



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
**WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI
i TELEKOMUNIKACJI**
KATEDRA TELEKOMUNIKACJI

Praca dyplomowa inżynierska

Aplikacja do kalibracji fotometru

The application for fotometer calibration

Imię i nazwisko
Kierunek studiów

Maksymilian Bawor
Elektronika i Telekomunikacja

Opiekun pracy

dr inż. Jarosław Bułat

Kraków, 2014

Oświadczam, świadomy odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem osobiście i samodzielnie (w zakresie wyszczególnionym we wstępie) i że nie korzystałem ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

Spis treści

WSTĘP.....	- 5 -
1 ZAGADNIENIA TEORETYCZNE ZWIĄZANE Z TEMATYKĄ PRACY.....	- 7 -
1.1 WŁAŚCIWOŚCI PERCEPCYJNE LUDZKIEGO WZROKU.....	- 7 -
1.2 PODSTAWOWE PRZESTRZENIE BARW	- 8 -
1.3 TECHNOLOGIE WYŚWIETLANIA OBRAZU	- 13 -
1.4 PODSTAWOWE PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE WYŚWIETLACZ.....	- 17 -
1.5 WSPÓŁCZYNNIK GAMMA.....	- 20 -
1.6 SPRZĘTOWE I PROGRAMOWE METODY KALIBRACJI MONITORÓW	- 22 -
2 IMPLEMENTACJA.....	- 25 -
2.1 BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA FOTOMETRU	- 25 -
2.2 SCHEMAT DZIAŁANIA APLIKACJI	- 27 -
2.1 WYKORZYSTANE URZĄDZENIA	- 38 -
3 ANALIZA WYNIKÓW.....	- 43 -
3.1 WSTĘPNA ANALIZA DANYCH REJESTROWANYCH PRZEZ FOTOMETR.....	- 43 -
3.2 MODELE GAMMA OTRZYMANE W WYNIKU DOŚWIADCZEŃ	- 46 -
3.3 DOPASOWANIE KRZYWEJ DOŚWIADCZALNEJ DO MODELI TEORETYCZNYCH	- 50 -
3.4 ODWZOROWANIE WARTOŚCI POMIARÓW FOTOMETRYCZNYCH NA LUMINANCJĘ.....	- 57 -
3.5 POMIARY FOTOMETRYCZNE, PRZY ZASŁONIĘCIU SENSORÓW	- 60 -
PODSUMOWANIE	- 62 -
BIBLIOGRAFIA	- 64 -

Wstęp

W dzisiejszym świecie mało kto jest sobie w stanie wyobrazić życie bez monitorów komputerowych lub telewizorów. Urządzenia wyświetlające towarzyszą człowiekowi w codziennym życiu. Równocześnie można zaobserwować, że w tej dziedzinie widoczne są oczywiste korzyści wynikające z postępu technicznego. Powstają coraz nowsze produkty, charakteryzujące się teoretycznie lepszymi parametrami, zajmujące mniej miejsca i nie niszczące ludzkiego wzroku.

W ofercie sprzedawców znajdują się telewizory wykonane w różnych technologiach. Podstawowe z nich to: coraz rzadziej spotykane wyświetlacze kineskopowe, ekrany plazmowe oraz najpopularniejsze obecnie ekrany ciekłokrystaliczne – LCD. Taka różnorodność technik powoduje, że pojawiają się różnice w wyświetlanym obrazie, zależne od posiadanego urządzenia. Każdy człowiek oczekuje jednak, że to samo zdjęcie wyświetlone na różnych telewizorach i monitorach będzie wyglądać tak samo. W związku z tym rodzi się problem kalibracji ekranów wykonanych w różnych technologiach. Istnieją zarówno sprzętowe jak i programowe metody kalibracji. Jednak w praktyce ustawienie optymalnych parametrów monitora, możliwe jest jedynie przy pomocy profesjonalnych urządzeń wykonujących pomiary kolorymetryczne lub spektrofotometryczne.

W celu umożliwienia badań związanych z właściwościami wyświetlaczy został skonstruowany fotometr, służący do pomiarów jasności różnych źródeł światła. Analiza właściwości tego urządzenia i jego kalibracja były podstawowym celem tej pracy. Stworzony program służy do kalibracji fotometru zaprojektowanego i zbudowanego przez pracowników i studentów Katedry Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Pod pojęciem kalibracji, rozumie się odwzorowanie otrzymanych wartości pomiarowych na wartości wyrażone w bezwzględnych jednostkach luminancji – kandel na metr kwadratowy. W procesie tworzenia aplikacji wykorzystane zostały dodatkowo wzorcowy monitor oraz spektrofotometr.

Pierwszy etap badań obejmował zapoznanie się z zasadą działania fotometru oraz z poznaniem właściwości różnych urządzeń wyświetlających obraz. Celem tego było znalezienie optymalnego, wzorcowego ekranu. W następnym etapie analizie poddane

zostały dane rejestrowane przez fotometr, co było podstawą do rozpoczęcia tworzenia aplikacji. Powstały program zbudowany został w oparciu o środowisko MATLAB. Do komunikacji urządzenia z tym środowiskiem, wykorzystane zostało narzędzie DAQ (ang. Data Acquisition Toolbox) udostępnione w pakiecie MATLAB. W trakcie pracy nad aplikacją niezbędne było również, przeprowadzenie pomiarów z wykorzystaniem spektrofotometru ColorMunki Photo firmy X-rite.

W pierwszym rozdziale opisane zostały zagadnienia teoretyczne związane z tematyką pracy. Scharakteryzowane zostały standardy definiujące przestrzeń barw. Następnie przedstawione zostały podstawowe technologie wyświetlania obrazu oraz parametry charakteryzujące wyświetlacze. Na końcu rozdziału opisane zostały podstawowe metody kalibracji ekranów. Drugi rozdział zawiera opis działania aplikacji. Znajdują się tam również informacje na temat budowy fotometru oraz charakterystyki urządzeń wykorzystanych w trakcie pracy nad programem. Rozdział trzeci poświęcony został analizie wyników. Porównane zostały ze sobą trzy wyświetlacze użyte w badaniach. Zaprezentowane zostały również wyniki poszczególnych etapów kalibracji.

1 Zagadnienia teoretyczne związane z tematyką pracy

W tym rozdziale omówione zostaną podstawowe zagadnienia teoretyczne związane z tematyką pracy. Przedstawione zostaną podstawowe cechy ludzkiego wzroku. Następnie opisane zostaną podstawowe standardy definiujące przestrzenie barw. W kolejnym kroku zaprezentowane zostaną technologie wyświetlania obrazu oraz parametry charakteryzujące monitory i telewizory. Na końcu omówione zostaną sprzętowe i programowe metody kalibracji urządzeń wyświetlających obraz.

1.1 Właściwości percepcyjne ludzkiego wzroku.

Tematyka związana z kalibracją fotometru, wiąże się bezpośrednio z problemem wyświetlania obrazów i odbioru tych obrazów przez człowieka. Nauka, związana z tą problematyką, zajmująca się badaniem mechanizmów fizjologicznych, uczestniczących w przekazywaniu, kodowaniu i przetwarzaniu informacji uzyskanej w wyniku działania bodźców fizycznych to neurofizjologia. Chcąc opisać podstawowe parametry monitorów, należy odnieść się do właściwości ludzkich zmysłów. Właściwości te zdefiniowane zostały w Prawie Webera-Fechnera. Dla wszystkich zmysłów prawo to mówi, że zmiana reakcji układu biologicznego jest proporcjonalna do względnej zmiany bodźca. Inny sposobem definicji tego prawa jest stwierdzenie, że percepcja w postępie arytmetycznym zależy od geometrycznego postępu faktów fizycznych [1]. Przy tworzeniu skali wrażeń zmysłowych zakłada się zazwyczaj, że wartość początkowa to tzw. wartość progowa, czyli umowna najniższa wartość bodźca rejestrowana przez ludzkie zmysły. Umowność tej wartości wynika z różnic percepcyjnych różnych osób. W przypadku ludzkiego wzroku ocena jasności światła jest proporcjonalna do logarytmu strumienia światła mierzonego na powierzchni oka.

Wyróżnia się trzy podstawowe parametry fizyczne powiązane z właściwościami percepcyjnymi człowieka [1]:

- a) luminancję – jasność źródła światła, czyli światła emitowanego, lub jasność obiektu, czyli światła odbitego,

- b) dominującą długość fali – subiektywne wrażenie postrzeganego koloru,
- c) czystość – określoną przez chrominancję odpowiadającą nasyceniu danego koloru.

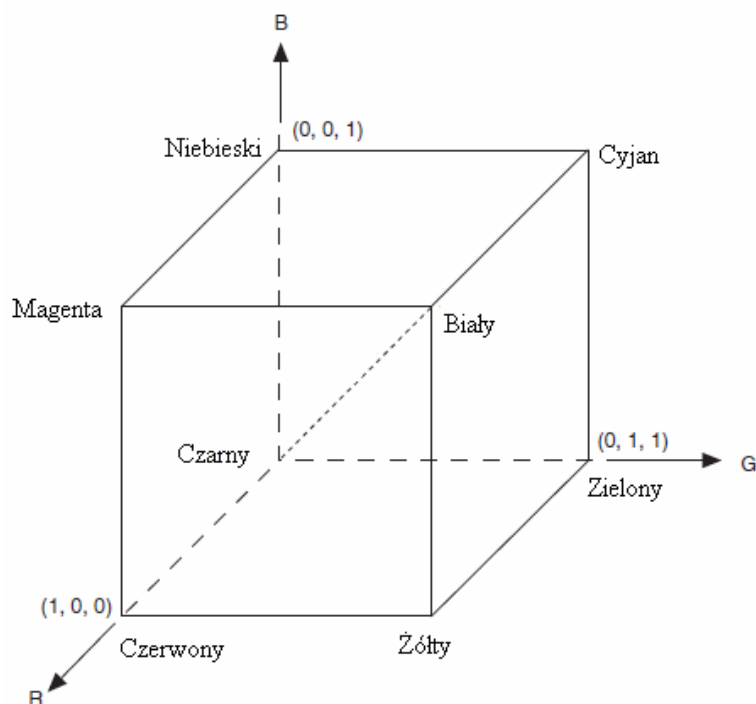
Ludzkie oko posiada dwa rodzaje fotoreceptorów. Pierwszy z nich to pręciki, które są wrażliwe na światło achromatyczne i odpowiadają za widzenie czarno-białe. Działają one przy słabym świetle i nie dają wrażeń barwnych. Ten rodzaj widzenia nazywany jest widzeniem skotopowym (pręcikowym). Drugi rodzaj fotoreceptorów to czopki, które odpowiadają za widzenie barw w świetle dziennym. Ten rodzaj widzenia określamy jako widzenie fotopowe (czopkowe). Taka konstrukcja ludzkiego oka powoduje, że jest ono bardziej wrażliwe na zmiany luminancji, niż na zmiany chrominancji co znajduje swoje odzworowanie w standardach związanych z grafiką komputerową. Równocześnie w dowolnym momencie obserwacji czułość oka jest ograniczona w tzw. widzeniu wczesnym do 2 jednostek w skali logarytmicznej. Poziomy jasności poniżej dolnego poziomu są postrzegane jako najciemniejsze, a powyżej górnego poziomu - jako najjaśniejsze, co skutkuje dynamiczną adaptacją do zmian jasności. Kolejnym ważnym faktem jest nieliniowe postrzeganie jasności przez człowieka. W skali logarytmicznej, liniowo postrzegane zmiany jasności wymagają geometrycznych zmian luminancji. Ma to swoje odzwierciedlenie w percepcji kontrastu, która zależy od przestrzennego rozkładu obszarów jasnych i ciemnych. Wrażliwość oka na luminancję i kontrast stanowi podstawę założeń użytych przy tworzeniu standardów wykorzystywanych w prezentacji obrazu na monitorach.

1.2 Podstawowe przestrzenie barw

Światło widzialne jest promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fali 380–780 nm. Barwa światła jest określona przez jego widmo, czyli funkcję opisującą rozkład energii niesionej przez światło w zależności od długości fali. Przestrzenie barw są to matematyczne modele, w których widma fal elektromagnetycznych zostały przedstawione w postaci trójwymiarowej przestrzeni barw. Taka definicja tego zagadnienia umożliwia opisanie poszczególnych barw przez modele zbliżone do ludzkiej percepcji barw, która związana jest z opisaną w poprzednim rozdziale fizjologią ludzkiego oka. Do określenia koloru potrzebne jest oprócz samego parametrycznego modelu - jego powiązanie z przestrzenią rzeczywistych kolorów,

a więc określenie jakiej fizycznej długości fali świetlnej odpowiada dany punkt w danym układzie. W rozdziale omówione zostały cztery przestrzenie barw: RGB, CMYK, CIEXYZ oraz HSV [3]. Są to modele, które zostały ujęte w normach międzynarodowych i znajdują one odzwierciedlenie w zastosowaniach technicznych.

Przestrzeń RGB to model opisywany współrzędnymi R, G, B. Wybór za podstawowe barwy czerwonej (ang. red), zielonej (ang. green) oraz niebieskiej (ang. blue) odzwierciedla właściwości percepcyjne wzroku człowieka. Zmieszanie w założonych proporcjach trzech wiązek światła o barwie czerwonej, zielonej i niebieskiej pozwala na uzyskanie wrażenia widzenia dowolnej barwy przez ludzkie oko. Równocześnie paleta RGB odpowiada sprzętowemu sposobowi generowania kolorowych obrazów na monitorze. Przestrzeń ta nie jest modelem absolutnym co oznacza, że odwzorowanie 3 liczb w przestrzeni kolorów zależy od rodzaju urządzenia reprodukującego i jego ustawień takich jak jasność czy kontrast. W modelu RGB każdej możliwej do uzyskania barwie odpowiada punkt sześcianu jednostkowego rozpiętego na osiach barw podstawowych co zostało przedstawione na rysunku 1.1.

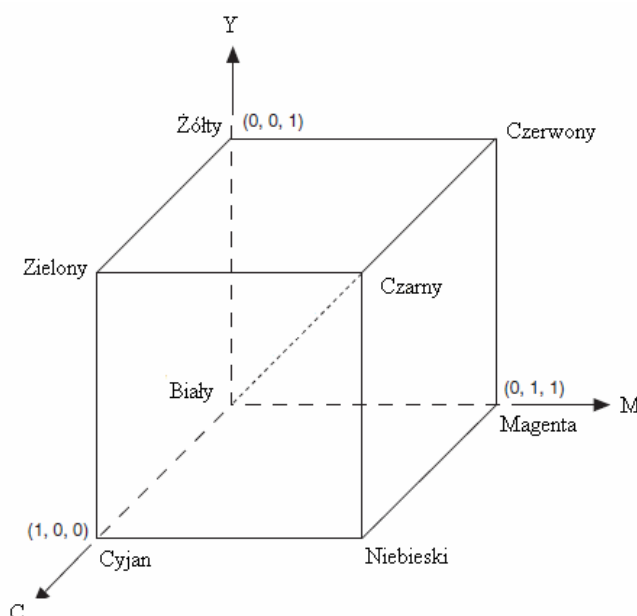


Rysunek 1.1. Prezentacja modelu RGB opisanego na sześcianie jednostkowym

Początek układu współrzędnych reprezentuje kolor czarny, wierzchołki natomiast reprezentują barwy podstawowe i barwy dopełniające. Z połączenia trzech barw podstawowych w dowolnym stosunku ilościowym można otrzymać barwy pochodne.

Przestrzeń RGB zdefiniowana jest na podstawie syntezy addytywnej, czyli zjawiska, dzięki któremu można uzyskać barwę białą poprzez złożenie składowych podstawowych o maksymalnej wartości. Złożenie składowych podstawowych o minimalnej wartości skutkuje otrzymaniem barwy czarnej. W informatyce najczęściej stosowany jest 24 bitowy zapis kolorów. Oznacza to, że na każdą ze składowych przewidziany jest 1 Bajt. Model RGB znajduje swoje zastosowanie zarówno w technice analogowej jak i cyfrowej i jest często używany w urządzeniach wyświetlających obraz. Jednym ze standardów, który powstał na bazie modelu RGB jest standard sRGB (ang. standardised Red, Green, Blue), który został opracowany przez firmę Hewlett-Packard w 1996 roku. Stanowi on jednolity standard dla wszystkich urządzeń służących do prezentacji obrazów oraz dla HTML i CSS [11].

Przestrzeń CMYK jest modelem opartym o barwy dopełniające do barw podstawowych R, G, B. Model ten odpowiada zjawisku powstawania barwy przez odbicie światła od powierzchni przedmiotów. Powierzchnia przedmiotów barwnych pochłania część spektrum padającego na nie światła, a światło odbite docierające do obserwatora wywołuje w oku wrażenie koloru. Model ten służy do określania kolorów obrazu na ploterach i drukarkach. Podobnie do poprzedniego modelu RGB, tak i ten można określić na podstawie sześcianu jednostkowego przedstawionego na rysunku 3.2.

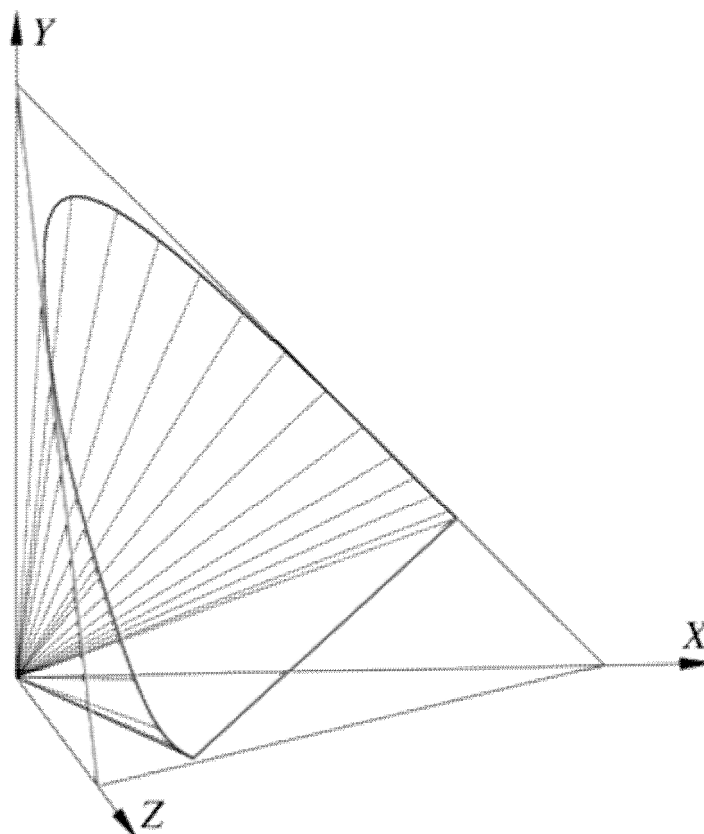


Rysunek 1.2. Prezentacja modelu CMYK opisanego na sześcianie jednostkowym

W tej przestrzeni osie układu odpowiadają barwom C (ang. cyan), M (ang. magenta), Y (ang. yellow). Początek układu współrzędnych określa barwę białą. Maksymalne

wartości składowych barw podstawowych dają barwę czarną. W praktyce nie absorbują one łącznie wszystkich długości widzialnych fal, dlatego stosuje się dodatkowo kolor czarny. W tym modelu znajduje zastosowanie zjawisko syntezy subtraktywnej, czyli zjawisko, dzięki któremu można uzyskać barwę czarną poprzez złożenie składowych podstawowych o maksymalnej wartości.

Przestrzeń CIE XYZ to trójchromatyczny model barw, który został opracowany w 1931 roku przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową CIE. Stanowi on rozwinięcie układu CIE RGB. System CIE XYZ wykorzystuje współrzędne trójchromatyczne do zdefiniowania poszczególnej barwy. Współrzędne trójchromatyczne odpowiadają procentowemu udziałowi trzech podstawowych barw R (czerwonej), G (zielonej) i B (niebieskiej). Współrzędne X, Y to współrzędne chromatyczności a współrzędna Z to luminancja. Kolory widzialne w przestrzeni CIE XYZ zawarte zostały w bryle o kształcie zbliżonym do stożka o wierzchołku w początku układu współrzędnych (rysunek 1.3).



Rysunek 1.3. Bryła barw widzialnych w układzie CIE XYZ [13]

W praktycznych zastosowaniach stosuje się tzw. wykres chromatyczności uzyskiwany poprzez rzutowanie płaszczyzny $x+y+z=1$, która przecina bryłę CIE XYZ, na

płaszczyznę $Z = 0$. Diagram CIE pozwala mierzyć nasycenie barwy, określać odpowiadającą jej dominującą długość fali oraz znajdować barwy dopełniające. Wyjaśnia on również dlaczego dowolna skończona liczba barw podstawowych nie może dać pełnej gamy barw widzialnych. Opisany model był bazą do stworzenia przestrzeni CIElab, która jest matematyczną transformacją przestrzeni CIE XYZ. Model CIE LAB jest obecnie jednym z najczęściej stosowanych w informatyce. Służy on m.in. do zarządzania barwą w profilach ICC i stanowi podstawę współczesnych systemów zarządzania barwą [3].

