

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Roberta Strąkowskiego

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Roberta na temat *Analiza dryftu temperaturowego w bolometrycznych kamerach termowizyjnych* wykonana w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej, pod opieką promotora prof. dr. hab. inż. Bogusława Więcka.

Recenzja została opracowana na podstawie:

- uchwały Rady Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej z dnia 4 lipca 2017, która powierzyła mi obowiązki recenzenta w przewodzie mgr. inż. Roberta Strąkowskiego,
- pisma Dziekana Wydziału z dnia 5 lipca 2017, przekazującym pracę do recenzji.

1. Wniosek

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską stwierdzam, że jej ocena jest pozytywna. Rozprawa została przygotowana pod opieką promotora. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje odpowiedni poziom ogólnej wiedzy teoretycznej Autora w dziedzinie nauk technicznych w zakresie dyscypliny *Elektronika*. Rozprawa wykazuje również odpowiednie przygotowanie Autora do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stwierdzam, że spełnione zostały wymagania stawiane rozprawom doktorskim w tym wymagania określone w Art. 13 ustępu 1 *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dziennik Ustaw nr 65, poz. 595 z dnia 14 marca 2003 r z późn. zm.).

W związku z Art. 14 ustęp 2 punkt 3 tej Ustawy stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony, w celu nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych w zakresie dyscypliny *Elektronika*.

2. Uzasadnienie wniosku

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 143 strony i składa się z sześciu rozdziałów oraz jednego załącznika. Na wstępie rozprawy zamieszczono słownik terminów i wykaz symboli stosowanych w pracy. Na końcu rozprawy zamieszczono liczący 67 pozycji spis aktualnych i poprawnie dobranych pozycji literaturowych, do których Autor odnosi się w tekście. Zaproponowany układ rozprawy jest poprawny i tworzy logiczną całość. Treść rozprawy jest zrozumiała a zamieszczone rysunki i wykresy są czytelne i prawidłowo opisane. Edycja rozprawy jest staranna. Zawiera one nieliczne drobne usterki językowe i edytorskie. Zastosowano odpowiednią numerację wzorów, rysunków, tablic i pozycji literatury.

2.2. Wybór tematu rozprawy doktorskiej

Temat rozprawy jest aktualny i dotyczy kluczowego, dla konstruktorów bolometrycznych kamer termowizyjnych problemu analizy i redukcji dryftu temperaturowego. Zagadnienie to jest szczególnie ważne z punktu widzenia badań medycznych i metod badań nieniszczących z zastosowaniem aktywnej jak i pasywnej termografii. Rozpatrywane w pracy zagadnienie analizy i redukcji dryftu temperaturowego ma istotne znaczenie praktyczne. Analizując dokładnie treść pracy, głównym osiągnięciem Autora jest opracowanie oryginalnej metody korekcji dryftu temperaturowego stąd warto zadać sobie pytanie czy tytuł pracy nie powinien brzmieć np.: „Metoda korekcji dryftu temperaturowego dla bolometrycznych kamer termowizyjnych”.

2.3 Ocena merytoryczna rozprawy

W rozdziale pierwszym stanowiącym jednocześnie wstęp teoretyczny do zagadnień poruszanych w rozprawie zamieszczono rzetelnie i skrupulatnie przygotowany przegląd literatury dotyczący aktualnie stosowanych metod korekcji dryftu temperaturowego. Przegląd uzupełniono bardzo dojrzałą dyskusją na temat wad i zalet spotykanych w literaturze metod korekcji dryftu temperaturowego bolometrycznych kamer termowizyjnych oraz metod kalibracji tego typu kamer.

W trakcie dyskusji Autor zwraca uwagę na bardzo istotne ograniczenie w sposobie weryfikacji spotykanych metod korekcji dryftu temperaturowego a mianowicie, w większości przypadków metody te dają dobre wyniki podczas działania kamery w ustalonych warunkach wymiany ciepła. Autor słusznie zauważa, że w trakcie eksploatacji kamery warunki te odbiegają od warunków ustalonych uzyskiwanych w laboratorium.

Analiza istniejącego stanu wiedzy pozwoliła Autorowi w bardzo szczegółowy sposób, poparty przykładami praktycznymi opisać problem badawczy jakim jest dryft temperaturowy i istotę jego powstawania a następnie w sposób prawidłowy i zrozumiały sformułować tezę i cele pracy. Z pośród kilku celów za bardzo ważny i oryginalny uważam opracowanie nowej metody korekcji niejednorodności sygnału matrycy detektorów w termowizyjnej kamerze bolometrycznej pozwalającej na aktualizację współczynników korekcji w czasie rzeczywistym bez konieczności częstego stosowania mechanicznej przesłony korekcyjnej. Pozwoli to na wydłużenie czasu nieprzerwanej akwizycji termogramów co jest szczególnie ważne w badaniach nieniszczących i medycznych.

