym pełnym obrocie;
- opracowanie autorskiego algorytmu działania głównego programu sterującego pracą układu linijek z diodami LED oraz algorytmu działania programu sterującego pracą układu napędowego i interfejsu realizującego komunikację z użytkownikiem;
- opracowanie i uruchomienie oprogramowania narzędziowego i zarządzającego pracą zbudowanego modelu fizycznego LED-owego wyświetlacza kulistego oraz weryfikacja i potwierdzenie poprawności jego działania.

Do zagadnień związanych z zawartością merytoryczną recenzowanej pracy, które Doktorant powinien wyjaśnić w trakcie obrony publicznej, zaliczam:

- brak analizy, czego w istocie dotyczy 10 patentów (5 amerykańskich, 5 chińskich) przytoczonych w bibliografii, głównie z lat 2017-2020, ujmujących rozwiązania techniczne w obszarze urządzeń i sposobów zobrazowania przestrzennego, w tym urządzeń rotacyjnych oraz wykorzystujących diody LED – czy patenty te mają cechy wspólne z rozwiązaniem opracowanym przez Doktoranta?
- brak wydzielonego fragmentu w pracy, zawierającego całościową analizę błędów instrumentalnych oraz ich wpływu na zakłócenia w prezentowaniu zobrazowania (chodzi głównie o wyznaczenie dopuszczalnych wartości zmiany chwilowej prędkości obrotowej elementów wirujących, dopuszczalnych odchyłek czasu zapłonu i czasu gaśnięcia diod LED-owych, dopuszczalnych odchyłek masy wyważenia dynamicznego nie powodujących uszkodzenia układu łożyskowania);
- brak dyskusji nad alternatywnymi sposobami sterowania i generowania stabilnej prędkości obrotowej elementów wirujących np. zastosowanie sterowanych częstotliwościowo silników krokowych (z komputerowym podziałem na mikrokroki), zapewniających jednocześnie precyzyjne pozycjonowanie kątowe;
- brak dyskusji nad zagadnieniami zapewnienia bezpieczeństwa obserwatorów (elementy wirujące z prędkością 30 obrotów na sekundę) poprzez wykonanie analizy energii kinetycznej, sił aerodynamicznych i wytrzymałości mechanicznej, wprowadzenie osłony lub dodatkowej ramy połączonej z podstawą urządzenia.
- brak dyskusji nad sposobem wykorzystania i jednocześnie odpowiedniej ochrony nowo opracowanej technologii zobrazowania o dużym znaczeniu praktycznym.

Oceniam, że praca posiada wysokie walory merytoryczne, a przedstawione przeze mnie uwagi krytyczne nie wpływają umniejszająco na całościowy odbiór pracy, który uważam jednoznacznie za pozytywny.



6. Podsumowanie i konkluzja do końcowej oceny pracy

Recenzowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie sprecyzowanego problemu naukowo-badawczego w obszarze zobrazowania 3D, polegającego na opracowaniu, zbudowaniu i oprogramowaniu modelu fizycznego wyświetlacza wolumetrycznego.

W rozprawie doktorskiej Doktorant przedstawił w sposób całościowy projekt i realizację nowatorskiego urządzenia do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej. W części pierwszej rozprawy (obejmującej rozdziały 2, 3, 4 i 5) Doktorant, na bazie przeglądu literaturowego, przeprowadził analizę teoretyczną zaproponowanej metody wyświetlania trójwymiarowego. Przedstawił koncepcję i założenia konstrukcyjne, a także strukturę i właściwości funkcjonalne nowego urządzenia. Praktyczna realizacja wyświetlacza kulistego została poprzedzona przeprowadzonymi symulacjami komputerowymi, co pozwoliło na pozytywną ocenę przyjętych założeń. W tym celu Doktorant opracował model matematyczny wyświetlania obrazów trójwymiarowych (dla układu zobrazowania) oraz model matematyczny ruchomej części wyświetlacza, napędzanej przez silnik prądu stałego z regulatorem cyfrowym do stabilizacji prędkości obrotowej (dla układu napędowego). Dodatkowo został podany opis procesów akwizycji i przetwarzania danych z obrazów trójwymiarowych. W części drugiej rozprawy (rozdziały 6, 7 i 8) Doktorant przedstawił projekt i realizację techniczną ruchomej części wyświetlacza 3D jako układu osiowo niesymetrycznego wraz z opisem sposobu jego wyważania dynamicznego. Dla części wyświetlacza związanej ze zobrazowaniem Doktorant podał sposób doboru i badań zastosowanych podzespołów elektronicznych, w tym charakterystyk dynamicznych diod LED-owych. Dodatkowo zostały przedstawione schematy obwodów drukowanych oraz algorytmy zaimplementowane w mikrokontrolerach, w tym oprogramowanie do zarządzania pracą wyświetlacza kulistego. .