Przestrzeń HSV (ang. Hue Saturation Value) jest to model stworzony w 1978 roku przez Alveya Raya Smitha. W odróżnieniu od przestrzeni barw opartych na mieszanii kolorów podstawowych, w modelu HSV zastosowano opis barwy posiadający bardziej intuicyjną formę. W celu określenia barwy, należy najpierw zdefiniować barwę spektralną, a następnie podać ilość czerni i bieli, które muszą zostać dodane do barwy spektralnej, aby otrzymać końcowy kolor. Przestrzeń HSV można przedstawić w reprezentacji trójwymiarowej jako stożek lub ostrosłup foremny o podstawie sześciokąta. Wierzchołki podstawy odwzorowują barwy spektralne, natomiast środek podstawy to barwa biała. Wysokość ostrosłupa służy do określenia ilości czerni dodanej do poszczególnego koloru, tak aby ostatecznie otrzymać barwę wynikową. Przestrzeń barw HSV odwołuje się do właściwości ludzkiego wzroku, który wszystkie barwy identyfikuje jako światło pochodzące z otoczenia.

Każde urządzenie takie jak monitor, drukarka czy aparat cyfrowy, ze względów technologicznych i konstrukcyjnych w różny sposób interpretuje różne barwy. Równocześnie ludzki wzrok jest w stanie zarejestrować miliardy kolorów, a przestrzenie barw zawierają ich ograniczoną ilość. Stwarza to problem z wiernym odwzorowaniem obrazu przy konwersji z jednej przestrzeni barw do innej. W związku z tym powstały różne algorytmy, których celem jest jak najlepsze odwzorowanie barw z różnych modeli. Przykładem tego może być transmisja obrazów w telewizji, gdzie stosuje się układ YIQ, w którym podaje się wartość luminancji Y i dwie wartości chrominancji, I, Q. Poniższe równanie ilustruje model matematyczny konwersji z układu RGB do YIQ.

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.144 \\ 0.596 & -0.275 & 0.321 \\ 0.212 & -0.528 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

1.3 Technologie wyświetlania obrazu

W rozdziale tym zostaną scharakteryzowane podstawowe rodzaje wyświetlaczy wykorzystywanych w monitorach komputerowych i telewizorach. Przedstawione zostaną technologie CRT, Plazma oraz LCD. Główna uwaga zostanie poświęcona ekranom LCD, gdyż ekran taki został użyty w procesie kalibracji, który jest przedmiotem pracy.

Najstarsza i do niedawna najpopularniejsza technologia wyświetlania obrazu to CRT (ang. Cathode-Ray Tube), czyli kineskop z działem elektronowym. Głównymi elementami wyświetlacza zbudowanego w tej technologii są kineskop zawierający trzy działa elektronowe oraz warstwa światłoczuła zwana luminoforem. Zasada jego działania opiera się na emitowaniu przez działa elektronowe wiązek elektronów dla trzech kolorów podstawowych przestrzeni barw RGB. Są one następnie odchylane przez cewki oraz przyspieszane przez anodę. Wiązki uderzają w ekran pokryty luminoforem powodując jego świecenie. Trzy punkty powstałe z trzech wiązek tworzą piksel. Zaletą kolorowych ekranów wykonanych w technologii CRT jest szeroka gamma kolorów oraz duża gradacja odcieni [6]. Równocześnie obraz wyświetlany na ekranie wygląda tak samo niemal z każdego kąta pod jakim obserwowany jest wyświetlacz. Warto również zaznaczyć, że ekran kineskopowy potrafi wyświetlać obrazy o różnej rozdzielczości z taką samą ostrością. Do wad tej technologii należy zaliczyć: zniekształcenia geometryczne, niską rozdzielczość, duże gabaryty (zwłaszcza głębokość), jonizację powietrza, starzenie się luminoforu, generowanie zakłóceń elektro-magnetycznych, wpływ pola magnetycznego na obraz, duże zużycie energii w stosunku do innych wyświetlaczy oraz fakt emisji szkodliwego dla zdrowia promieniowania.

Kolejną technologią wyświetlania obrazu są wyświetlacze plazmowe. Zbudowane są one z dwóch szklanych płyt pomiędzy którymi znajdują się komory z mieszaniną gazów (głównie ksenon i neon), które wyłożone są luminoforem. W skład ekranu wchodzi również elektrody sterujące oraz warstwa izolatora. Ogólna zasada działania

polega na doprowadzeniu mieszaniny gazów poprzez elektrody sterujące do stanu plazmy. W tym stanie zjonizowany gaz zaczyna emitować fotony światła ultrafioletowego, które z kolei pobudzają luminofory do emisji światła widzialnego. Na jeden piksel skład się trzy komory, w których umieszczone są luminofory dla trzech podstawowych barw przestrzeni barw RGB. Do zalet tej technologii można zaliczyć szeroki kąt widzenia porównywalny z ekranami CRT, bardzo dobry współczynnik kontrastu oraz dużą głębię czerni. Jako wadę wymienić należy większe zużycie prądu niż w przypadku wyświetlaczy LCD. Kolejną wadą są trudności techniczne związane z budową małych ekranów.

Technologią najbardziej interesującą z punktu widzenia tematu pracy jest wyświetlacz ciekłokrystaliczny, LCD (ang. Liquid Crystal Display). Opiera ona swoje działanie na zmianie polaryzacji światła powstałej na skutek zmian orientacji ciekłego kryształu, przy użyciu pola elektrycznego. Ciekły kryształ jest to stan pośredni pomiędzy dwoma stanami skupienia materii: ciekłym i stałym. W związku z tym posiada on właściwości charakterystyczne dla obydwu stanów. Z jednej strony ciekłe kryształy są zbliżone do cieczy, gdzie brak sztywnej sieci krystalicznej skutkuje brakiem sprężystości kształtu i umożliwia płynięcie. Równocześnie stan ten posiada strukturalne własności ciał stałych. Wykazuje więc anizotropię własności fizycznych, co oznacza, że wielkości fizyczne mierzone w różnych kierunkach przyjmują różne wartości. Jednym z problemów związanym z ciekłymi kryształami jest ich wrażliwość na temperaturę – wraz z jej spadkiem czas reakcji substancji może wzrosnąć [1]. Cząstki substancji ciekłokrystalicznych mają wydłużony kształt, a ich rozmieszczenie przestrzenne, definiujące właściwości fizyczne, jest podstawą podziału ciekłych kryształów na następujące typy:

- a) faza emetyczna – cząsteczki nie zajmują uporządkowanych pozycji, ale mają tendencję do ustawiania się w tym samym kierunku,
- b) faza semektyczna – cząsteczki układają się w płaszczyzny, które ograniczają ich ruch,
- c) faza cholerystyczna – cząsteczki są ułożone jak w fazie emetycznej oraz kolejne warstwy są skręcone o pewien kąt, czego wynikiem jest powstanie struktury śrubowej.

Dzięki swoim właściwościom ciekłe krysztaly znalazły zastosowanie szczególnie w produkcji wyświetlaczy LCD. W technologii ekranów ciekłokrystalicznych, wyświetlacze składają się z cienkiej warstwy ciekłego krysztalu, szklanego podłoża, elektrod zmieniających orientację krysztalu, dwóch warstw polaryzacyjnych, które są prostopadłe względem siebie oraz z źródła światła. Dwie prostopadłe do siebie elektrody tworzą piksel. Jeśli na elektrodach nie występuje różnica potencjałów, cząsteczki ciekłego krysztalu zostają uporządkowane w taki sposób, który powoduje zmianę polaryzacji światła pochodzącego ze źródła o 90 stopni. Efektem tego światło spolaryzowane w odpowiedni sposób może przejść przez analizator. W wypadku występowania na elektrodach różnic potencjałów, ciekły krysztal zmienia swoje uporządkowanie i nie polaryzuje światła, skutkiem czego jest powstanie obrazu czarnego. Można więc powiedzieć, że emisja światła przez poszczególne piksel zależy od przyłożonego napięcia. Ciekłe krysztaly nie świecą samoistnie. Są one jedynie filtrem światła zewnętrznego. Dlatego w wyświetlaczach LCD potrzebne jest dodatkowe źródło światła. Możemy wyróżnić trzy sposoby oświetlenia matrycy:

- transmisyjny, w którym matryca podświetlana jest od spodu,
- refleksyjny, w którym światło padające na matrycę jest odbite przez lustro znajdujące się za matrycą,
- transrefleksyjny, w którym za matrycą znajduje się warstwa refleksyjna oraz dodatkowe źródło światła.

W przypadku wyświetlaczy kolorowych, każdy z pikseli składa się z trzech subpikseli, które posiadają odpowiednie filtry kolorów. W technologii LCD przyjęto przestrzeń barw RGB, zatem filtry odpowiadają za kolory czerwony, zielony i niebieski.

Matryce LCD ze względu na sposób adresowania dzielą się na dwa rodzaje. W przypadku matryc pasywnych piksel znajduje się na przecięciu linii danych z linią adresową. Na odpowiedniej linii adresowej ustawione zostają wszystkie linie danych. Załączaniu podlegają całe wiersze pikseli. Zasada działania matryc aktywnych opiera się na podobnym schemacie jak w przypadku matryc pasywnych, ale do każdej komórki przypisany jest dodatkowo tranzystor oraz kondensator, których celem jest zapamiętanie stanu pikseli. Wybranie odpowiedniej linii adresowej powoduje włączenie wszystkich tranzystorów z nią związanych, co umożliwia sterowanie poszczególnymi pikselami.

Aktualnie możemy wyróżnić trzy najpopularniejsze rodzaje produkowanych matryc. Różnice pomiędzy nimi związane są z osią obrotu ciekłych kryształów. Są to:

- a) matryca TN (ang. Twisted Nematic) – w której cząsteczki ciekłych kryształów obracają się wokół osi równoległej do powierzchni szklanej. Takie uporządkowanie cząsteczek powoduje, że matryca ma dobry czas reakcji, ale równocześnie wyświetla obraz gorszej jakości oraz ma mały zakres kątów widzenia;
- b) matryca MVA (ang. Multi-domain Vertical Aligment) – w tym rozwiązaniu cząsteczki poukładane są w większym porządku niż w wypadku matryc TN oraz każdy piksel podzielony jest na strefy, które widziane są pod różnymi kątami. Efektem tego jest duży kąt widzenia oraz dobra jakość kolorów, kosztem dłuższego czasu reakcji;
- c) matryca IPS (ang. In Plane Switch) – cząsteczki ciekłych kryształów w tej technologii obracają się wokół osi prostopadłej do wyświetlacza, czyli są zawsze równoległe do powierzchni szklanej. W rezultacie uzyskuje się dużo lepsze kąty widzenia oraz lepszą głębię czerni. Wadą tego rodzaju matryc jest długi czas reakcji oraz duży pobór mocy.

Poszczególne rodzaje wyświetlaczy LCD różnią się od siebie i nie można jednoznacznie stwierdzić, który z nich ma najlepsze właściwości. Przewaga poszczególnych rozwiązań może zależeć od sposobu wykorzystania wyświetlacza. Aktualnie najbardziej popularną technologią jest matryca TN.

Na zakończenie warto wspomnieć o dwóch przyszłościowych technologiach stopniowo wdrażanych do produkcji. Pierwsza z nich to OLED (ang. Organic Light-Emitting Diode). Zasada działania tego typu wyświetlaczy opiera się na pozyskiwaniu światła z organicznych polimerów. Jeśli umieści się polimer pomiędzy dwoma elektrodami, na których występuje różnica potencjałów, możliwy jest przepływ prądu oraz towarzyszące temu zjawisko emisja światła. Na pojedynczy piksel wyświetlacza OLED składają się cztery subpiksele, czyli diody świecące w trzech kolorach podstawowych oraz czwarta dioda emitująca najczęściej światło zielone lub białe. Zaletą tej technologii jest z pewnością jakość otrzymywanych kolorów, a w szczególności głębi czerni. Równocześnie ekrany tego typu charakteryzują się szerokim kątem widzenia oraz krótkim czasem reakcji. Jako podstawową wadę należy

wymienić trwałość diod wykorzystanych do budowy wyświetlacza. Drugą z technologii to IGZO, która została zaprezentowana przez firmę SHARP. Do produkcji ekranów wykorzystuje się w tym wypadku materiał półprzewodnikowy oparty o indowo-galowy tlenek cynku. Dzięki temu tranzystory są dużo mniejsze niż w pozostałych matrycach ciekłokrystalicznych. W związku z tym możliwe jest wyświetlenie na ekranie obrazu o bardzo wysokiej rozdzielczości. Równocześnie wyświetlacze wykonane w technologii IGZO charakteryzują się zredukowanym poziomem szumów co jest szczególnie istotnie w urządzeniach dotykowych, w których zakłócenia generowane przez aktywne matryce utrudniają działanie panelu dotykowego.

1.4 Podstawowe parametry charakteryzujące wyświetlacz

Do przeprowadzenia analizy związanej z kalibracją ekranu, niezbędne jest scharakteryzowanie kilku najważniejszych parametrów opisujących właściwości wyświetlaczy. Są to podstawowe parametry, które prezentują najważniejsze cechy monitorów i stwarzają możliwości do porównania ze sobą różnych technologii, bądź też odniesienia się do ogólnie przyjętych standardów. Z punktu widzenia problematyki tej pracy najważniejszym parametrem jest współczynnik gamma, który został omówiony w kolejnym podrozdziale. Kolejną ważną cechą monitora jest luminancja nazywana również jasnością, która łączy się bezpośrednio z pojęciem krzywej gamma. Innymi parametrami, które należy scharakteryzować to: kąt widzenia, czas reakcji, kontrast, głębia koloru i częstotliwość odświeżania. W przypadku wyświetlaczy ciekłokrystalicznych pojawia się również problem głębi czerni.

Luminancja jest fizyczną wielkością fotometryczną, która określa natężenie oświetlenia padającego w danym kierunku. Jednostką opisującą tę zależność fizyczną jest kandela na metr kwadratowy (cd/m^2), nazywana też nit (nt). Rekomendowaną wartością luminancji dla ekranów LCD, przy normalnych warunkach oświetleniowych jest $120 \text{ cd}/\text{m}^2$. W rzeczywistości jednak domyślna jasność wyświetlaczy jest dużo większa, dlatego też jest to jeden z podstawowych parametrów wymagających kalibracji. Równocześnie należy zauważyć, że ekran LCD świeci z różną jasnością w różnych punktach.

Kąt widzenia jest parametrem powiązaniem z faktem, że w przypadku niektórych typów wyświetlaczy LCD, jasność obrazu silnie zależy od kąta, pod jakim patrzy się na

ekran. Zostało przyjęte, że kąt widzenia ograniczony jest przez kąty, dla których kontrast monitora spada do wartości 10:1. Typowe wartości dla wyświetlaczy LCD wahają się w granicach 170 stopni dla płaszczyzny poziomej oraz 160 stopni dla płaszczyzny pionowej. W związku z charakterystycznym ułożeniem cząsteczek ciekłych kryształów, a co za tym idzie pikseli, obraz wyświetlany na ekranie może być jaśniejszy lub ciemniejszy zależnie od miejsca, z którego obserwuje się matrycę.

Czas reakcji zdefiniowany jest jako suma czasów narastania t_r oraz opadania t_f . Czas narastania jest to czas jaki niezbędny jest, ażeby pojedynczy piksel zmienił kolor z czarnego na biały, natomiast czas opadania jest to czas jak musi upłynąć zanim piksel zmieni kolor z białego na czarny. Czasami przyjmuje się definicję, że jest to czas przejścia piksela o kolorze szarym do stanu zgaszonego, a następnie powrót do koloru szarego. Jednak taka definicja jest rzadko stosowana, gdyż ciężko jest jednoznacznie zinterpretować poziomy szarości pochodzące z różnych wyświetlaczy. Czas reakcji definiuje się ze względu na możliwość wystąpienia efektu smużenia, podczas wyświetlania dynamicznego obrazu. Typowe wartości tego parametru dla monitorów LCD to czasy mniejsze niż 10 ms.

Kontrast to parametr, który zdefiniowany jest jako stosunek luminancji maksymalnej do luminancji minimalnej. Inaczej mówiąc, jest to iloraz luminancji najjaśniejszego i najciemniejszego piksela wyświetlanego na danym ekranie. Im większy kontrast danego ekranu, tym lepszą jakość ma wyświetlany obraz. Aktualnie nie istnieje żaden oficjalny standard, który definiowałby współczynnik kontrastu oraz sposób jego pomiaru. Skutkiem tego trudno jest porównywać ze sobą wyświetlacze różnych producentów, gdyż każdy z nich przyjmuje własne metody pomiarowe. Można się również spotkać z pojęciem kontrastu dynamicznego, który jest zależnością czasową ilorazu białego i czarnego piksela. Parametr ten osiąga większą wartość niż kontrast statyczny dla tego samego ekranu. Typowe wartości dla wyświetlaczy LCD wynoszą 1200:1 dla kontrastu statycznego oraz 3000000:1 dla kontrastu dynamicznego.

Głębia koloru jest parametrem opisującym to jak dużo kolorów jest w stanie wyświetlić dany ekran. Zagadnieniem bezpośrednio związanym z tym parametrem jest zdolność monitora do reprodukcji tych barw. W zależności od wyświetlacza, prezentowane kolory mogą różnić się od oczekiwanych. Głębia koloru zależy od tego, ile dany ekran przeznacza bitów na zapis każdej z trzech barw podstawowych przestrzeni barw RGB. W przypadku pierwszych ekranów LCD, na każdą ze

składowych przeznaczonych było 6 bitów (łącznie 18 bitów), co dawało razem 262144 możliwych kolorów. Najbardziej popularną metodą zapisu barw jest 8 bitów na każdą z barw podstawowych, czyli 3 Bajty do zapisu jednego piksela. W tym przypadku można otrzymać ok. 16.7 milionów kolorów. W profesjonalnych monitorach, używanych do pracy z grafiką, można spotkać się z 10-bitową głębią koloru, co umożliwia wyświetlenie ok. 1.07 miliarda różnych barw.

Częstotliwość odświeżania jest to ilość klatek wyświetlanych na ekranie w ciągu jednej sekundy. Parametr ten ma jednak różne znaczenie w przypadku wyświetlaczy CRT oraz LCD. W telewizorach kineskopowych obraz tworzony jest poprzez wiązkę elektronów tyle razy ile wynosi częstotliwość odświeżania. Dla zbyt niskich wartości tego parametru może wystąpić efekt mrugania ekranu, który jest szkodliwy dla organizmu człowieka. Przyjmuje się, że efekt ten nie występuje dla częstotliwości odświeżania większej niż 75 Hz. W przypadku monitorów LCD, piksel nie „gaśnie”, co wynika z właściwości podświetlenia matrycy i sterowania poszczególnymi pikselami. W związku z tym migotanie ekranu nie jest widoczne nawet dla małych częstotliwości. Ekran LCD wyświetla obraz w sposób ciągły zatem zbyt duża częstotliwość odświeżania może mieć wpływ na płynność obrazu oraz może powodować smużenie. Najczęściej spotykane wartości tego parametru dla ekranów LCD to 60 Hz oraz 120 Hz.

W założeniach teoretycznych, czarny piksel wyświetlany na ekranie, powinien emitować światło o luminacji 0.0 cd/m^2 . Zależność ta znajduje swoje odzwierciedlenie w przypadku wyświetlaczy kineskopowych. Ze względu na właściwości ciekłych kryształów, w ekranach LCD nie występuje zjawisko całkowitego gaśnięcia pikseli. W związku z tym niezbędne było zdefiniowanie parametru nazywanego poziomem czerni. Określa on luminancję monitora, przy wyświetlaniu na nim barwy czarnej. Wielkość ta znajduje swoje odzwierciedlenie również, przy wykreślaniu krzywej gamma. Problem głębi czerni jest jednym z czynników warunkujących dalszy rozwój wyświetlaczy LCD. Powstają coraz to nowsze technologie mające na celu zniwelowanie tego efektu i zapewnienie użytkownikowi jak najwyższej jakości prezentowanego obrazu.

1.5 Współczynnik Gamma

W podrozdziale 1.1 opisana została zależność określona prawem Webera-Fechnera mówiąca o tym, że percepcyjna odpowiedź człowieka na intensywność wrażenia jest wyraźnie niejednorodna. Jeśli chce się efektywnie wykorzystać zastosowanie ograniczonej liczby bitów jaka używana jest do zapisu koloru pojedynczego piksela to własność ta musi znaleźć odzwierciedlenie w technice wyświetlania obrazów. W grafice komputerowej i fotografii występuje współczynnik gamma (γ), który definiuje nieliniową zależność pomiędzy poziomem jasności pikseli, a luminancją urządzenia wyświetlającego obraz.

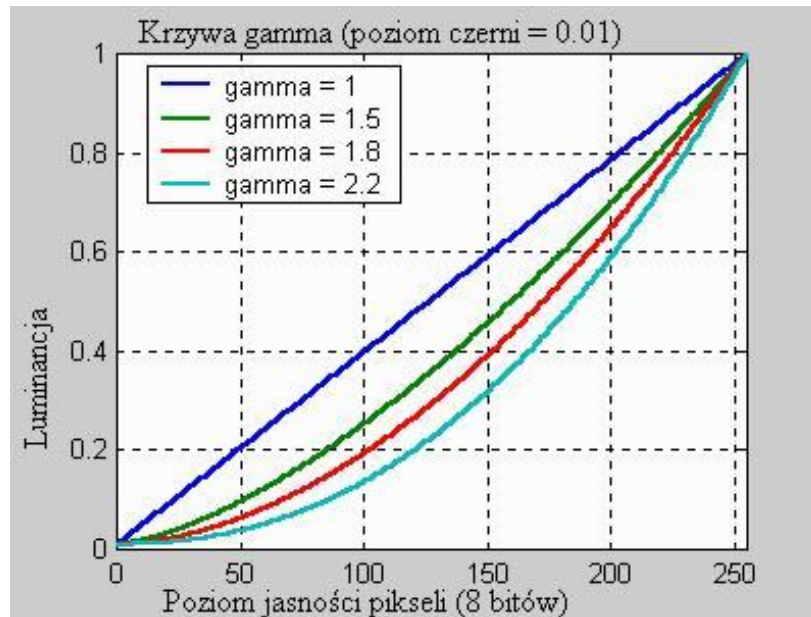
Współczynnik gamma jest jednym z podstawowych parametrów, które są definiowane podczas kalibracji monitorów. Ma on szczególny wpływ na odbiór wyświetlanych kolorów. W przypadku monitorów CRT przyjęło się, że model, który opisuje zależność pomiędzy jasnością pikseli, a luminancją wyraża się wzorem [3]:

$$L = (AV + B)^\gamma \quad (1)$$

gdzie L oznacza znormalizowaną luminancję wyświetlacza, V jest znormalizowanym poziomem jasności pikseli, γ reprezentuje wartość określającą nieliniową zależność, natomiast A i B są odpowiednio wartościami zysku i offsetu sygnału wejściowego. Najczęściej spotykana wartością współczynnika gamma, dla tego typu monitorów to 2.5. Równocześnie należy tutaj zaznaczyć, że gamma może zmieniać się w czasie i przyjmować wartości z zakresu 2.35-2.55 [6]. W odróżnieniu od monitorów CRT, wyświetlacze LCD posiadają liniową charakterystykę stosunku sygnału wejściowego do wyświetlanej luminancji. W związku z tym wyposażone są one w dodatkowe układy scalone, które mają za zadanie zmienić liniową charakterystykę wyświetlacza na nieliniową, kompensującą właściwości ludzkiej percepcji. W przypadku ekranów LCD przyjęło się, że zależność opisująca, krzywą gamma ma postać [3]:

$$L = V^\gamma + B \quad (2)$$

gdzie L to luminancja, V to znormalizowany poziom jasności pikseli, a B to poziom czerni. Standardowo w systemach operacyjnych Windows przyjęty jest współczynnik gamma +2.2, a w urządzeniach firmy Apple +1.8. Natomiast w przypadku monitorów, zależnie od producenta i konstrukcji, wymagają one faktycznego współczynnika z przedziału 1.1-2.9. Na rysunku 1.4 przedstawione zostały przykładowe idealne krzywe gamma, z przyjętym poziomem czerni równym 0.01.



Rysunek 1.4. Idealne krzywe luminancji dla typowych wartości gamma, z uwzględnieniem poziomu czerni [12]

Zależność (2) ma uproszczoną postać, ze względu na ułatwienie implementacji w systemach operacyjnych i w grafice wykorzystywanej przy tworzeniu stron internetowych. Jednakże zgodnie ze standardem sRGB, zależność opisująca krzywą gamma przyjmuje postać:

$$L = \begin{cases} V/12.92 & 0 \leq V \leq 0.03928 \\ ((0.055 + V)/1.055)^\gamma & 0.03928 < V \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

W tym wypadku wartość gamma to 2.4. Krzywe otrzymane z (2) i (3) są bardzo zbliżone do siebie. W standardzie sRGB zależność ma liniowy charakter dla poziomu jasności pikseli równego 10, przy założeniu, że każda ze składowych zapisana jest na 8 bitach, czyli dla koloru białego wartość ta wynosi 255. Różnice pomiędzy (2) i (3) możemy zaobserwować dla poziomu jasności pikseli równego 5 ($V = 0.0196$). Dla (3) luminancja przyjmuje wartość 0.00152, natomiast dla (2) 0.000175. Różnice te wynikają z uwzględnienia w standardzie sRGB poziomu czerni.

Aktualnie większość standardów przyjmuje, że do zapisu każdej ze składowych palety RGB wykorzystywane jest 8 bitów. Jeśli przyjęto by liniową zależność między poziomem jasności pikseli, a luminancją monitora ($\text{gamma} = 1$), wtedy relatywne różnice luminancji dla najjaśniejszych pikseli byłyby mniejsze niż $1/255$. Ludzkie oko nie byłoby w stanie zauważyć żadnych różnic dla jasnych obrazów. Równocześnie różnice byłyby zauważalne w postaci widocznych „skoków” dla niskich poziomów

jasności pikseli, bliskich kolorowi czarnemu. Wykładnicza krzywa gamma kompensuje ten efekt, gdyż w tym wypadku różnice w wartościach luminancji są najmniejsze dla barw ciemnych i rosną stopniowo dla coraz jaśniejszych pikseli.

1.6 Sprzętowe i programowe metody kalibracji monitorów

Kalibracja jest zagadnieniem, które często pojawia się podczas dyskusji o monitorach lub telewizorach. Równocześnie rozważa się dwa bezpośrednio związane ze sobą aspekty. Czy dany ekran w prawidłowy sposób odwzorowuje wszystkie parametry obrazu, przy zachowaniu domyślnych ustawień oraz w jaki sposób ekran odwzorowuje te parametry po przeprowadzeniu kalibracji? Dopiero porównanie ze sobą tych dwóch sytuacji może dać informację o rzeczywistych właściwościach danego wyświetlacza. Istnieją zarówno sprzętowe jak i programowe metody kalibracji ekranów. Należy sobie jednak zdać sprawę, że uzyskanie zadawalających rezultatów możliwe jest jedynie z wykorzystaniem specjalistycznych urządzeń pomiarowych, takich jak kolorymetry lub spektrofotometry. Metody programowe opierają się głównie na metodach wzrokowych, więc wyniki takich kalibracji mogą być wypaczone ze względu na subiektywność oceny dokonywanej przez zmysł wzroku. Dlatego też główna uwaga zostanie poświęcona sprzętowym metodom kalibracji ekranów.

Jak zostało to opisane wcześniej, użycie w wyświetlaczach LCD addytywnej metody tworzenia barw powoduje, że podstawowe ustawienia kolorów nie sprawiają dużych trudności. Jednakże ze względu na specyficzne właściwości cząsteczek ciekłych kryształów, kalibracja dająca dobre rezultaty jest trudna do przeprowadzenia. Czynniki powodujące trudności to [1]:

- a) odbiór kolorów i postrzegana jasność jest zależna od kąta, z którego obserwowany jest ekran,
- b) niezerowa luminancja dla idealnej czerni,
- c) dokładność urządzeń pomiarowych może zależeć od polaryzacji światła,
- d) występowanie przesłuchów pomiędzy pikselami,
- e) zależność właściwości ciekłych kryształów od temperatury,

- f) zależność funkcji luminancji i napięcia od materiałów, z których wykonany jest wyświetlacz.

Najbardziej popularnymi urządzeniami służącym do przeprowadzenia sprzętowej kalibracji monitora są kolorymetry. Jest to urządzenie, którego działanie jest w pewnym stopniu analogiczne do zasady funkcjonowania oka. Posiada ono trzy niezależne czujniki służące do analizy trzech barw podstawowych. Każdy z czujników składa się z fotodiody oraz z filtru, którego celem jest przepuszczenie tylko tego zakresu fal, który odpowiada danej barwie. Zazwyczaj w urządzeniach tego typu znajduje się dodatkowa fotodioda, bez żadnego filtru, która mierzy ogólną luminancję dla wszystkich długości fal światła widzialnego, co poprawia znacząco dokładność pomiaru. Ważną cechą kolorymetru, jest to, że mierzy on jedynie światło emitowane (np. przez monitor), ponieważ nie posiada on własnego źródła światła. Tak zbudowane urządzenie dostarcza trzy impulsy elektryczne, które następnie są analizowane przez oprogramowanie dołączone do kolorymetru. W efekcie otrzymuje się wykres w przestrzeni CIELab, który umożliwia analizę i zmianę ustawień monitora. Przykładem takiego urządzenia może być *il Eye-One Display 2* firmy *X-Rite*. Jest to kompaktowy kolorometr służący do pomiarów parametrów wyświetlaczy CRT i LCD, który charakteryzuje się dużą czułością zwłaszcza dla pomiarów ciemnych barw. Czas podstawowej kalibracji i zmiany ustawień, przy pomocy tego urządzenia to około 15 min.

Spektrofotometr jest urządzeniem dużo bardziej zaawansowanym technicznie, a co za tym idzie dokładniejszym oraz droższym. Przyrząd ten wyposażony jest w wewnętrzne wzorcowe źródło światła, względem którego dokonuje się pomiaru rozkładu natężenia promieniowania światła w widmie badanego obiektu. Wiązka światła, która jest rejestrowana przez spektrofotometr zostaje rozszczepiona i skierowana na linię kilkudziesięciu sensorów mierzących luminancję. Czujniki rozmieszczone są w taki sposób, aby wiadomo było jaką część widma światła mierzą. W efekcie nie istnieje konieczność montażu odpowiednich filtrów, tak jak w kolorymetrze. Luminancja zmierzona poprzez poszczególne czujniki zostaje poddana odpowiedniej analizie. W wyniku otrzymuje się zestaw wartości opisujących całe widmo mierzonego światła. Wartości te przeliczane są następnie na wartości użyteczne w przestrzeni barw CIELab. Przykładem spektrofotometru jest urządzenie *il Pro* firmy *X-rite*. Posiada ono rozdzielczość widmową 10 nm i mierzy fale z zakresu 380 – 730 nm, czyli dostarcza zestaw 36 liczb. Rozdzielczość taka jest wystarczająca do

przeprowadzenia kalibracji urządzeń profesjonalnych, używanych na przykład przez fotografów. Wadą tego urządzenia jest to, że zakres luminancji, którą jest ono w stanie zmierzyć to 0.2 - 300 cd/m². W związku z tym pomiar może być niedokładny dla barw zbliżonych do idealnej czerni. Jednak należy pamiętać, że spektrofotometr jest urządzeniem dużo bardziej zaawansowanym technicznie niż kolorymetr, a co za tym idzie umożliwia dużo dokładniejszą kalibrację. Posiada także dużo dodatkowych funkcji, które pozwalają na konfigurację optymalnych parametrów monitora.

Istnieją również pewne programowe metody kalibracji urządzeń wyjściowych. Opierają się one głównie na subiektywnej ocenie obserwatora, zatem nie mogą być dokładne. Stosowane są raczej w nieprofesjonalnym wykorzystaniu monitorów. Jeżeli jednak chce się dokonać dokładnej kalibracji należy posłużyć się jednym z opisanych urządzeń. W przypadku kalibracji programowej należy na przykład tak zmodyfikować ustawienia monitora, ażeby możliwe było odróżnienie od siebie wszystkich możliwych 16 odcieni szarości widocznych na wzorcowym obrazie. Innym testem jest obraz z czarnym tłem, na którym umieszczone są 4 kropki o ciemnych odcieniach szarości. Służy on do ustawienia optymalnej krzywej gamma. Współczynnik należy ustawić w taki sposób, aby były widoczne 3 kropki, a czwarta, nieznacznie odcinała się od tła [12]. Trzeba jednak jeszcze raz podkreślić, że są to metody bardzo niedokładne, a ich efekty są różne w zależności od osoby wykonującej testy. Dokładna kalibracja możliwa jest jedynie z wykorzystaniem profesjonalnych urządzeń, wyposażonych w odpowiednie oprogramowanie i przy uwzględnieniu odpowiednich warunków laboratoryjnych.

2 Implementacja

W rozdziale tym omówione zostaną wszystkie aspekty związane z praktyczną realizacją tematu. Opisana zostanie budowa oraz zasada działania fotometru. Scharakteryzowane zostaną urządzenia wykorzystane w procesie tworzenia aplikacji, takie jak wzorcowe wyświetlacze i spektrofotometr ColorMunki. Przedstawiony zostanie schemat działania programu oraz metody jego implementacji. Omówiona zostanie również instrukcja obsługi aplikacji.

2.1 Budowa i zasada działania fotometru

Przed przystąpieniem do opisu działania aplikacji niezbędne jest omówienie budowy fotometru. Został on zaprojektowany i zbudowany przez pracowników i studentów Katedry Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. W skład urządzenia wchodzi: karta do akwizycji danych NI USB-6210 firmy National Instruments, cztery sondy pomiarowe oraz układ kondycjonujący. Sensory połączone są z układem kondycjonującym za pomocą skrętki oraz złącz RJ45. Układ kondycjonujący połączony jest z kartą NI USB-6210. Karta posiada uniwersalną magistralę szeregową, co umożliwia podłączenie układu do komputera za pomocą kabla USB.

Karta NI USB-6210 jest wielofunkcyjnym modulem do akwizycji danych zasilanym poprzez port USB. Cechuje się ona dużą dokładnością pomiarów i szybkim próbkowaniem sygnału. W skład karty wchodzi: 16 wejść analogowych, 4 wejścia cyfrowe, 4 wyjścia cyfrowe oraz 2 32-bitowe liczniki. Zaletą modułu jest jego kompatybilność zarówno ze środowiskiem LabView jak i ze środowiskiem MATLAB. Służy on do pomiarów napięciowych. Wejścia analogowe pracują dla zakresu napięć od -10 V do 10 V, a ich rozdzielczość wynosi 16 bitów. Wejścia cyfrowe pracują w zakresie od 0 V do 5.25 V, natomiast wyjścia cyfrowe od 0 V do 3.8 V. Karta NI USB-6210 wchodzi w skład produktów serii M, firmy National Instruments. Seria ta, to zbiór modułów umożliwiających akwizycję danych i łączących w jednym urządzeniu zarówno wejścia i wyjścia cyfrowe oraz analogowe [7]. Dzięki temu karty z tej serii

charakteryzują się dużą funkcjonalnością, szybkością pracy oraz bezpieczeństwem. Kompatybilność oprogramowania ze środowiskiem LabView ułatwia wykorzystanie karty w przeprowadzaniu pomiarów oraz umożliwia testowanie i kalibracje modułów z serii M.

Najważniejszymi elementami układu kondycjonującego są mikrokontroler ATmega8 oraz cztery wzmacniacze sygnału LTC6910. 8-bitowy mikrokontroler ATmega8 zbudowany jest w architekturze RISC. Posiada 8 KB pamięci flash, 1 KB pamięci SRAM oraz 512 KB pamięci EEPROM. Wyposażony jest także w 8 kanałowy przetwornik analogowo cyfrowy o rozdzielczości 10 bitów. LTC6910 jest nisko-szumowym, programowalnym cyfrowo wzmacniaczem sygnału. 3-bitowa kontrola wzmocnienia umożliwia ustawienie następujących wzmocnień sygnału: 0, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 V/V. Układ ten może być wykorzystywany w systemach do akwizycji danych, układach automatycznej kontroli wzmocnienia lub do dynamicznych zmian wzmocnienia. Dzięki swoim właściwościom nisko-szumowym układ może być wykorzystywany w fotometrze.

Głównym elementem czterech sond są fotodiody BPW21 firmy OSRAM. Charakteryzują się one kątem widzenia wynoszącym 110 stopni. Powierzchnia światłoczuła diody wynosi 7.34 mm^2 . Najważniejszą cechą tego elementu jest to, że jest on przeznaczony do pracy dla długości fali elektromagnetycznej z zakresu 350 nm do 820 nm oraz jest zaadaptowany do czułości ludzkiego oka. Dzięki temu fotodioda ta może być używana jako miernik światła dziennego lub światła sztucznego. Sondy wchodzące w skład fotometru, poprzez wykorzystanie tego elementu, umożliwiają przeprowadzenie pomiarów i analiz związanych z jasnością poszczególnych barw wyświetlanych na ekranie.

Tak skonstruowany fotometr umożliwia pomiary luminancji. Cztery niezależnie działające sondy rejestrują w sposób ciągły ilość światła docierającego do fotodiod. Sygnał napięciowy przekazywany jest do układu kondycjonującego. Następnie jest on wzmacniany w układzie LTC6910. Jak wspomniano wcześniej, możliwy jest wybór 8 wartości wzmocnienia. Ciągły sygnał zostaje wysłany do karty NI USB6210. Tam jest on próbkowany z częstotliwością równą 16 KHz. Rozdzielczość przetwornika analogowo cyfrowego wykorzystywanego w karcie wynosi 16 bitów. W efekcie otrzymuje się odpowiednio wzmocniony sygnał cyfrowy. Można zatem powiedzieć, że fotometr odwzorowuje luminancję na napięcie. Urządzenie to może być przede

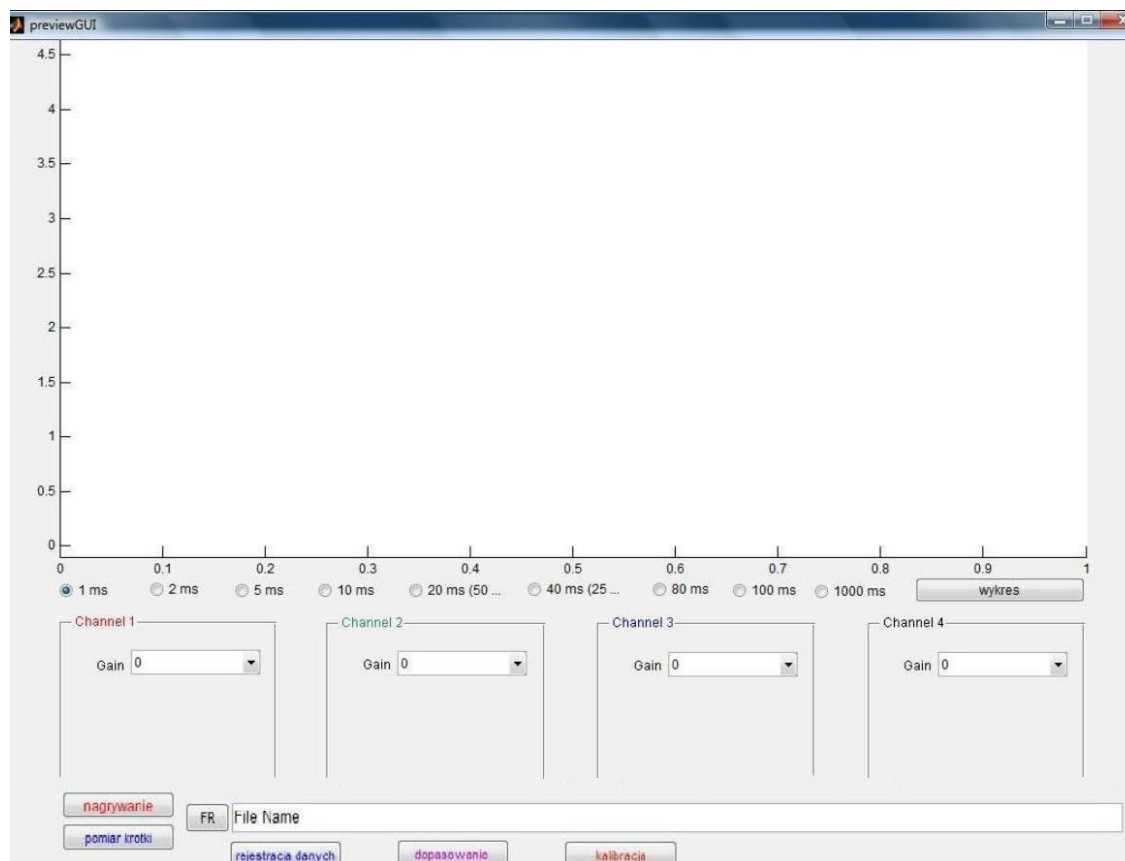
wszystkim wykorzystywane do pomiarów jasności różnych wyświetlaczy takich jak telewizory czy monitory. Dzięki zastosowaniu czterech niezależnych sond możliwa jest analiza nierównomierności luminancji w różnych punktach ekranu przy wyświetlaniu tego samego koloru. Fotometr umożliwia również zarejestrowanie przebiegów luminancji dla różnych barw, a co z tego wynika, po poddaniu danych odpowiedniej obróbce, możliwe jest wykreślenie krzywej gamma danego urządzenia. Wadą tego urządzenia jest jego słabe zabezpieczenie przed wyładowaniami statycznymi. Dlatego też należy upewnić się przed każdym użyciem fotometru i podłączeniem go do zasilania, że wszystkie wtyczki RJ45 są zatrzaśnięte oraz, że karta do akwizycji danych jest podłączona przez port USB do komputera. Innym ważnym aspektem jest to, że układ pomiarowy dla całkowicie zasłoniętych sensorów, rejestruje napięcie różne od zera. W związku z tym przed rozpoczęciem pomiarów niezbędne jest określenie na jakim poziomie kształtuje się napięcie, dla braku oświetlenia, wynikające z budowy fotometru. Można to sprawdzić poprzez zasłonięcie sensorów folią aluminiową, która nie przepuszcza fal elektromagnetycznych z zakresu światła widzialnego.

2.2 Schemat działania aplikacji

W tej części zaprezentowane zostanie działanie aplikacji. Zostaną również omówione podstawowe zagadnienia i mechanizmy, które zostały wykorzystane przy jej tworzeniu. Omówiony zostanie schemat i poszczególne etapy zaimplementowane w aplikacji oraz jej interfejs graficzny. Niezbędne jest również przedstawienie i scharakteryzowanie środowiska MATLAB, a w szczególności zestawu funkcji DAQ (ang. Data Acquisition Toolbox), służących do akwizycji danych.