Rozwiązanie zaprezentowane przez Doktoranta, wykorzystujące wirujące półkoliste ramy z paskami zawierającymi świecące diody LED, sterowane elektronicznie zgodnie z założonym programem, stanowi przykład urządzenia umożliwiającego zobrazowanie przestrzenne przynależnego do wyświetlaczy wolumetrycznych 3D. Oryginalność zaprezentowanego przez Doktoranta rozwiązania polega na jednoczesnym wyświetlaniu różnych obrazów na wielu sferach jednocześnie, co wywołuje efekt istnienia trzeciego wymiaru dla nakładających się obrazów, generowanych przez poszczególne warstwy wyświetlacza. Nowością autorskiego rozwiązania jest również zastosowana modułowość konstrukcji, która odnosi się zarówno do elementów mechanicznych i elektronicznych, jak i autorskiego oprogramowania, zapewniającego poprawność pracy całego urządzenia.

Po szczegółowej analizie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Sławomira Łuniewskiego pt.: „Konstrukcja i oprogramowanie LED-owego wyświetlacza kulistego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej”**, stwierdzam, że **cel pracy został osiągnięty a postawiona w pracy teza została udowodniona** poprzez opracowanie, budowę i zaprezentowanie działania



LED-owego wyświetlacza kulistego, generującego 4 warstwy głębi zobrazowania z wykorzystaniem technologii informatycznej i skanowania mechanicznego.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że Doktorant w stopniu wysokim wykazał się umiejętnością poprawnego formułowania problemu badawczego w zakresie opracowania nowej technologii i budowy oryginalnego urządzenia do zobrazowania przestrzennego z głębią obrazu. Wskazał, że urządzenie to wymaga przygotowania złożonych danych wejściowych w postaci warstwowych danych trójwymiarowych, których źródłem mogą być m.in. mapy warstwowe, przekroje geograficzne, dane meteorologiczne, czy też, w wersji rozwiniętej, informacje strategiczne o położeniach samolotów i satelitów w przestrzeni okołozemskiej.

Oceniam, że opracowana konstrukcja, w postaci LED-owego wyświetlacza kulistego, może znaleźć zastosowanie w edukacji, reklamach handlowych i show-biznesie. Jednak jego wersja zaawansowana, wskazywana przez Doktoranta do zastosowań przemysłowych lub wojskowych, powinna zostać objęta ochroną patentową lub informacji niejawnych (opis poprzedniej wersji urządzenia został opublikowany w czasopiśmie Elektronika praktyczna nr 8/2014). Należy zaznaczyć, że możliwe jest także zbudowanie modelu wielowarstwowego LED-owego wyświetlacza walcowego, generującego obraz przestrzenny o przekroju prostokątnym (na podobieństwo zobrazowania telewizorów, ale o naturalnej głębi prezentowanych obrazów).

Reasumując uważam, że **rozprawa doktorska mgr. inż. Sławomira Łuniewskiego pt.: „Konstrukcja i oprogramowanie LED-owego wyświetlacza kulistego do zobrazowania rzeczywistości wirtualnej” spełnia wymagania stawiane pracom promocyjnym na stopień doktora nauk inżynierjno-technicznych w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. 2017, poz. 1789), a Doktorant może być dopuszczony do jej publicznej obrony.**

Dodatkowo, na podstawie oceny bardzo szerokiego zakresu prac wykonanych w ramach przygotowanej rozprawy doktorskiej, zarówno od strony teoretycznej (opracowanie oryginalnego modelu matematycznego zobrazowania warstwowego i wykonanie symulacji komputerowych), jak i zadań praktycznych rozwiązujących problemy w zakresie zaprojektowania, oprogramowania, uruchomienia i pozytywnej weryfikacji zbudowanego modelu fizycznego wyświetlacza kulistego (identyfikacja właściwości dynamicznych zespołu napędowego, opracowanie i wprowadzenie automatycznej regulacji i stabilizacji prędkości obrotowej elementów wirujących, wyważenie dynamiczne elementów niesymetrycznych osiowo) **zwracam się z wnioskiem do Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sławomira Łuniewskiego.**