Głównym celem działania aplikacji jest skalibrowanie opisanego w poprzednim rozdziale fotometru. Urządzenie to rejestruje luminancję emitowaną przez wyświetlacz i odwzorowuje ją na napięcie. Jednakże same wartości napięcia niewiele mówią o rzeczywistej jasności monitora. Jednostką, która opisuje luminancję, są cd/m^2 . W związku z tym, jeśli chce się uzyskać satysfakcjonujące rezultaty należy dokonać analizy zarejestrowanego sygnału i znaleźć odwzorowanie, które określi wartość jasności w nominalnej jednostce, w zależności od odcienia szarości wyświetlanego na ekranie. Dlatego też stworzona aplikacja ma za zadanie wygenerować plik, który określa wartość luminancji wyrażoną w cd/m^2 dla wszystkich 256 poziomów jasności.

Ażeby było to możliwe niezbędne jest, oprócz fotometru, wykorzystanie wzorcowego źródła światła. Z powodu braku dostępu do takiego urządzenia zastosowano monitor jako źródło światła o regulowanym natężeniu. Pod pojęciem wzorcowego monitora należy rozumieć ekran, którego krzywa gamma zbliżona jest do założeń teoretycznych. Równocześnie na wzorcowym monitorze należy wcześniej dokonać pomiaru krzywej gamma przy pomocy spektrofotometru ColorMunki Photo firmy X-Rite. Wyświetlacze, które zostały wykorzystane w procesie tworzenia programu oraz wymieniony spektrofotometr zostały scharakteryzowane w następnym podrozdziale. Aplikacja dokonuje niezależnej kalibracji czterech sensorów, która może być przeprowadzona dla wszystkich zakresów wzmocnienia. Działa ona w czasie rzeczywistym, co oznacza, że dane są na bieżąco rejestrowane i równocześnie poddawane analizie.



Rysunek 2.1. Interfejs graficzny stworzonej aplikacji

Na powyższym rysunku przedstawiony został interfejs graficzny stworzonego programu. Po jego uruchomieniu w oknie wykresu prezentowane są dane aktualnie

rejestrowane przez cztery sondy. Istnieje możliwość wyboru skali na osi czasu. Można wyświetlać dane dla 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 100 oraz 1000 ms.

Po uruchomieniu aplikacji, zainicjowane zostają cztery niezależne od siebie wątki. Pierwszy z nich odpowiedzialny jest za stworzenie sesji do akwizycji danych z wykorzystaniem narzędzia DAQ, wchodzącego w skład środowiska MATLAB [2]. Narzędzie to oferuje zbiór funkcji służących do połączenia MATLABa z sprzętem służącym do akwizycji danych. Wspiera ono wiele różnych rozwiązań i jest kompatybilne z modułami kilku producentów. Funkcje w nim zawarte umożliwiają odczyt danych i poddanie ich analizie w czasie rzeczywistym lub zapis do pliku. Równocześnie wspierają one kontrolę wejść i wyjść analogowych i cyfrowych oraz liczników i zegarów. W narzędziu DAQ istnieją dwie metody służące do akwizycji danych. Są to Session-Based Interface oraz Legacy Interface. Różnią się one od siebie sposobem komunikacji i sterowania karty. W stworzonej aplikacji zastosowane zostały funkcje z metody Session-Based Interface. Poniższy fragment kodu przedstawia inicjalizację sesji akwizycji danych, ustawienie parametrów rejestracji danych oraz stworzenie czterech kanałów odpowiadających sondom fotometru.

Tabela 2.1. Przykład inicjalizacji sesji (1-3) oraz stworzenia kanałów (5-18), przy użyciu metody Session-Based Interface, wykorzystany w aplikacji

```
1      s = daq.createSession('ni');
2      s.Rate = 16000;
3      s.IsContinuous = true;
4
5      ch_1 = s.addAnalogInputChannel('Dev1', 'ai1', 'Voltage');
6      ch_2 = s.addAnalogInputChannel('Dev1', 'ai0', 'Voltage');
7      ch_3 = s.addAnalogInputChannel('Dev1', 'ai3', 'Voltage');
8      ch_4 = s.addAnalogInputChannel('Dev1', 'ai2', 'Voltage');
9
10     ch_1.InputType = 'Differential';
11     ch_2.InputType = 'Differential';
12     ch_3.InputType = 'Differential';
13     ch_4.InputType = 'Differential';
14
15     ch_1.Range = [-5 5];
16     ch_2.Range = [-5 5];
17     ch_3.Range = [-5 5];
18     ch_4.Range = [-5 5];
```

Następnie, po stworzeniu sesji, tworzony jest uchwyt, który odpowiedzialny jest za przekazywanie rejestrowanych danych do funkcji, odpowiedzialnej za ich prezentację oraz analizę. Uchwyt ten definiuje się w następujący sposób:

```
lh = s.addlistener('DataAvailable', @(src,event) dataHandler( src, event, handlerGUI, s.Rate ));
```

Kolejnym wątkiem, jest funkcja, do której przekazywane są dane. Po uruchomieniu aplikacji, dane zarejestrowane przez fotometr, są prezentowane w oknie wykresu interfejsu graficznego. Funkcja ta umożliwia również wyświetlenie w oddzielnym oknie wykresu przebiegów napięć dla czasu akwizycji wynoszącego 0.1 s. Wątek ten służy także do rejestracji danych i ich zapisu do pliku binarnego.

Następnym wątkiem, który działa równoległe do pozostałych, jest funkcja odpowiedzialna za interfejs graficzny. Został on stworzony z wykorzystaniem narzędzia MATLAB GUI. Umożliwia ono tworzenie interfejsu użytkownika, eliminującego potrzebę wpisywania komend w celu uruchomienia aplikacji. Pozwala także na przejrzystą i czytelną prezentację wyników otrzymanych jako efekt działania odpowiednich skryptów. Funkcja wykorzystana w tym wątku, ma za zadanie przekazywanie informacji otrzymanych od osoby obsługującej aplikację. Wysyła ona do głównego wątku polecenie wykonania odpowiedniego skryptu, w zależności od czynności wykonanych przez użytkownika w interfejsie graficznym programu.

Ostatnim wątkiem, będącym równocześnie głównym silnikiem programu jest funkcja odpowiedzialna za uruchomienie i zakończenie działania programu oraz za komunikację pomiędzy pozostałymi wątkami. W odstępach czasowych równych 0,2 sekundy sprawdza ona jakie polecenie zostało wydane przez użytkownika. Wykorzystuje do tego stany zdefiniowane w funkcji obsługującej interfejs graficzny. Wymiana informacji pomiędzy tymi dwoma wątkami została zrealizowana przy pomocy uchwytu, który umożliwia odczyt aktualnie żądanego stanu. Poniżej zamieszczony został fragment kodu, w którym następuje definicja uchwytu. Następnie sprawdzany jest warunek, czy działanie aplikacji zostało już zainicjowane. Jeśli tak, stan aplikacji zostaje zmieniony na prezentację rejestrowanych danych.

Tabela 2.2. Przykład komunikacji pomiędzy wątkami programu z wykorzystaniem uchwytu

```
1 handlerGUI = previewGUI();
2
3 if( strcmp( stateMachine, 'INITIALIZED' ) )
4     display( 'state: INITIALIZED' );
5     setappdata( handlerGUI, 'stateMachine', 'DISPLAYING' );
6     continue;
7 end
```

Wątek ten równocześnie, po sprawdzeniu aktualnego stanu uruchamia odpowiednie skrypty. Jest on również odpowiedzialny za zmianę wzmocnienia sygnału z poszczególnych kanałów, jeśli taka opcja została wybrana przez użytkownika. Do

tego celu wykorzystywana jest funkcja, której zadaniem jest sterowanie odpowiednimi wejściami cyfrowymi karty NI USB 6210, za pomocą odpowiednich sekwencji bitowych. Jedną z linii cyfrowych jest linia taktująca zegara, natomiast na drugą linię wysłane zostają odpowiednie bity wartości wzmocnienia oraz numeru sensora. Poniższy fragment kodu odpowiedzialny jest za dodanie dwóch linii cyfrowych, a następnie przekazanie sygnału taktującego oraz bitów numeru sondy na odpowiednie porty cyfrowe karty.

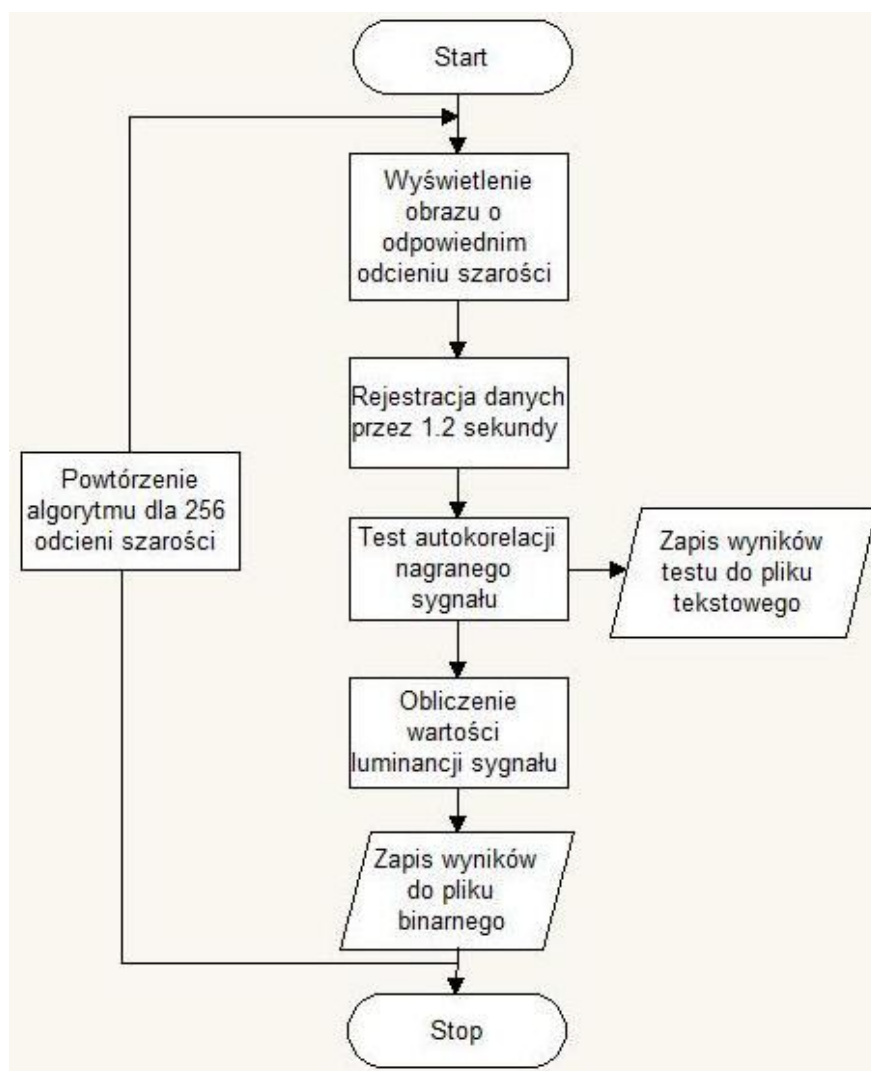
Tabela 2.3. Przykład sterowania portami karty akwizycyjnej z wykorzystaniem metody Session-Based Interface

```
1     s2 = daq.createSession('ni');
2     ch = s2.addDigitalChannel('Dev1', 'Port1/Line0:1', 'OutputOnly');
3
4     s2.outputSingleScan([0 channel(2)]);
5     pause(0.01);
6     s2.outputSingleScan([1 channel(2)]);
7     pause(0.01);
8     s2.outputSingleScan([0 channel(1)]);
9     pause(0.01);
10    s2.outputSingleScan([1 channel(1)]);
```

Opisane powyżej funkcje w pierwszej wersji zostały napisane przez pracowników Katedry Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. Podczas pracy nad aplikacją zostały one zmodyfikowane i rozbudowane w celu zapewnienia odpowiedniej funkcjonalności.

Po opisanu głównego silnika programu, można przystąpić do opisu przebiegu procesu kalibracji. Jej przeprowadzenie składa się z trzech etapów, które zostaną po kolei omówione. Każdemu z nich odpowiada inny przycisk w interfejsie graficznym. Wciśnięcie każdego z nich powoduje zmianę stanu w wątku obsługującym interfejs użytkownika i odczyt tej zmiany przez wątek główny. Ten z kolei uruchamia odpowiednie skrypty dokonujące analizy i obróbki danych.

Pierwszy etap zostaje zainicjowany poprzez wybór przycisku *'rejestracja danych'*. Poniższy diagram ilustruje poszczególne zadania wykonywane przez program w tej fazie.



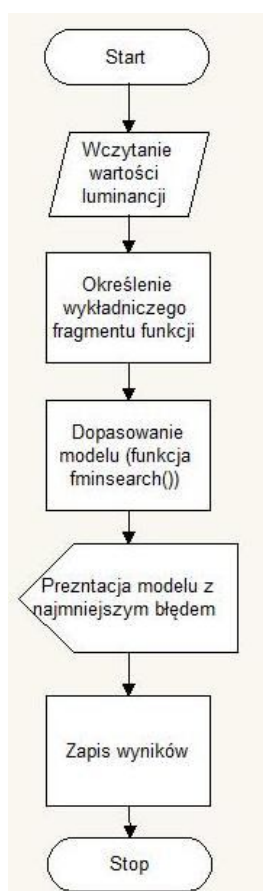
Rysunek 2.2. Algorytm rejestracji oraz wstępnej analizy danych

Na początku tworzony jest jednolity obraz, o jednym z 256 poziomów szarości kolorze. Pomiar rozpoczyna się od barwy czarnej i kończy się na barwie białej. Kolejnym krokiem jest rejestracja danych z 1.2 sekundy pomiaru. Częstotliwość próbkowania sygnału wynosi 16 KHz, dlatego nagrywane jest 19200 próbek. Następnie wykonywany jest test autokorelacji zapisanych danych. Celem tego testu jest sprawdzenie, czy wzorcowy monitor wyświetla ramki o takim samym czasie trwania. Ponieważ częstotliwość odświeżania dla testowego monitora wynosiła 120 Hz, a częstotliwość próbkowania 16 KHz, zatem długość pojedynczej ramki powinna wynosić 133 lub 134 próbki. Jeśli długości poszczególnych ramek różniłyby się o więcej niż jedną próbkę, mogłoby to świadczyć o niedoskonałości użytego wyświetlacza i skutkowałoby błędnymi wynikami. W celu przyspieszenia działania aplikacji do obliczenia funkcji autokorelacji wykorzystana została następująca zależność [4]:

$$R(x) = \text{re}(\text{ifft}(\text{fft}(x) * \overline{\text{fft}(x)})) \quad (4)$$

gdzie *fft* oznacza szybką transformatę Fouriera, natomiast *ifft* to szybka odwrotna transformata Fouriera, a *x* to zarejestrowany sygnał. Określenie odległości pomiędzy poszczególnymi maksimumami lokalnymi funkcji *R(x)* odpowiada długościom poszczególnych ramek. Rezultaty przeprowadzonego testu zapisywane są do pliku tekstowego. Użytkownik może w nim sprawdzić jaka jest minimalna i maksymalna długość ramki wyrażona w próbkach oraz ile jest przedziałów o określonej długości. Po przeprowadzeniu testu obliczona zostaje średnia wartość luminancji zarejestrowanego przebiegu. Luminancja jest to wartość całki policzona dla każdej ramki. W przypadku sygnału cyfrowego jest to suma wartości wszystkich próbek dla poszczególnych przebiegów. Do tych obliczeń wykorzystywana jest 1 sekunda zarejestrowanych danych, a pierwsze 3200 próbek jest odrzucanych. Wynika to z faktu, że monitor charakteryzuje się czasem reakcji rzędu kilku milisekund. Parametr ten został opisany w części teoretycznej pracy. W przypadku obliczenia średniej wartości luminancji dla całego zarejestrowanego przebiegu, otrzymane wyniki byłyby obciążone stosunkowo dużym błędem i miałyby znaczący wpływ na wynik kalibracji. Na końcu tego etapu otrzymane wyniki zapisane zostają do czterech plików binarnych, odpowiadających poszczególnym sensorom. Algorytm ten powtarzany jest 256 razy. Odpowiada to ilości odcieni szarości występujących, gdy do zapisu barw przeznaczonych jest 24 bity, po 8 bitów na każdą z barw podstawowych. W rezultacie otrzymujemy wartości luminancji obliczone z przebiegów napięciowych w funkcji poziomów jasności pikseli. Cały proces rejestracji i wstępnej analizy danych zajmuje około czterech minut. Wykonanie tej części kalibracji w czasie rzeczywistym, znacznie redukuje ilość pamięci niezbędną do działania aplikacji. Dane zarejestrowane przez fotometr są na bieżąco kasowane i zastępowane przez wyniki otrzymane dla kolejnego poziomu jasności pikseli. Jedynie średnie wartości luminancji, które są finalnym efektem tego etapu, są zapisywane do pliku i składowane w pamięci programu.

Kolejny etap kalibracji zostaje uruchomiony poprzez wybór przycisku 'dopasowanie'. Poniżej zamieszczony został diagram blokowy, przedstawiający poszczególne części algorytmu wykonywanego w tej części programu.



Rysunek 2.3. Algorytm znajdowania modelu teoretycznego najlepiej dopasowanego do danych pomiarowych

Celem tego etapu jest określenie modelu najbardziej zbliżonego do rezultatów pomiarowych. Na początku wczytane zostają dane zawierające wartości luminancji obliczone na podstawie zarejestrowanych przebiegów. Zakres napięć, które obsługuje karta do akwizycji danych to -5 V do 5 V. W przypadku przeprowadzenia pomiarów dla dużych wzmocnień, napięcie pomnożone przez wzmocnienie przekracza ten zakres. W efekcie, krzywa luminancji otrzymana z analizowanych danych, ma charakter wykładniczy jedynie dla części odcieni szarości. Dlatego też niezbędne jest określenie fragmentu danych, dla których możliwe jest dopasowanie modelu. Dokonanie kalibracji nie byłoby możliwe, gdyby analizować w takim wypadku cały przebieg, gdyż wartości luminancji otrzymane dla danych przekraczających zakres pracy karty, są niepoprawne. Znalezienie modelu dla prawidłowego fragmentu danych dokonywane jest za pomocą funkcji `fminsearch` pakietu MATLAB. Podczas pracy nad aplikacją, przeprowadzone zostały testy dla różnych modeli, w celu znalezienia optymalnego dopasowania o najmniejszym błędzie. Początkowo zaimplementowany został skrypt, który dokonywał porównania danych z fotometru z następującymi funkcjami:

$$f(x) = x^\gamma \quad (5)$$

$$f(x) = x^\gamma + b \quad (6)$$

$$f(x) = \max(a, x^\gamma + b) \quad (7)$$

gdzie γ to współczynnik wykładniczej krzywej, a to wartość liniowej funkcji dla ciemnych odcieni szarości, b to stała określająca wartość poziomu czerni, a x to znormalizowany poziom jasności pikseli. Jednakże, w trakcie analizy wyników, stwierdzono, że najmniejszy błąd dopasowania występuje, jeśli zastosuje się model, który przyjmuje różne wartości współczynnika gamma dla trzech przedziałów zarejestrowanych danych. W związku z tym, w ostatecznej wersji programu została zaimplementowana poniższa funkcja:

$$f(x) = \begin{cases} \max(a, x^{\gamma_1} + b) & ,0 \leq x < 63 \\ x^{\gamma_2} + c & ,63 \leq x < 127 \\ x^{\gamma_3} + c & ,127 \leq x \leq 255 \end{cases} \quad (8)$$

Funkcja *fminsearch* wyznacza parametry modelu opisanego zależnością (8), przy jak najlepszym dopasowaniu do danych pomiarowych. W aplikacji parametryzowanych jest pięć współczynników. W przypadku, o którym była mowa wcześniej, gdy do analizy przekazywane są niepełne dane, program pomija procedurę dopasowania dla części przedziału, a parametry niewykorzystane przyjmują wartość 0. W następnym kroku otwarte zostaje nowe okno interfejsu graficznego, w którym prezentowane są wykresy krzywej doświadczalnej oraz krzywej otrzymanej w wyniku optymalizacji dla wszystkich czterech sensorów. Równocześnie wyświetlona zostaje informacja o obliczonych parametrach i błędzie. Do obliczenia błędu przyjęto, że jest on różnicą wartości modelu oraz danych pomiarowych w odniesieniu do wartości funkcji. Równocześnie policzone zostało odchylenie standardowe różnicy wartości funkcji estymowanej oraz danych doświadczalnych w celu zobrazowania rozkładu błędu. Na końcu tego etapu działania aplikacji wyniki zapisywane są do plików binarnych. Zawierają one wartości funkcji dla 256 poziomów jasności pikseli otrzymane w wyniku dopasowania. Po zakończeniu tego etapu, aplikacja przechodzi do stanu wyświetlania danych rejestrowanych przez fotometr. Poniższy fragment kodu został zastosowany w programie.

Tabela 2.4. Przykład użycia funkcji *fminsearch* zastosowany w aplikacji

```
1 function [a1, b1, c1, d1, e1, blad1] = fmin1()
2     global dane;
3     global W1;
4     dane(:,1) = 0:1/255:1;
5     dane(:,2) = W1;
6     params1 = [1.9 0 0 1.9 1.9]';
7     b11 = fminsearch(@fun_fil, params1);
8     a1 = b11( 1 );
9     b1 = b11( 2 );
10    c1 = b11( 3 );
11    d1 = b11( 4 );
12    e1 = b11( 5 );
13    blad1 = std( fy1-y11' );
14    function blad = fun_fil( params )
15        a = params(1); b = params(2); c = params(3); d = params(4); e = params(5);
16        x = dane(:,1); y = dane(:,2);
17
18        for i = 1:length(x)
19            if x(i) < 0.25
20                fy(i) =max(x(i).^a+b,c);
21            elseif x(i)>=0.25 && x(i) <0.5
22                fy(i) = x(i).^d+b;
23            else
24                fy(i) = x(i).^e+b;
25            end
26        end
27        blad = std( fy-y' );
28    end
29 end
```

Ostatni etap kalibracji zostaje uruchomiony po wyborze przycisku 'kalibracja'. Zostaje wtedy uruchomiony skrypt, którego celem jest odwzorowanie przeanalizowanych danych otrzymanych doświadczalnie podczas pomiarów fotometrycznych, z wartościami otrzymanymi w wyniku badania parametrów wzorcowego wyświetlacza spektrofotometrem ColorMunki Photo. W pamięci programu zapisane są pliki binarne zawierające informacje o profilach gamma zarejestrowanych przy użyciu spektrofotometru. Dane te zostały otrzymane po przeprowadzeniu kilkakrotnych pomiarów w różnych punktach monitora. Następnie wyniki z tych samych powierzchni ekranu zostały uśrednione. Niezbędne było przygotowanie czterech zestawów krzywych odpowiadających każdemu z sensorów. Wynika to z faktu, że wyświetlacze charakteryzują się różnymi wartościami luminancji w różnych częściach ekranu. Dlatego też ostatni etap kalibracji musi uwzględniać umiejscowienie sond. Na początku skrypt wczytuje wyniki spektrofotometryczne oraz fotometryczne. Potem następuje porównanie tych danych ze sobą. W idealnym przypadku, gdyby chciano zobrazować dopasowanie obu krzywych, po umieszczeniu wartości odpowiednio na osi x oraz y układu współrzędnych, powinno otrzymać się wykres

funkcji liniowej zaczynającą się w początku układu współrzędnych. Dlatego też skrypt do analizy przyjmuje, że dane z dwóch urządzeń pomiarowych są to wartości luminancji wyrażone w cd/m^2 w funkcji jasności otrzymanej z pomiarów napięciowych. Następnie w celu określenia błędu odwzorowania zastosowano regresję liniową, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Po otrzymaniu estymowanych wartości oczekiwanej funkcji, następuje obliczenie błędu danych pomiarowych, w stosunku do wartości estymowanych. Równocześnie zostaje otwarte nowe okno, w którym prezentowane są wykresy obrazujące opisaną powyżej procedurę. Finalnym efektem, tego etapu jaki i całego procesu kalibracji jest zapis wyników do plików binarnych oraz tekstowych. Użytkownik może zatem sprawdzić jaka wartość luminancji wyrażona w cd/m^2 odpowiada otrzymanej przez niego wartości jasności podczas przeprowadzania za pomocą fotometru pomiarów napięciowych.

Bardzo ważnym zagadnieniem związanym z przeprowadzaniem kalibracji przy użyciu stworzonej aplikacji są odpowiednie warunki laboratoryjne. Pod pojęciem tym kryją się wszystkie warunki, które muszą być spełnione, w celu zapewnienia jak największej dokładności pomiaru. Do przeprowadzenia procesu kalibracji niezbędne jest to, aby stanowisko pomiarowe znajdowało się, w miarę możliwości, w jak najlepiej zaciemnionym pomieszczeniu. Czynnikiem ten ma duży wpływ na otrzymane wyniki, ponieważ światło zewnętrzne odbite przez wzorcowy monitor i zarejestrowane przez sondy może zawyżać wartości luminancji. Równocześnie dane bazowe otrzymane z pomiarów spektrofotometrycznych, zostały nagrane w zaciemnionym pomieszczeniu, dlatego też do skalibrowania fotometru należy zapewnić podobne warunki. Kolejny czynnik, na który należy zwrócić uwagę, to czas pracy urządzeń przed rozpoczęciem kalibracji. Wszystkie typy wyświetlaczy potrzebują minimum 30 min pracy zanim osiągną optymalne parametry. To samo tyczy się fotometru. Wynika to z właściwości układów scalonych znajdujących się w tych urządzeniach. W związku z tym przed uruchomieniem aplikacji, monitor powinien być włączony przez 30 do 60 min, a fotometr powinien być podpięty do zasilania. Należy także pamiętać o odpowiednim umieszczeniu statywu z sensorami względem ekranu. Trzeba go umieścić tak, że środek statywu, do którego przymocowane są sondy, powinien znajdować się mniej więcej na środku monitora. Ma to związek, z wspomnianą już wcześniej własnością wyświetlaczy, czyli zależnością luminancji od obszaru ekranu. Sensory powinny być również umieszczone jak najbliżej wzorcowego monitora, w celu minimalizacji wpływu

światła zewnętrznego, nie emitowanego przez urządzenia, na wartości rejestrowanego napięcia.

Poza podstawową funkcjonalnością aplikacji, którą jest kalibracja fotometru, posiada ona inne funkcje, mające na celu ilustrację parametrów używanego urządzenia wyświetlającego obraz. Przycisk *'nagrywanie'* umożliwia ciągły zapis danych rejestrowanych przez fotometr do pliku binarnego. Dzięki temu istnieje możliwość obserwacji przebiegów napięciowych, a co za tym idzie właściwości monitora w dłuższym okresie czasu. Nagrywanie zostaje zakończone po ponownym naciśnięciu przycisku. Funkcja, która może być pomocna przed rozpoczęciem procesu kalibracji, zostaje uruchomiona po wyborze przycisku *'pomiar krotki'*. Zostaje wtedy dokonana rejestracja krótkich fragmentów przebiegów, dla 256 poziomów jasności pikseli. Na podstawie nagranych próbek o długości 200 ms wyznaczona zostaje doświadczalna krzywa gamma danego urządzenia. Umożliwia to wstępną ocenę, czy dane urządzenie wyświetlające obraz, charakteryzuje się krzywą gamma zbliżoną do wartości teoretycznych. Jeśli w wyniku pojawi się krzywa, nie posiadająca wykładniczego charakteru oznacza to, że dany monitor nie może zostać użyty jak wzorcowy ekran. Czas wykonania badania wynosi około jednej minuty, a jego wynik prezentowany jest w formie wykresu. Program posiada również funkcję umożliwiającą wyświetlanie wykresu dla 100 ms pomiaru. Uruchamia się ją poprzez naciśnięcie przycisku *'zdjęcie'*. Na jednym wykresie zostają umieszczone cztery przebiegi zarejestrowane przez sensory. Umożliwia to porównanie wartości napięć pochodzących z różnych sond oraz sprawdzenie czy nie został przekroczony zakres pomiarowy karty NI USB-6210. Poza wspomnianymi opcjami, program posiada możliwość ustawienia wzmocnienia dla poszczególnych sensorów oraz ustawienia skali czasowej przy wyświetlaniu bieżących danych co zostało omówione wcześniej.

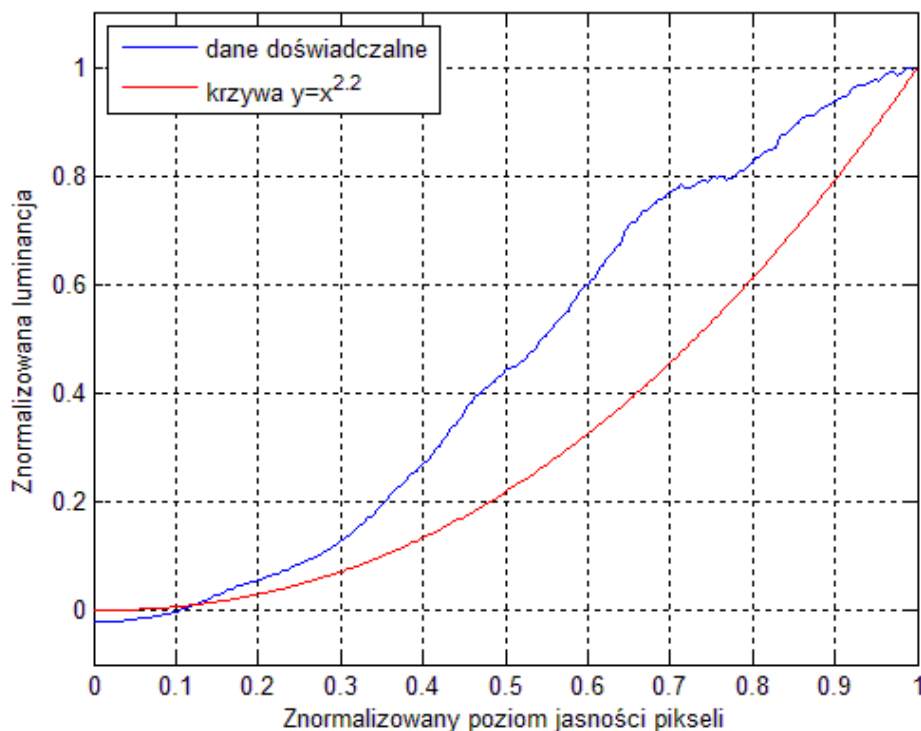
2.1 Wykorzystane urządzenia

Algorytm kalibracji zastosowany w aplikacji wymaga zastosowania dodatkowych urządzeń. Są to wzorcowy monitor oraz spektrofotometr ColorMunki Photo. W związku z tym niezbędne jest dokonanie krótkiej charakterystyki, przedstawiającej ich podstawowe właściwości. Należy również zastanowić się w jaki sposób opisane własności wpływają na działanie aplikacji.

W poprzednim rozdziale zostało napisane, że do poprawnego działania aplikacji niezbędny jest monitor. Wykorzystuje się go jako wzorcowe źródło światła. Ażeby możliwe było poprawne przeprowadzenie kalibracji, niezbędne jest użycie monitora, który posiada pewne właściwości. W trakcie przeprowadzania pomiarów oraz pracy nad aplikacją, wykorzystano do badań trzy różne wyświetlacze. Dwa z nich zostały wykonane w technologii LCD, trzeci to telewizor plazmowy.

Przeprowadzenie kalibracji możliwe jest przy wykorzystaniu wyświetlacza posiadającego odpowiednią charakterystykę krzywej gamma. Musi ona spełniać założenia teoretyczne opisane w pierwszym rozdziale. W związku z tym monitor lub telewizor, powinien cechować się wykładniczą krzywą, o współczynniku gamma zawierającym się w przedziale 1.4 - 2.5. Opisany we wcześniejszym rozdziale algorytm działania aplikacji umożliwia otrzymanie poprawnych wyników, jedynie w przypadku, gdy krzywa luminancji otrzymana po rejestracji jasności wyświetlacza może zostać dopasowana do funkcji wykładniczej. Równocześnie należy zadbać o to, aby ustawienia wyświetlania obrazu na ekranie takie jak: kontrast, jasność, głębokość kolorów barw podstawowych miały wartości domyślne. Najczęściej w telewizorach i monitorach parametry te przyjmują wartości domyślne dla 50% skali. Nawet minimalne zmiany ustawień tych parametrów mogą doprowadzić do poważnych różnic w wynikach kalibracji, a co za tym idzie wpływają na dokładność pomiaru.

Początkowo do badań wykorzystywano telewizor plazmowy Panasonic Smart Viera TX P42ST50E o przekątnej ekranu 42 cale [9]. Jest to telewizor obsługujący format Full HD oraz działający w technologii 3D. Wyświetlanie obrazu trójwymiarowego odbywa się na zasadzie wyświetlania naprzemiennej sekwencji dla prawego i lewego oka. Jest ona zsynchronizowana z przysłonami soczewek występujących w okularach. Równocześnie zastosowano filtr, który odpowiedzialny jest za blokowanie światła pochodzącego z zewnątrz. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie lepszych tonów czerni nawet w jasno oświetlonych pomieszczeniach. Telewizor zbudowany jest z progresywnego panelu plazmowego o bardzo wysokim kontraście. Czas reakcji kształtuje się na poziomie 0.001 ms. W czasie przeprowadzania pomiarów częstotliwość odświeżania obrazu ustawiona została na 120 Hz. Jednakże przeprowadzenie kalibracji przy pomocy tego ekranu nie było możliwe, ze względu na znaczące różnice charakteru krzywej gamma w stosunku do założeń teoretycznych, co zostało zaprezentowane na rysunku 2.4.

Porównanie krzywej gamma telewizora Panasonic Smart Viera z krzywą teoretyczną $y=x^2$ **Rysunek 2.4.** Porównanie krzywej gamma telewizora Panasonic Smart Viera z krzywą teoretyczną $y=x^2$

Kolejnym wyświetlaczem użytym do badań, jest monitor firmy BenQ, model XL2410T o przekątnej 24 cale [8]. Jest to urządzenie wykonane w technologii LCD, w którym zastosowano matrycę typu TN. Monitor ten charakteryzuje się luminancją 300 cd/m^2 przy wyświetlaniu barwy białej. Kontrast statyczny wynosi 1000:1. Kąt widzenia zawiera się w przedziale 160 - 170 stopni. Zastosowany został również filtr, który odpowiedzialny jest za redukcję ilości światła pochłanianego przez monitor. Równocześnie ekran ten charakteryzuje się stosunkowo dobrym czasem reakcji, w porównaniu z innymi wyświetlaczami tego typu, wynoszącym 2 ms. Do podświetlenia matrycy zastosowane zostało źródło światła typu LED. Monitor BENQ umożliwia wyświetlanie obrazu w trybie 3D z częstotliwością odświeżania 120 Hz. Taka częstotliwość odświeżania została również zastosowana do przeprowadzenia pomiarów. Za wadę matrycy można uznać parametr równomierności luminancji. Rzadko spotyka się monitory, które we wszystkich zewnętrznych punktach charakteryzują się większą wartością luminancji, niż na środku ekranu. Różnice w jasności pomiędzy różnymi miejscami mogą dochodzić do kilkunastu procent. W związku z tym bardzo ważne jest odpowiednie ustawienie sensorów podczas wykonywania kalibracji.

Ostatnim wyświetlaczem, który został wykorzystany w badaniach jest telewizor Manta 4214 o przekątnej ekranu 42 cale. Jest on wykonany w technologii LCD. Obsługuje format FullHD. Charakteryzuje się stosunkowo niską wartością kontrastu dynamicznego wynoszącą 15000:1. Częstotliwość odświeżania obrazu wynosi 100 Hz. Podczas wykonywania pomiarów, telewizor pracował z częstotliwością odświeżania 60 Hz. Równocześnie ekran ten posiada dość długi czas reakcji, rzędu 5 ms. Posiada on także funkcję wyświetlania obrazu w formacie 3D. Działa ona pasywnie, co znaczy, że obraz nie jest zsynchronizowany z okularami, a jedynie odpowiednio spolaryzowany. W okularach znajdują się odpowiednie filtry, które przepuszczają światło o określonej polaryzacji. Efektem zastosowania takiej technologii jest występowanie zjawiska przesłuchów, które ma wpływ na jakość odbieranego obrazu. Do podświetlenia matrycy zastosowano lampy CCFL, co wpływa na różnice w luminancji, w różnych punktach ekranu. Ze względu na gorsze parametry tego telewizora, w porównaniu z monitorem BenQ nie został on użyty jako wzorcowy ekran do kalibracji, jednakże zostały przeprowadzone pomiary krzywej gamma, które zostaną zaprezentowane w części wynikowej.

Do działania aplikacji niezbędne jest wcześniejsze zbadanie profilu gamma wzorcowego wyświetlacza. Do przeprowadzenia tego pomiaru, użyty został spektrofotometr ColorMunki Photo firmy X-rite [10]. Jest to wielofunkcyjne urządzenie kalibracyjne używane do profesjonalnych zastosowań. Umożliwia określenie profili zarówno drukarek, monitorów jak i projektorów. W przypadku drukarek możliwa jest kalibracja zarówno dla przestrzeni barw RGB oraz CMYK. System pomiarowy składa się z holograficznej siatki dyfrakcyjnej połączonej z matrycą fotodiod. ColorMunki posiada wiele różnorodnych funkcji, które mogą być pomocne podczas pracy z grafiką komputerową. Podstawowym zadaniem, które wykonuje urządzenie jest kalibracja monitora, z domyślną wartością współczynnika gamma równą 2.2. Umożliwia ono również przeprowadzenie pomiaru luminancji bez kalibracji. W tym przypadku dokonywany jest pomiar jasności wyświetlanych obrazów, na podstawie zdefiniowanego wcześniej przez użytkownika profilu kolorów. Ten tryb został wykorzystany podczas tworzenia aplikacji. Do pomiarów z wykorzystaniem spektrofotometru ColorMunki użyte zostało oprogramowanie Argyll CMS będące kompatybilnym systemem zarządzania kolorami. Umożliwia ono tworzenie profili ICC dla skanerów i kamer oraz kalibracje wyświetlaczy oraz drukarek. Wykorzystany został

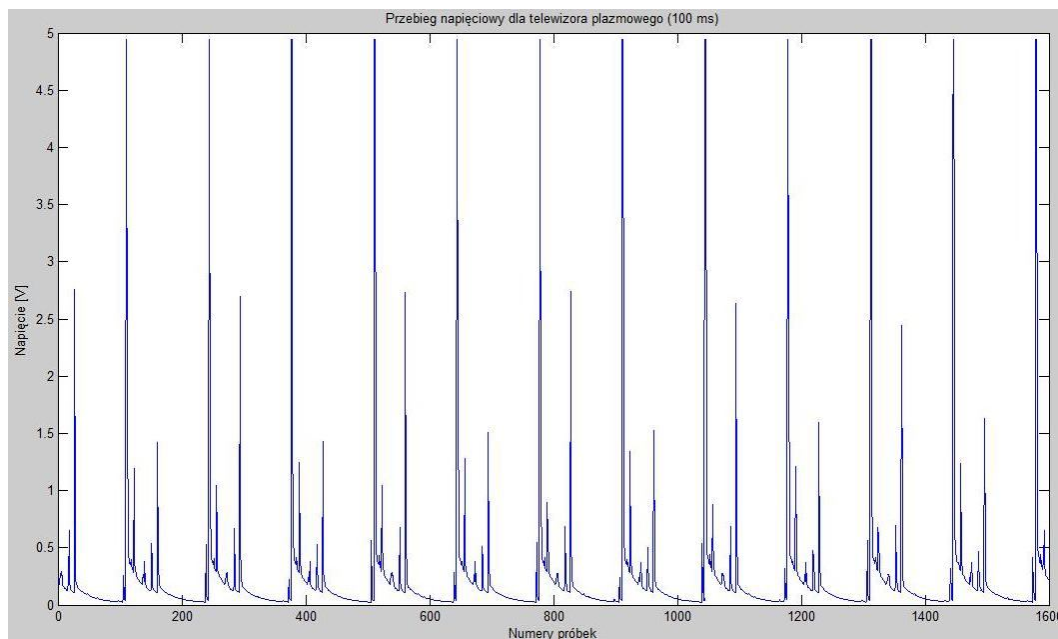
również dispcaGUI, który jest graficznym interfejsem umożliwiającym pracę w środowisku ArgylCMS. Równocześnie jest on kompatybilny z urządzeniami firmy X-rite.

3 Analiza wyników

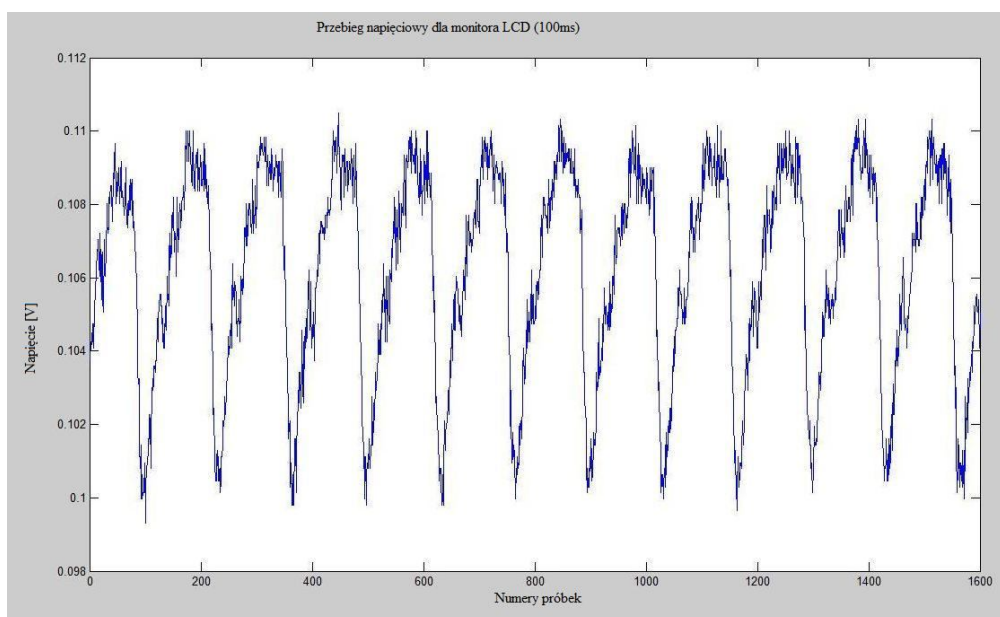
W rozdziale tym zaprezentowane zostaną wyniki otrzymane podczas przeprowadzania testów fotometru oraz urządzeń wyświetlających obraz. Przedstawione zostaną doświadczalnie otrzymane dane i zostaną one porównane z opisanymi wcześniej właściwościami teoretycznymi. Analizie zostaną poddane również wyniki poszczególnych etapów kalibracji. Scharakteryzowany zostanie błąd metody oraz zostanie on porównany z błędem przy wyborze innego algorytmu kalibracji.

3.1 Wstępna analiza danych rejestrowanych przez fotometr

W pierwszej fazie pracy nad aplikacją najważniejszą rzeczą było dokonanie analizy sygnału rejestrowanego przez fotometr. Ważnym aspektem jest to w jaki sposób różne ekrany emitują światło podczas wyświetlania pojedynczej ramki. W tym celu dokonano zapisu sygnału, dla dwóch urządzeń wykonanych w dwóch różnych technologiach. Jedno z nich to telewizor plazmowy Panasonic Smart Viera TX-P42ST50E, a drugie to monitor LCD firmy BENQ model XL 2410T. Obydwa wyświetlacze zostały opisane w podrozdziale 2.3.



Rysunek 3.1 Przebieg napięciowy zarejestrowany dla telewizora plazmowego

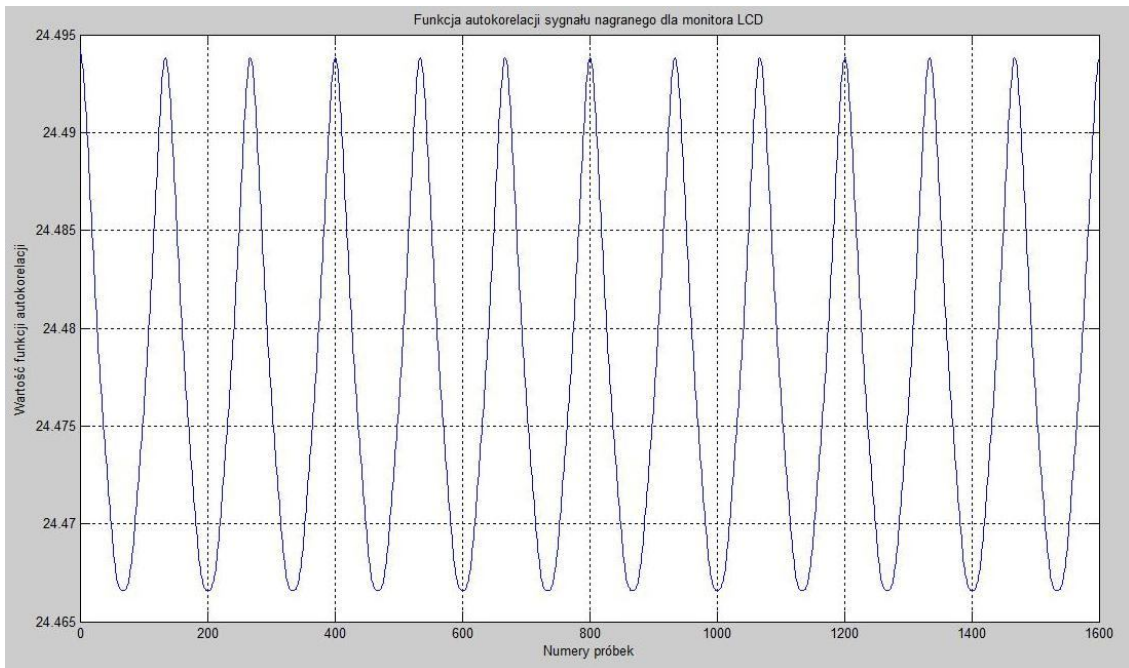


Rysunek 3.2 Przebieg napięciowy zarejestrowany dla monitora LCD

Wykresy zamieszczone na rysunkach 3.1 oraz 3.2 przedstawiają przebiegi napięciowe dla 100 ms dla ekranów tych urządzeń. Ponieważ częstotliwość próbkowania sygnału przez kartę NI USB-6210 wynosi 16 KHz, zatem na wykresach znajduje się 1600 próbek. Zaprezentowane pomiary wykonane zostały przy wyświetlaniu na ekranie jednolitego obrazu o poziomie jasności pikseli równym 15 w przypadku telewizora PDP oraz 20 w przypadku monitora LCD, dla formatu, który umożliwia stworzenie 256 odcieni szarości. Częstotliwość odświeżania obrazu przez obydwa urządzenia wynosi 120 Hz, zatem na rysunkach widoczne jest 12 wyświetlonych ramek. Na podstawie tych dwóch przebiegów można zaobserwować różnice w sposobie wyświetlania obrazu w technologii LCD oraz PDP. W przypadku telewizora plazmowego, dla każdej ramki, następuje całkowite zgaszenie pikseli i brak emisji światła przez ekran. Równocześnie poziom napięcia zarejestrowany przez fotometr obejmuje zakres od 0 V do 5 V. Wynika z tego, że nawet dla ciemnych barw, matryca w technologii PDP, świeci w pewnych okresach czasu z dużą jasnością. Podczas wyświetlania obrazów złożonych z pikseli o coraz większym poziomie jasności, zwiększa się fragment ramki, dla którego zarejestrowane napięcie bliskie jest wartości 5V. Na rysunku 3.1 możemy zauważyć również, że napięcie nigdy nie spada do zera. Może to wynikać z faktu, że nigdy nie da się całkowicie wyeliminować światła zewnętrznego odbitego przez monitor lub też z wartości stałej, dodawanej do sygnału, a wynikającej z budowy fotometru. Na wykresie z rysunku 3.2 można zaobserwować, że w technologii LCD sposób emisji światła jest całkowicie inny. W tym przypadku, wartości napięcia w pojedynczej ramce

nigdy nie osiągają wartości zero. Ważne jest również to, że dla podobnych odcieni szarości obrazu zakres napięć rejestrowanych przez fotometr jest dużo mniejszy, niż w przypadku technologii PDP. Wynika to z faktu, że ekran monitora BenQ XL 2410T podświetlany jest zewnętrznym źródłem światła, a matryca LCD odpowiedzialna jest za jego filtrację. W związku z tym w czasie trwania pojedynczej ramki, nigdy nie występuje efekt całkowitego gaśnięcia ekranu. W efekcie, dla tego rodzaju wyświetlaczy ciekłokrystalicznych ciężko jest uzyskać idealną głębię czerni. Można także zaobserwować, że sygnał pochodzący z wyświetlacza ciekłokrystalicznego jest bardziej zaszumiany, niż ten z telewizora plazmowego. Szum ten jest coraz mniej widoczny, wraz ze wzrostem poziomu jasności pikseli prezentowanego obrazu. Efekt ten może być spowodowany gorszą jakością matrycy niż w przypadku drugiego urządzenia.

Należy również poświęcić trochę uwagi funkcji autokorelacji zarejestrowanego sygnału. Funkcja ta została wykorzystana do wyznaczenia długości pojedynczych ramek, wyrażonej w ilości próbek. Jak zostało wspomniane w podrozdziale 2.2, przed rozpoczęciem kalibracji niezbędne jest przeprowadzenie testu, mającego za zadanie określenie długości wszystkich ramek. Poniżej zamieszczony został wykres przedstawiający funkcję autokorelacji sygnału dla 12 ramek.



Rysunek 3.3. Funkcja autokorelacji sygnału zarejestrowanego przez fotometr dla ekranu LCD

Korzystając z właściwości autokorelacji, możemy stwierdzić, że końce i początki poszczególnych ramek znajdują się w punktach, w których w funkcji występują maksima lokalne. Dzięki temu jesteśmy w stanie określić długość trwania każdej klatki w zarejestrowanym sygnale. Pozwala to na sprawdzenie, czy dany monitor działa poprawnie. Jeśli długości ramek różniłyby się między sobą o więcej niż jedną próbkę, mogłoby to świadczyć o nieprawidłowej pracy ekranu, co eliminowałoby go z uczestnictwa w procesie kalibracji. W trakcie przeprowadzonych badań, zebrane zostały zbiorcze dane dla kilkunastu pomiarów. Następnie wyniki analizy zostały uśrednione. Otrzymane rezultaty zostały zamieszczone w poniższej tabeli.

Tabela 3.1. Zbiorcze informacje na temat sygnału, zebrane po analizie funkcji autokorelacji

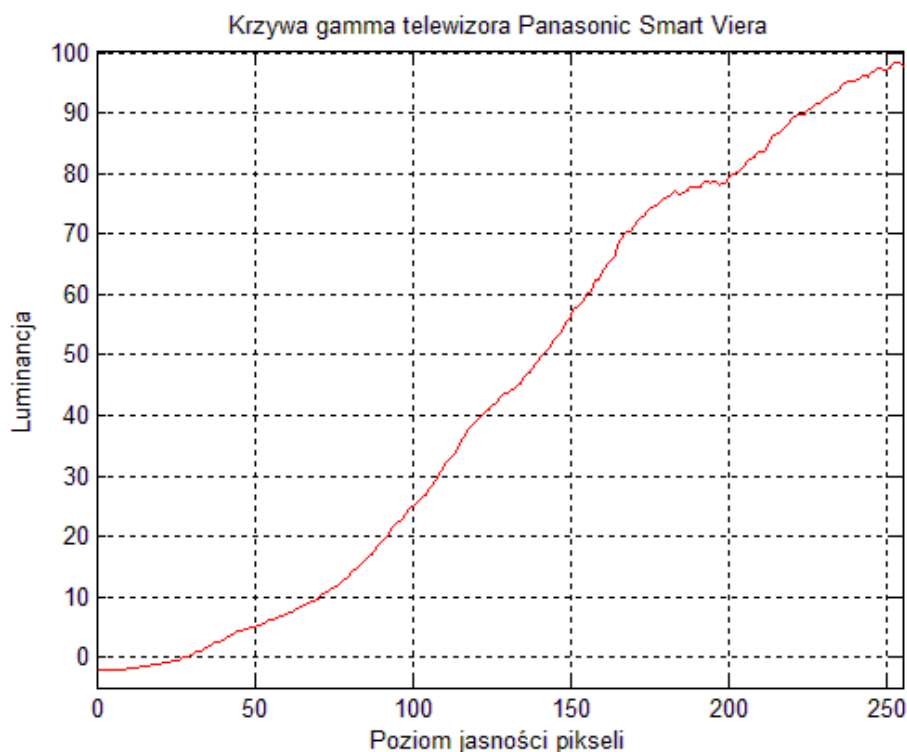
Ilość wszystkich ramek	100
Średnia ilość ramek o długości 133 próbek	48,75
Średnia ilość ramek o długości 134 próbek	51,2
Najkrótsza zarejestrowana ramka [próbki]	131
Najdłuższa zarejestrowana ramka [próbki]	135
Ilość ramek o długości różnej od 133 lub 134 [%]	<1%

Możemy zaobserwować, że w przypadku wzorcowego monitora LCD wykorzystanego w procesie kalibracji, czas trwania poszczególnych klatek, spełnia założenia poprawności testu. Różnice są niewielkie, a ewentualne odchylenia od żądanych wartości pojawiają się dla niskich poziomów jasności pikseli. Wynika to z faktu, że dla odcieni zbliżonych do czerni, wartość napięcia jest stosunkowo mała, jeśli odniesiemy ją do wartości szumów pojawiających się w sygnale. Jednakże są to sporadyczne przypadki, które mogą wynikać bardziej z niedoskonałości urządzenia pomiarowego niż z błędów w pracy monitora. Należy również zaznaczyć, że w przypadku pozostałych urządzeń wyświetlających obraz użytych do badań zostały osiągnięte zbliżone rezultaty. Dlatego też, każde z nich mogło posłużyć do przeprowadzenia dalszych doświadczeń.

3.2 Modele gamma otrzymane w wyniku doświadczeń

Następnym krokiem w analizie otrzymanych wyników będzie prezentacja i porównanie krzywych gamma otrzymanych doświadczalnie dla trzech urządzeń wykorzystanych w procesie tworzenia aplikacji. Pomiaru zostały przeprowadzone przy pomocy fotometru. Na tym etapie pracy nad programem wyznaczone zostały zależności

luminancji od poziomu jasności pikseli dla wzmocnienia sygnału równego jeden. Miało to na celu znalezienie optymalnego wyświetlacza, który mógłby posłużyć jako monitor wzorcowy. Równocześnie możliwe było poznanie jednej z podstawowych właściwości charakteryzujących monitor. Tak więc, po przeprowadzeniu tej analizy możliwe jest również odniesienie otrzymanych wyników, do założeń teoretycznych, związanych z krzywą gamma. Początkowo jako wzorcowy ekran zastosowany w układzie pomiarowym służyć miał telewizor Panasonic Smart Viera model TX-P42ST50E. Jednakże w toku przeprowadzonych badań okazało się, że jest to niemożliwe, ze względu na otrzymaną charakterystykę, co prezentuje poniższy wykres.

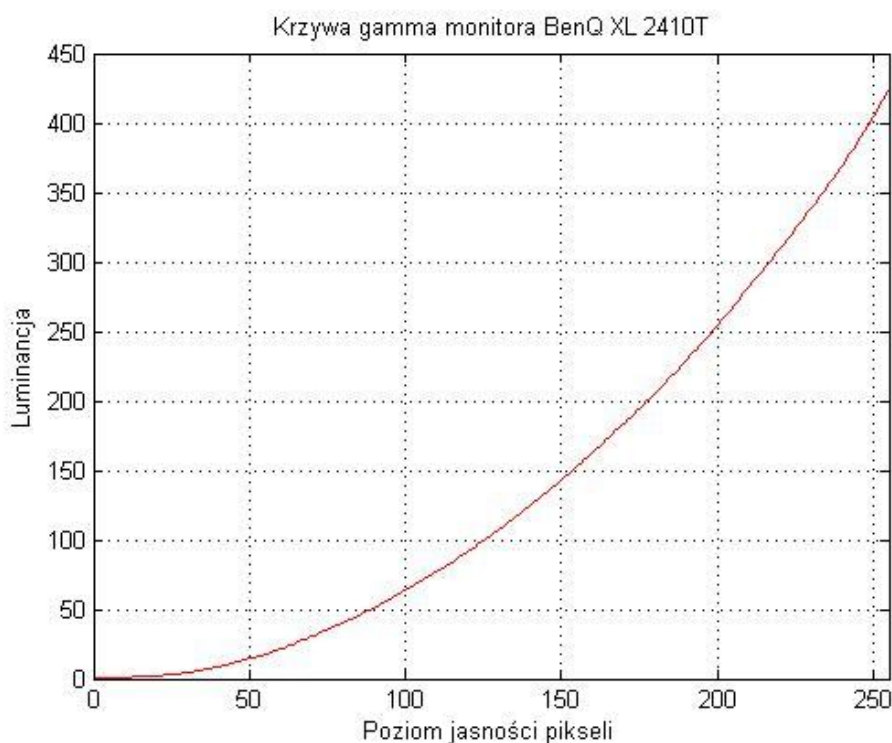


Rysunek 3.4. Doświadczalna krzywa gamma telewizora Panasonic Smart Viera model TX-P42ST50E

Jak można zauważyć na rysunku 3.4, otrzymana krzywa znacząco odbiega od założeń teoretycznych. Można od razu stwierdzić, że powyższa zależność nie jest funkcją wykładniczą. Początkowo ma ona taki przebieg, jednak dla poziomów jasności pikseli od 100 do 170 wartość luminancji rośnie niemalże liniowo. Następnie można zaobserwować, że następuje lokalny spadek, a potem dalszy zbliżony do liniowego wzrost poziomu jasności. Równocześnie w różnych punktach wykresu widać minimalne spadki wartości luminancji, pomimo wyświetlania na ekranie coraz jaśniejszych odcieni szarości. Takie właściwości krzywej gamma tego telewizora, uniemożliwiają dopasowanie jej do jakiegokolwiek modelu wynikającego z podstaw teoretycznych.

Jakakolwiek próba kalibracji fotometru z wykorzystaniem tego wyświetlacza obarczona byłaby dużym błędem, a co za tym idzie nie ma najmniejszego sensu. Na taki przebieg krzywej gamma wpływ ma kilka czynników. W sytuacji kiedy na ekranie prezentowany jest obraz zbliżony do bieli, dla fragmentów pojedynczych ramek przekroczony zostaje zakres pomiarowy zdefiniowany przez kartę NI USB-6210. W związku z tym dane w tej części są niekompletne i nie da się obliczyć rzeczywistych wartości luminancji. Innym uzasadnieniem tak zaskakujących wyników, jest to, że w przypadku tego modelu telewizora, parametr kompensujący nieliniowe właściwości ludzkiego wzroku nie odgrywa najważniejszej roli. Urządzenie to umożliwia odtwarzanie filmów w trybie trójwymiarowym. Dlatego też, w tym wyświetlaczu, większy nacisk kładzie się na poprawę parametrów czasu reakcji, kontrastu i synchronizacji obrazu, kosztem właściwości związanych z jakością koloru.

Kolejnym urządzeniem, dla którego wykreślona została krzywa gamma, to monitor ciekłokrystaliczny firmy BenQ model XL 2410T. Poniżej zamieszczony został wykres otrzymanej funkcji.

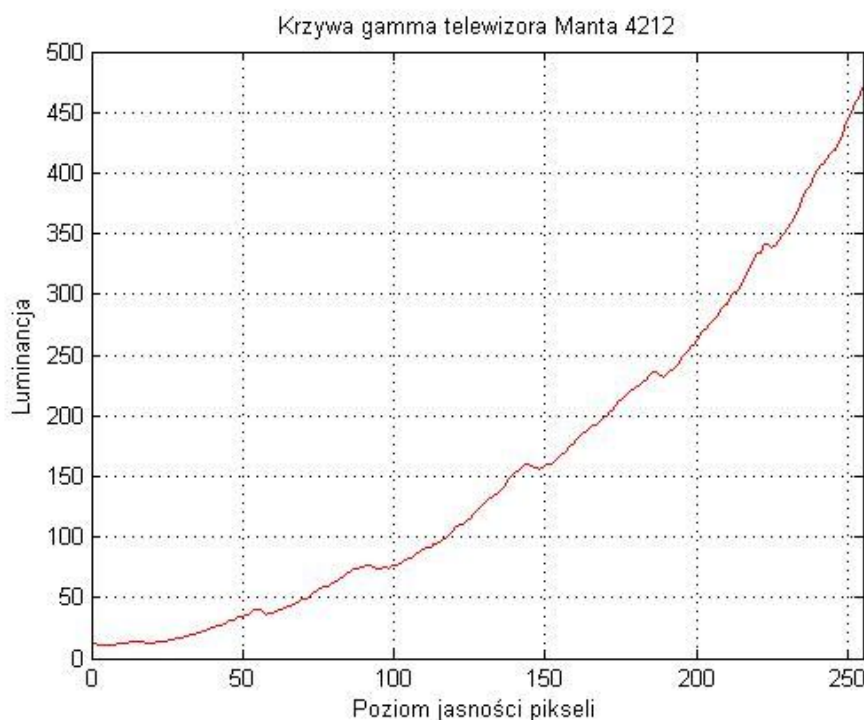


Rysunek 3.5. Doświadczalna krzywa gamma monitora BenQ model XL 2410T

W tym przypadku można zaobserwować, że otrzymana doświadczalnie krzywa doskonale odzwierciedla założenia teoretyczne charakteryzujące nieliniowość ekranów

LCD. Funkcja w całym przedziale rośnie wykładniczo. Równocześnie brak jest widocznych, lokalnych spadków wartości luminancji, jakie miały miejsce w przypadku opisanego wcześniej telewizora plazmowego. Można także zaobserwować, że dla ciemnych obrazów wyświetlanych na monitorze (poziomy jasności pikseli od 0 do 10), wartości jasności są bardzo zbliżone do siebie. Tą zależność można uzasadnić poprzez odwołanie się do problemu głębi czerni występującego w matrycach ciekłokrystalicznych. W urządzeniach tego typu nie da się osiągnąć luminancji rzędu 0 cd/m^2 dla barwy czarnej. Jest ona zawsze większa od 0. To przez jaki fragment krzywej, ciężko jest dostrzec różnice pomiędzy poszczególnymi ciemnymi barwami zależy od jakości matrycy. Ze względu na takie właściwości otrzymanej funkcji gamma, monitor BenQ został wybrany jako urządzenie wzorcowe wykorzystane w dalszych etapach kalibracji fotometru.

Badaniom mającym na celu określenie zależności pomiędzy poziomem jasności pikseli, a luminancją poddany został również inny wyświetlacz ciekłokrystaliczny. Jest to telewizor firmy Manta model 4214. Na poniższym wykresie przedstawiona została krzywa gamma, otrzymana na drodze doświadczeń.



Rysunek 3.6. Doświadczalna krzywa gamma telewizora Manta model 4214

Dla tego ekranu jesteśmy w stanie zaobserwować, że otrzymana funkcja zbliżona jest swoim kształtem do funkcji wykładniczej. Jednakże pewne jej cechy uniemożliwiają

znalezienie satysfakcjonującego modelu teoretycznego, do którego mogłaby być dopasowana. Chodzi tutaj przede wszystkim o lokalne spadki wartości luminancji, występujące wraz ze wzrostem poziomu jasności pikseli. Interesujący jest fakt, że pięć największych spadków występuje w podobnych odstępach. Taki charakter tej krzywej, może wynikać z jakości elementów zastosowanych do budowy tego telewizora. Jest on stosunkowo tani jeśli porównamy go z innymi urządzeniami o podobnych parametrach. Jeśli jednak chciałoby się wykorzystać ten telewizor w procesie kalibracji fotometru, należy spodziewać się błędów dopasowania do modelu teoretycznego rzędu 10%, co jest wynikiem nie satysfakcjonującym.

3.3 Dopasowanie krzywej doświadczalnej do modeli teoretycznych

Kolejnym etapem przeprowadzonych badań było znalezienie modelu teoretycznego najlepiej dopasowanego do danych doświadczalnych. W początkowej fazie pracy nad aplikacją przyjęto trzy zależności teoretyczne:

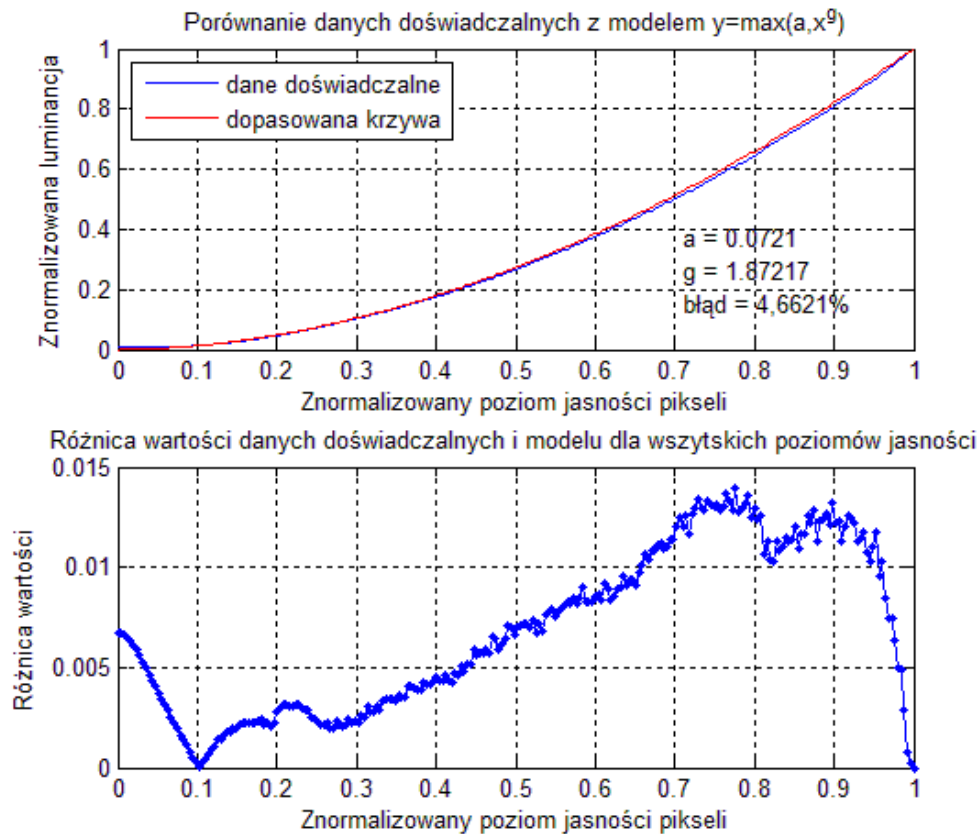
$$f(x) = x^\gamma \quad (5)$$

$$f(x) = x^\gamma + b \quad (6)$$

$$f(x) = \max(a, x^\gamma + b) \quad (7)$$

gdzie γ to współczynnik wykładniczej krzywej, a to wartość liniowej funkcji dla ciemnych odcieni szarości, b to stała określająca wartość poziomu czerni, a x to znormalizowany poziom jasności pikseli. Następnie dokonano analizy, której celem było znalezienie modelu o jak najmniejszym błędzie. W 80% przypadków, dla wszystkich sensorów przy wzmocnieniu równym 1 V/V, najlepsze dopasowanie występowało w przypadku zależności (7). Na rysunku 3.7 umieszczony został wykres porównujący ze sobą dane doświadczalne oraz najlepszy znaleziony model. Do określenia błędu wykorzystana została różnica wartości danych doświadczalnych oraz funkcji estymowanej w odniesieniu do wartości funkcji, wyrażona w procentach. W tym przypadku średni błąd wynosi w przybliżeniu 4,66%. Przy zastosowaniu powyższego algorytmu wyboru najlepszego dopasowania z trzech zależności, błąd maksymalny występował dla punktu, w którym funkcja modelu zmieniała charakter z liniowego na wykładniczy i wynosił on w przybliżeniu 8%. Najmniejszy błąd pojawiał się dla fragmentu o znormalizowanym poziomie jasności pikseli z przedziału 0.2 – 0.5.

Równocześnie obliczone zostało odchylenie standardowe różnicy wartości danych oraz funkcji estymowanej. Kształtowało się ono na poziomie 0,0031, przy średniej różnicy wynoszącej 0,0082. Oznacza to, że błąd dopasowania nie rozkładał się równomiernie w całym badanym przedziale.



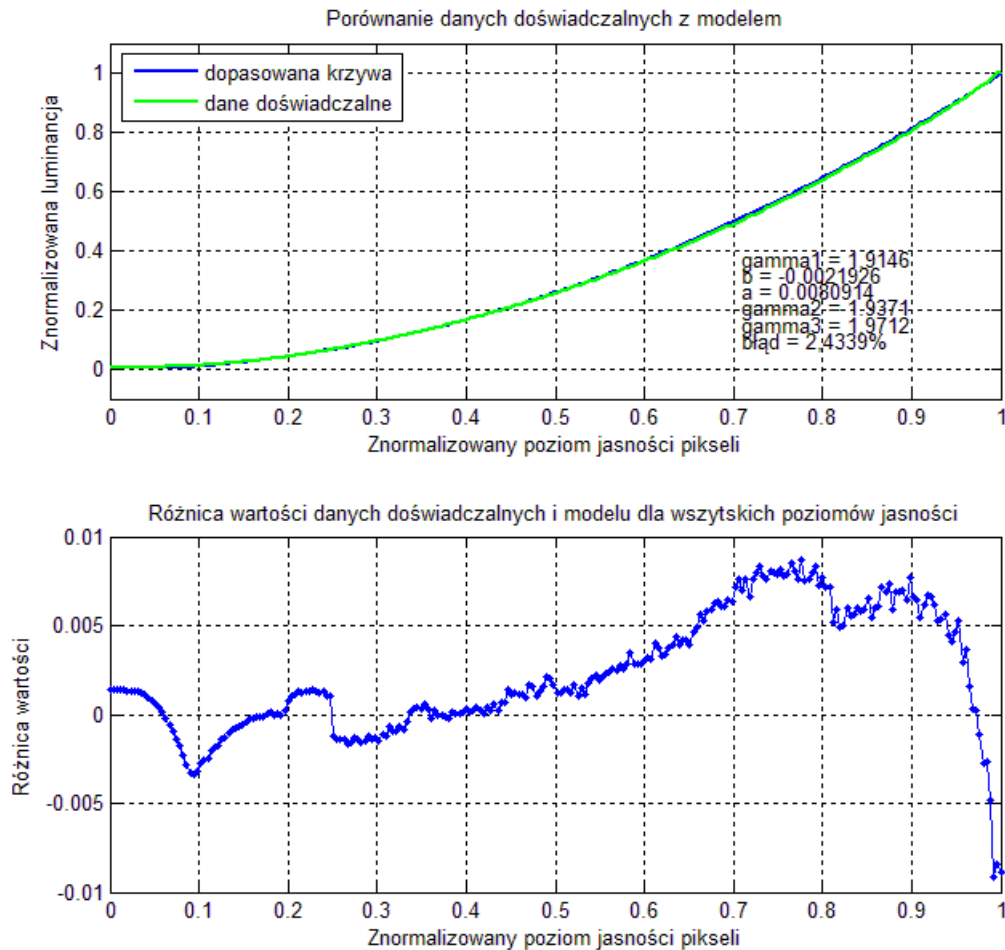
Rysunek 3.7. Porównanie danych doświadczalnych z modelem

Następnie analizie poddana została inna metoda optymalizacyjna. Przyjęto, że zależność, wykorzystana w dopasowaniu powinna mieć następującą postać:

$$f(x) = \begin{cases} \max(a, x^{\gamma_1} + b) & ,0 \leq x < 63 \\ x^{\gamma_2} + c & ,63 \leq x < 127 \\ x^{\gamma_3} + c & ,127 \leq x \leq 255 \end{cases} \quad (8)$$

Przykład modelu teoretycznego, otrzymanego przy pomocy drugiego algorytmu, wraz z danymi doświadczalnymi został umieszczony na rysunku 3.8. Współczynniki gamma sparametryzowane dla trzech różnych przedziałów nieznacznie się od siebie różnią. W tym przypadku udało się osiągnąć lepsze dopasowanie niż dla pierwszej metody. Rozbieżności pomiędzy dwoma funkcjami nie przekraczają 6%. Największy błąd występuje dla znormalizowanego poziomu jasności pikseli zbliżonego do 0.1, co

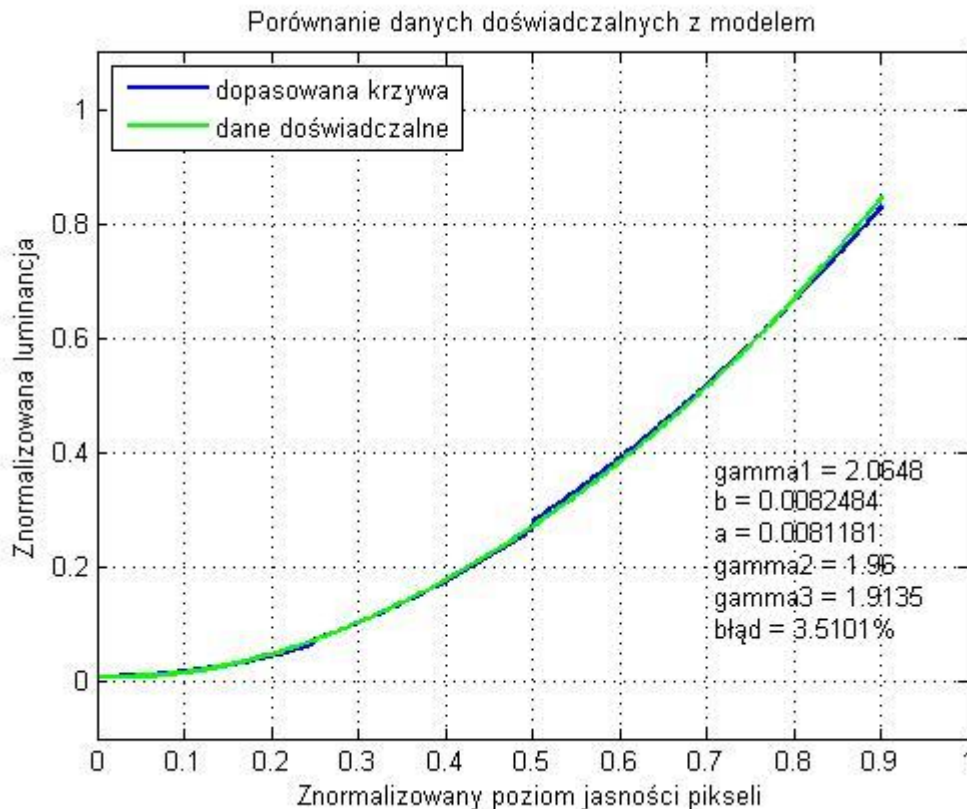
związane jest ze zmianą charakteru funkcji modelu z liniowego na wykładniczy. Średni błąd kształtował się na poziomie 3 – 4%. Odchylenie standardowe różnicy wartości dwóch krzywych wynosiło w tym przypadku 0,0012, przy średniej wartości różnicy 0,0035, co świadczy o nierównomiernym rozkładzie błędów również dla tego algorytmu.



Rysunek 3.8. Porównanie danych doświadczalnych z modelem wykorzystanym w aplikacji

Na tym etapie pracy pojawił się problem związany z brakiem kompletnych danych. Wynikał on z tego, że karta do akwizycji danych miała ograniczony zakres pomiarowy, co skutkowało tym, że niemożliwe było wyznaczenie luminancji dla wszystkich poziomów jasności. Efekt taki występował przy ustawieniu wzmożeń sygnału rejestrowanego przez fotometr do poziomu większego niż 1. Dlatego też koniecznością stała się selekcja pomiarów oraz zdefiniowanie modelu jedynie dla fragmentu, w którym dane zarejestrowane przez fotometr nie przekraczały poziomu napięcia wynoszącego 5 V. Poniższy wykres prezentuje porównanie funkcji doświadczalnej z funkcją estymowaną dla wzmożenia równego 5 V/V. Jak można

zaobserwować na rysunku 3.9, urządzenie nagrało poprawne wyniki dla 90% odcieni szarości. W związku z tym nie jest możliwe określenie wartości krzywej gamma dla brakującego fragmentu. W efekcie nie dałoby się przeprowadzić kolejnego etapu kalibracji, w którym dane doświadczalne muszą zostać odwzorowane na wartości luminancji pochodzące z pomiarów spektrofotometrycznych.

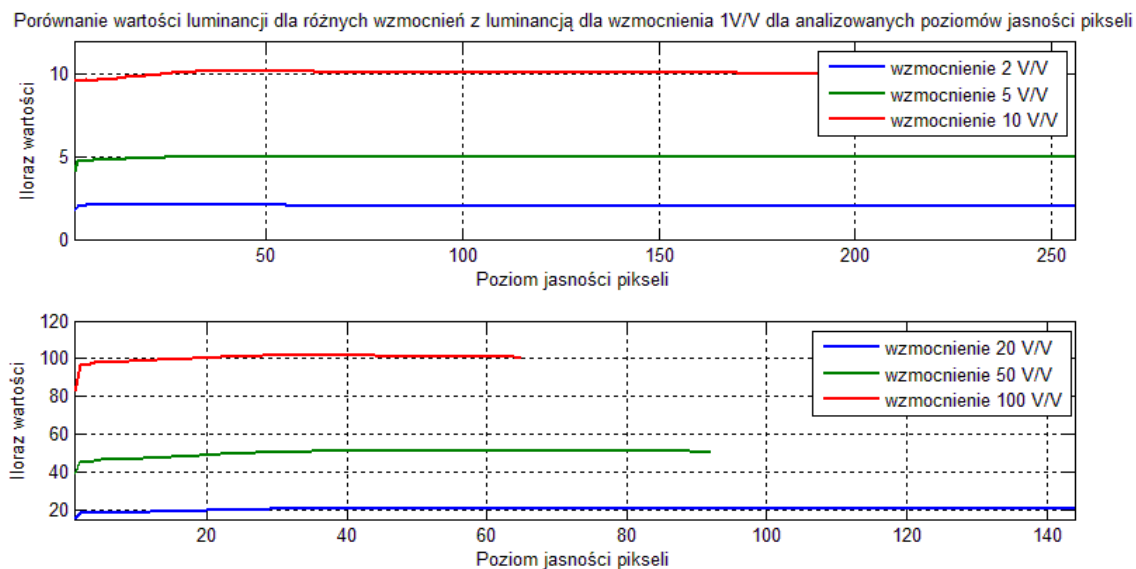


Rysunek 3.9. Porównanie danych doświadczalny z modelem dla wzmocnienia sygnału równego 5 V/V

W celu rozwiązania tego problemu, dokonano porównania wyników pochodzących z tego samego sensora dla wszystkich poziomów wzmocnienia. Przed tym krokiem niezbędne było znormalizowanie wszystkich danych luminancji w taki sposób, aby wartość jasności dla białego obrazu prezentowanego na ekranie wynosiła 1. W wyniku porównania udało się ustalić, że przebiegi otrzymane dla wszystkich zakresów wzmocnienia pokrywają się we wspólnych fragmentach. Różnice, które zaobserwowano, nie przekraczały 1%. Mogły być one spowodowane tym, że nawet w wypadku zapewnienia optymalnych warunków pomiarowych, trzeba liczyć się z wpływem światła zewnętrznego na dokładność pomiaru. To porównanie umożliwiło estymowanie brakującego fragmentu oraz przeprowadzenie kalibracji dla wszystkich dostępnych wzmocnień. Należy tutaj jednak zaznaczyć, że najważniejszą rolę odgrywa

zawsze pomiar, dla którego możliwe jest wykreślenie całego profilu krzywej gamma. Jeśli przeprowadza się pomiary przy pomocy fotometru, stosuje się takie wzmocnienie rejestrowanego sygnału, aby otrzymane wyniki mieściły się w zakresie pracy karty akwizycyjnej. W związku z tym w procesie kalibracji oczekuje się jak najdokładniejszego odwzorowania wartości luminancji dla odcieni szarości, które zawierają kompletne dane. Estymowany fragment funkcji gamma ma jedynie na celu zobrazowanie rzędu wielkości poziomu jasności otrzymanej w wyniku pomiaru napięciowego.

Równocześnie na tym etapie pracy, podczas porównywania danych dla wszystkich zakresów wzmocnienia tego samego sensora, możliwe było obliczenie rzeczywistego wzmocnienia rejestrowanych wartości przez fotometr. Pod tym pojęciem należy rozumieć względną wartość wzmocnienia sygnału, w odniesieniu do sygnału, dla którego wzmocnienie wynosi 1 V/V. W tym celu porównane ze sobą zostały krzywe gamma zarejestrowane przez poszczególne sondy. Wartości luminancji na wszystkich zakresach wzmocnienia, dla poszczególnych poziomów jasności pikseli, zostały porównane z wartościami krzywej gamma dla wzmocnienia równego 1 V/V, co zostało zaprezentowane na rysunku 3.10.



Rysunek 3.10. Porównanie wartości luminancji dla różnych wzmocnień z luminancją dla wzmocnienia 1 V/V dla analizowanych poziomów jasności pikseli, dla sensora pierwszego.

Po pierwsze należy zaznaczyć, że dla dużych wzmocnień sygnału, możliwe było porównanie jedynie fragmentów krzywych gamma, co wynika z ograniczenia zakresu pomiarowego przez fotometr. Na powyższych wykresach można zauważyć, że iloraz

wartości jest stały, dla poziomów jasności pikseli większych niż 25, dla wszystkich prezentowanych wyników. Jednocześnie dla odcieni szarości z przedziału 0 – 24 iloraz ten nie jest stały, ale jego wartość jest rosnąca. Może być to spowodowane wpływem warunków laboratoryjnych. Podczas wyświetlania na ekranie ciemnych obrazów, na rejestrowane wartości może mieć wpływ światło zewnętrzne odbite przez monitor. Po dokonaniu wstępnej analizy, obliczone zostały średnie wartości ilorazu dla wszystkich zakresów wzmocnienia. Równocześnie w celu określenia odchylenia od wartości średniej policzony został błąd średni oraz błąd maksymalny w odniesieniu do wartości zadeklarowanej. Otrzymane wyniki zostały zamieszczone w tabeli 3.1.

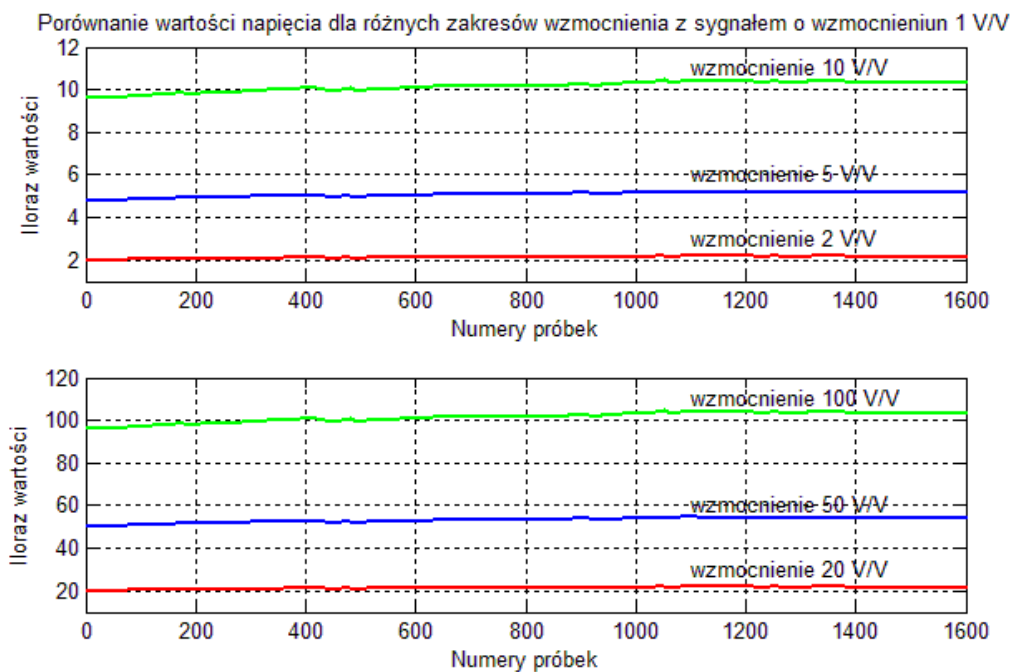
Tabela 3.1. Średnie wartości wzmocnienia, błąd średni oraz błąd maksymalny dla wszystkich sensorów oraz dla wszystkich zakresów wzmocnienia

Zadeklarowane wzmocnienie [V/V]	Sensor 1			Sensor 2		
	Średnie wzmocnienie	Średni błąd [%]	Błąd maks. [%]	Średnie wzmocnienie	Średni błąd [%]	Błąd maks. [%]
2	2,0234	1,170	2,341	1,9602	1,990	3,642
5	5,0392	0,784	2,571	4,8591	2,818	4,632
10	10,0401	0,401	6,548	9,6421	3,579	8,431
20	20,2342	1,171	7,541	19,5876	2,062	8,561
50	49,8881	0,224	10,342	48,1302	3,740	11,209
100	99,2342	0,766	15,651	98,0933	1,907	11,108
Zadeklarowane wzmocnienie [V/V]	Sensor 3			Sensor 4		
	Średnie wzmocnienie	Średni błąd [%]	Błąd maks. [%]	Średnie wzmocnienie	Średni błąd [%]	Błąd maks. [%]
2	2,0348	1,740	3,128	1,9174	4,130	5,732
5	5,0708	1,416	4,653	4,8269	3,462	4,982
10	10,148	1,480	5,351	9,7584	2,416	4,763
20	20,2451	1,226	8,347	19,7203	1,398	7,294
50	49,8832	0,234	10,657	48,2973	3,405	10,491
100	98,2956	1,704	11,839	99,1921	0,808	11,645

Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, że wzmocnienie sygnału otrzymane w wyniku przeprowadzonej analizy nieznacznie odbiega od wartości, które można zadeklarować podczas pracy z fotometrem. Należy również zaznaczyć, że w przypadku wzmocnień 20, 50, 100 V/V, fragmenty krzywych poddane analizie były niekompletne. W związku z tym większy wpływ na otrzymany iloraz miały wartości luminancji, dla poziomów jasności z przedziału 0 – 24, które mogą być obciążone wspomnianym wcześniej błędem. Można również zaobserwować, że dla większych zakresów wzmocnienia rośnie błąd maksymalny, który występuje w przypadku ciemnych barw. Może on dochodzić do kilkunastu procent. Dlatego też, do wyliczenia

rzeczywistej wartości względnego wzmocnienia, o jak najmniejszym błędzie, niezbędne byłoby porównanie całej krzywej gamma, co nie jest możliwe ze względu na to, że zakres pomiarowy fotometru ograniczony jest do przedziału -5 do 5 V.

W trakcie badań właściwości fotometru, porównane zostały ze sobą również sygnały rejestrowane przez fotometr dla tego samego odcienia szarości, dla wszystkich zakresów wzmocnienia. W tym celu nagrane zostały przebiegi dla poziomu jasności pikseli równego 20, z których analizie poddano skorelowane ze sobą fragmenty o długości 1600 próbek. Następnie porównano ze sobą wartości napięcia dla poszczególnych próbek, dla różnych zakresów wzmocnienia z wartościami napięcia dla sygnału o wzmocnieniu 1 V/V. Podczas obliczeń uwzględniony został offset generowany przez fotometr, wynikający z budowy urządzenia.



Rysunek 3.11. Porównanie wartości napięć sygnału dla różnych zakresów wzmocnienia z sygnałem o wzmocnieniu 1 V/V dla 100 ms

Na rysunku 3.11 można zaobserwować, że otrzymane ilorazy dla badanego przypadku w znacznym stopniu odpowiadają zadeklarowanym wzmocnieniom sygnału. W tym wypadku średni błąd obliczonego wzmocnienia, w stosunku do wartości bezwzględnej nie przekraczał 5% dla wszystkich zakresów wzmocnienia. Równocześnie należy zaznaczyć, że dla pojedynczych próbek pojawiały się wartości ilorazu odbiegające o kilkanaście procent od zadeklarowanego wzmocnienia, ale takie przypadki nie przekraczały 1% analizowanych danych. Należy także zaznaczyć, że niemożliwe było

przeprowadzenie analogicznej analizy dla jasnych barw, ze względu na pojawiające się przesterowanie sygnału dla dużych wzmoceń.

3.4 Odzworowanie wartości pomiarów fotometrycznych na luminancję

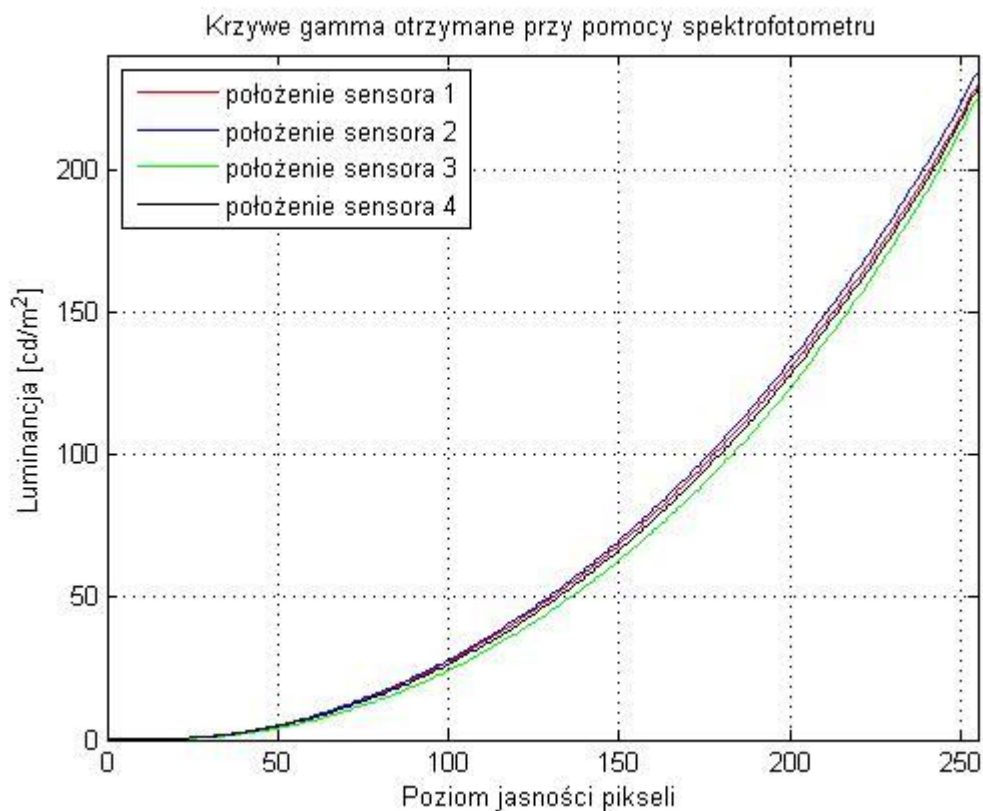
Ostatnim etapem pracy nad aplikacją było przeprowadzenie badań właściwości monitora przy pomocy spektrofotometru ColorMunki Photo. Przy pomocy tego urządzenia wykreślone zostały profile krzywej gamma, w których luminancja określona została za pomocą docelowej jednostki, czyli cd/m^2 . Najważniejszym aspektem związanym z tymi pomiarami było określenie różnic w jasności emitowanego przez monitor światła, w zależności od umiejscowienia spektrofotometru. Równomierność rozkładu luminancji na płaszczyźnie ekranu jest bardzo ważną cechą wyświetlacza, w odniesieniu do umiejscowienia sensorów w czasie procesu kalibracji. Do otrzymania jak najdokładniejszego odzworowania niezbędne było umieszczenie urządzenia ColorMunki Photo w takich miejscach, w których potem umieszczone będą sondy pomiarowe. W celu lepszego poznania rozkładu podświetlenia matrycy ciekłokrystalicznej, przeprowadzone zostały pomiary dla dziewięciu punktów ekranu. Następnie wyniki zostały porównane ze sobą, w celu określenia procentowych różnic. Zostały one zebrane w poniższej tabeli.

Tabela 3.2. Wartości luminancji otrzymane z pomiarów spektrofotometrycznych (spektrofotometrem ColorMunki Photo) dla najjaśniejszej barwy w różnych punktach ekranu

OBSZAR EKRANU	Wartości luminancji dla białego obrazu [cd/m^2]	Różnica względem środka ekranu [%]
Środek	229,697	0
Lewo-góra	232,729	1,32
Środek-góra	231,190	0,65
Prawo-góra	234,773	2,21
Lewo-środek	237,667	3,47
Prawo-środek	246,189	7,18
Lewo-dół	238,471	3,82
Środek-dół	249,750	8,73
Prawo-dół	252,460	9,91

Jak można wywnioskować z powyższych danych, monitor charakteryzuje się dodatnimi różnicami jasności w zewnętrznych punktach pomiarowych. Szczególnie uwidacznia się

to w dolnych częściach, gdzie różnice sięgają prawie 10%. Wyniki te są potwierdzeniem jednej z wad podświetlania niektórych wyświetlaczy LCD.

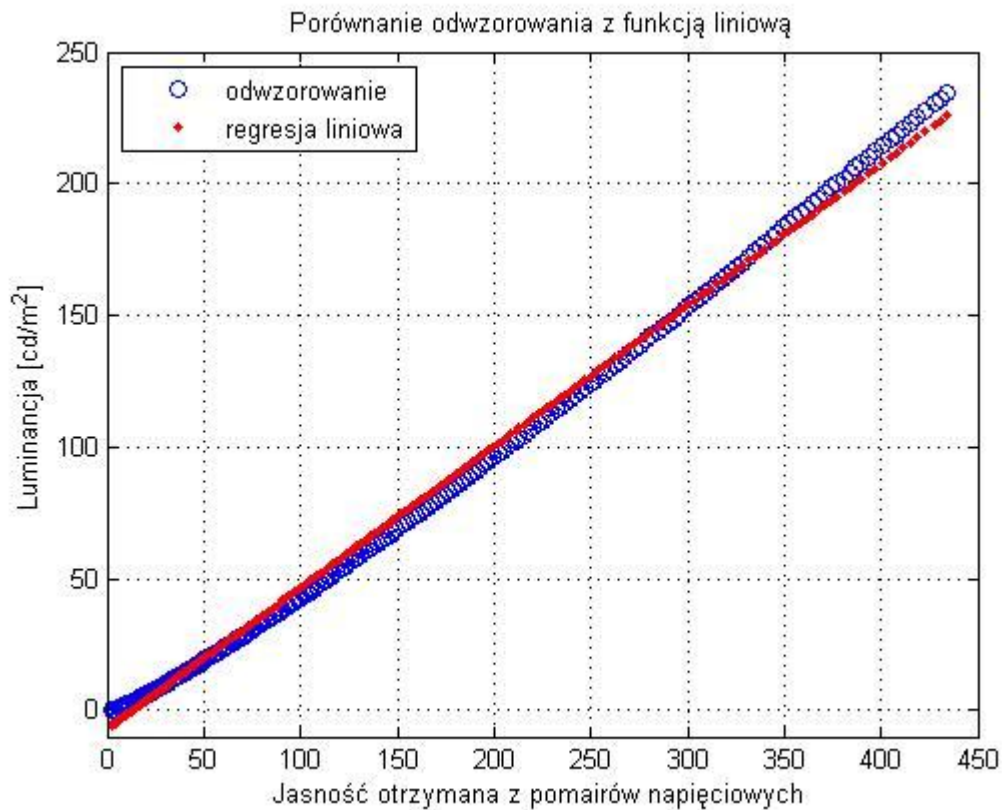


Rysunek 3.12. Krzywe gamma otrzymane przy pomocy spektrofotometru w punktach, w których podczas kalibracji powinny znajdować się sensory

Na rysunku 3.12 umieszczone zostały wykresy krzywej gamma, otrzymane w wyniku pomiarów spektrofotometrem w punktach, w których podczas kalibracji powinny znajdować się sensory fotometru. Dane te zostały zapisane do pamięci programu i to na ich podstawie tworzone jest końcowe odwzorowanie. Pomimo umiejscowienia sond w niewielkiej odległości od siebie można zauważyć różnice w wartościach luminancji, które są szczególnie widoczne dla wysokich poziomów jasności pikseli. Dlatego też niezbędne było wykreślenie czterech niezależnych profili, z których każdy przypisany jest do innego sensora.

Do przeprowadzenia odwzorowania wartości uzyskanych z pomiarów napięciowych na wartości luminancji wyrażone w cd/m^2 wykorzystano metodę, w której na jednej z osi wykresu umieszcza się dane z fotometru dopasowane do odpowiedniego modelu na drugiej natomiast dane spektrofotometryczne. Jeśli obydwie krzywe mają zbliżone wartości współczynnika gamma, powinno otrzymać się zależność

liniową. Poniższy wykres prezentuje przykładowe dopasowanie otrzymanej funkcji do funkcji liniowej z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów.



Rysunek 3.13. Porównanie otrzymanego odwzorowania z funkcją liniową

Na rysunku 3.13 można zaobserwować, że odwzorowanie zbliżone jest do zależności liniowej. Największe różnice występują dla dużych wartości luminancji, czyli dla wysokich poziomów jasności pikseli. Spowodowane to może być błędem, który pojawił się podczas dopasowywania danych do modelu teoretycznego krzywej gamma. Odchylenia od funkcji powstałej w wyniku wykorzystania metody najmniejszych kwadratów nie przekraczają jednak nigdy 5%. Ponieważ odwzorowujemy dwie wartości wykładnicze, gęstość punktów spada wraz z oddalaniem się od początku układu współrzędnych. Jest to doskonałą ilustracją nieliniowości ludzkiego wzroku. Właściwość ta mówi, że ludzkie oko jest bardziej wrażliwe na mniejsze zmiany barw ciemnych niż stosunkowo większe zmiany barw jasnych.

3.5 Pomiary fotometryczne, przy zasłonięciu sensorów

Ostatnim zagadnieniem poruszonym w rozdziale poświęconym analizie wyników będzie omówienie pomiarów napięcia dokonanych przy całkowitym zasłonięciu sond rejestrujących. Do przeprowadzenia tych badań niezbędne było wykorzystanie folii aluminiowej. Jest ona materiałem, który praktycznie nie przepuszcza fal elektromagnetycznych z zakresu światła widzialnego. Celem takiego doświadczenia było sprawdzenie, czy na wyniki kalibracji mają wpływ czynniki nie związane bezpośrednio z emisją światła. Do tych czynników zaliczyć można niedokładność fotometru wynikającą z jego budowy. Chodzi przede wszystkim o to, że w przypadku gdy sensory są całkowicie zasłonięte, czyli do fotodiod nie dociera światło zewnętrzne, układ pomiarowy powinien rejestrować napięcie równe 0 V. W trakcie badań okazało się jednak, że w rzeczywistości pojawia się pewien offset, zależny od czasu pracy urządzenia.

Tabela 3.3. Wartości pomiarów napięcia przeprowadzone przy całkowitym zasłonięciu sensorów dla urządzenie pracującego przez okres trwający co najmniej 30 minut

Wzmocnienie [V/V]	sensor 1 [V]	sensor 4 [V]
1	0,00471	0,00433
2	0,00953	0,00862
5	0,02368	0,02156
10	0,04723	0,04317
20	0,09421	0,08671
50	0,23558	0,21543
100	0,47034	0,43217

Powyżej zamieszczone są wartości średniego napięcia zarejestrowanego przez fotometr, który był podpięty do zasilania przez co najmniej 30 min, z sensorami zasłoniętymi folią aluminiową. Można zaobserwować, że wzrost napięcia jest proporcjonalny do wzrostu wzmocnienia. Należy także zaznaczyć, że w trakcie badań, zostało zauważone, że wartość offsetu zależy od czasu pracy urządzenia. Przy przeprowadzeniu pomiarów zaraz po uruchomieniu fotometru, otrzymane wyniki różniły się od tych, które zostały otrzymane po tym, jak urządzenie było podłączone do zasilania przez minimum 30 minut. Dlatego też nie jest zalecane dokonywanie pomiarów z użyciem fotometru, bez uprzedniego odczekania pewnego odstępu czasu. Po danym okresie napięcia nagrywane

przez fotometr stabilizują się, co eliminuje możliwość pojawienia się różnych wartości offsetu zależnych od czasu przeprowadzenia pomiaru.

Podsumowanie

Zagadnienie wyświetlania obrazów na ekranach wykonanych w różnych technologiach oraz przez różnych producentów jest przedmiotem wielu analiz. Przed dokonaniem zakupu nowego telewizora lub monitora komputerowego większość klientów stara się porównać ze sobą różne oferty. Zainteresowani są oni parametrami, które są zależne od przeznaczenia urządzenia. Dla wyświetlaczy wykorzystywanych profesjonalnie, na przykład przez fotografów, niezbędne jest dokonywanie okresowej kalibracji w celu dostosowania ich do potrzeb użytkownika. Proces ten odbywa się przy wykorzystaniu profesjonalnych urządzeń takich jak spektrofotometry lub kolorymetry.

Celem pracy było poznanie właściwości fotometru laboratoryjnego oraz stworzenie aplikacji, która dokonywałaby kalibracji tego urządzenia. Pod pojęciem kalibracji zawierało się znalezienie odwzorowania rejestrowanych danych na wartości wyrażone w jednostce luminancji czyli w nitach. Miała ona być przeprowadzona niezależnie dla czterech sensorów, które wchodzi w skład fotometru. Do tego celu posłużyć miał wzorcowy monitor, który został uprzednio zbadany spektrofotometrem ColorMunki firmy X-rite.

W wyniku prac cele zostały spełnione. Zaprojektowana aplikacja dokonuje kalibracji fotometru, co umożliwi prowadzenie dalszych badań urządzeń wyświetlających z wykorzystaniem tego narzędzia. Kalibracja przebiega w trzech etapach. W pierwszym dokonywana jest rejestracja sygnału z wzorcowego ekranu oraz jego wstępna analiza. W drugim otrzymana doświadczalnie krzywa gamma dopasowywana jest do modelu teoretycznego. W ostatnim kroku wartości zarejestrowane przez fotometr odwzorowywane są na wartości luminancji. Dodatkowa aplikacja posiada funkcje, które ułatwiają analizę właściwości badanego monitora lub telewizora.

Do wad programu należy zaliczyć to, że wymaga on zapewnienia odpowiednich warunków oraz urządzeń. Do przeprowadzenia kalibracji niezbędne jest posiadanie spektrofotometru oraz monitora wzorcowego. Urządzenia wykorzystywane w tym procesie, muszą pracować przez kilkadziesiąt minut przed rozpoczęciem procesu. Należy pamiętać także o tym, że pomiary powinny być przeprowadzane w zaciemnionym pomieszczeniu, a sensory umieszczone w odpowiednich punktach

ekranu. Jeśli nie spełni się tych wymagań, otrzymane wyniki obarczone są zbyt dużym błędem i nie możliwe jest otrzymanie satysfakcjonującego odwzorowania.

Rozwój aplikacji związany jest z umożliwieniem przeprowadzenia kalibracji w przypadku, gdy parametry wzorcowego monitora odbiegają od założeń teoretycznych. Można by było również rozszerzyć funkcjonalność aplikacji poprzez dodanie nowych funkcji. Przykładem takiej funkcji mogłoby być stworzenie skryptu, który umożliwiłby użytkownikowi poznanie przestrzennego rozkładu luminancji monitora po przeprowadzeniu kalibracji fotometru.

Bibliografia

- [1] Hsien-Che Lee, *Introduction to color imaging science*, Cambridge University Press, 2005, rozdziały 6, 13, 15-18, 20.
- [2] *Data Acquisition Toolbox™ Reference R2013b*, Matlab&Simulink, 2013.
- [3] Jonathan Sachs, *Color Management*, Digital Light & Color, 2008,
- [4] Tomasz P. Zieliński, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów od teorii do zastosowań*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005, rozdziały 1-2, 8-9.
- [5] Sylvain Tourancheau, Kun Wanga, Jarosław Bulat, Romain Cousseaud, Lucjan Janowski, Kjell Brunnström, Marcus Barkowsky, *Reproducibility of crosstalk measurements on active glasses 3D LCD displays based on temporal characterization*, IEEE, 2012.
- [6] Charles Poynton, *A Technical Introduction to Digital Video*, John Wiley & Sons, 1996, rozdział 6.
- [7] *NI USB-6210 DAQ - Edge*,
http://edge.rit.edu/content/P13505/public/FinalDocuments/Drawing%20Package%20Files/NI_USB-6210.pdf.
- [8] *BenQ XL2410T LED Monitor Tech Specs*, <http://promotions.benq.us/Gaming/tech-specs.html>.
- [9] Panasonic Smart Viera TX-P42ST50E - specyfikacja,
http://www.panasonic.pl/html/pl_PL/Produkty/Telewizory/Telewizory+plazmowe/TX-P42ST50E/specifications/8951631/index.html.
- [10] COLORMUNKI SOLUTIONS, http://xritephoto.com/documents/literature/en/L7-511_ColorMunki_Family_en.pdf.
- [11] *A Standard Default Color Space for the Internet – RGB*, ver1.10,
<http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>.
- [12] <http://www.tftcentral.co.uk/articles/calibrating.htm>.
- [13] *Przestrzeń barw i jej układy współrzędnych*,
<http://mst.mimuw.edu.pl/lecture.php?lecture=gk1&part=Ch12>.