W rozdziale drugim Autor w zwięzły sposób opisał, skonstruowaną i wykonaną do celów badań kamerą termowizyjną z niechłodzoną matrycą detektorów bolometrycznych wykonanych z tlenku wanadu (VOx). Ze względu na bezosobową formę stosowaną w opisie nie jest do końca jasne czy całość prac projektowo-konstrukcyjnych została zrealizowana w pełni przez Autora czy przez zespół, w którym uczestniczył Autor. Ta kwestia wymaga wyjaśnienia. Zawarty opis, pomimo swojej ogólnej formy,

pozwala stwierdzić, że Autor doskonale orientuje się w budowie kamery i zna wymagania konstrukcyjne jakie muszą spełniać układy elektroniczne i mechaniczne kamery termowizyjnej. W szczególności odnosi się to do prawidłowego zasilania i stabilizacji cieplnej matrycy. W rozdziale zamieszczono również opis zastosowanej matrycy detektorów VOx i argumenty uzasadniające jej zastosowanie w zaprojektowanej kamerze. Stwierdzam, że wybór opisywanej matrycy jest słuszny a w konstrukcji kamery nie dostrzegam błędów. Istotnym i słusznym z punktu widzenia badawczego było zastosowanie w kamerze systemu dodatkowych czujników temperatury pozwalających na monitorowanie stanu cieplnego różnych sekcji kamery. W rozdziale dokładnie scharakteryzowano zastosowane czujniki i ich rozmieszczenie posługując się do tego celu rysunkiem przedstawiającym model bryłowy CAD kamery. Pewnym ułatwieniem w identyfikacji czujników na rysunku 2.5. byłoby zastosowanie odnośników co warto rozważyć przy opracowywaniu przyszłych publikacji naukowych.

W rozdziale trzecim zaproponowano uproszczony model radiacyjny kamery bolometrycznej w celu oszacowania poziomu mocy promieniowania elementów konstrukcyjnych kamery, wpływających na całkowity bilans energii radiacyjnej docierającej lub emitowanej z detektora bolometrycznego. Opracowany model uwzględniał dwa warianty konstrukcyjne kamery: bez i z radiacyjnym ekranem o temperaturze równej temperaturze detektora. Przyjęte podczas opracowywania modelu założenia są słuszne a opracowany model prawidłowy co pokazują wyniki uzyskane na podstawie symulacji numerycznych uwzględniających różne przypadki radiacyjnej wymiany ciepła między elementami konstrukcyjnymi kamery, obiektem i otoczeniem. Z punktu widzenia zagadnień projektowania kamer bolometrycznych oraz poszukiwania metod ograniczania niejednorodności rozkładu wartości temperatury na powierzchni matrycy przeprowadzone symulacje stanowią cenny wkład Autora w szeroko pojętą termografię w podczerwieni. Pomimo dużej staranności w przygotowaniu rozdziału na jego początku (str. 45, wiersz 2- 4) pojawiło się stwierdzenie „W przypadku temperatury detektora o wartości większej od temperatury obiektu, promieniowanie obiektu ogrzewa sensor bolometryczny i jego temperatura rośnie.”, które moim zdaniem nie do końca jest prawdziwe i wymaga wyjaśnienia.

W rozdziale 4, który stanowi moim zdaniem główny rozdział pracy, zawarto opis oryginalnej metody korekcji dryftu temperaturowego zaproponowanej przez Doktoranta, opis stanowiska badawczego, opis pozyskanych w trakcie eksperymentów danych pomiarowych, charakterystykę opracowanego modelu korekcji sygnałów z matrycy detektorów, wyniki estymacji parametrów modeli i poprawności ich działania oraz wyniki kalibracji całego systemu termowizyjnego.

Opracowaną metodę korekcji dryftu temperaturowego zaprezentowano w postaci czytelnego schematu blokowego, który następnie szczegółowo opisano. Jest to metoda wielowariantowa i wieloetapowa. W przedstawionej ogólnej formie może być praktycznie wykorzystana w trakcie projektowania kamer termowizyjnych i ich oprogramowania systemowego. Istota działania zaproponowanej metody nie budzi większych wątpliwości jednak wyjaśnienia wymaga brak uwzględniana w metodzie procedury oznaczania i korekty martwych pikseli, które mogą pojawiać się w matrycach bolometrycznych. Z treści pracy wynika, że Autor stosował tego typu operację jednak nie zawarł jej w opisie metody. Z punktu widzenia uniwersalności metody warto rozważyć uzupełnienie algorytmu postępowania o tego typu czynność.

W celu weryfikacji metody Autor zaplanował i przeprowadził szereg eksperymentów służących wyznaczeniu charakterystyk pomiarowych skonstruowanej kamery. Wykorzystał do tego celu stanowisko badawcze składające się z komory klimatycznej i technicznego modelu ciała czarnego. Zakres badań obejmował symulacje różnych warunków środowiskowych eksploatacji kamery oraz różnego rodzaju stany przejściowe, w których może znajdować się kamera w trakcie eksploatacji.

Doktorant wykazał tutaj bardzo dobre przygotowanie do planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych. Badania były prowadzone w warunkach laboratoryjnych i jak wynika z rys. 4.4. przestrzeń między przepustem obserwacyjnym komory a technicznym ciałem czarnym była otwarta. Tutaj rodzi się pytanie czy zweryfikowano wpływ oddziaływania radiacyjnego otoczenia a w szczególności osób poruszających się w okolicy stanowiska na niejednorodności rozkładu temperatury na termogramach i czy monitorowano zmiany temperatury powietrza w pomieszczeniu w trakcie badań?

W trakcie eksperymentów obrazy termograficzne rejestrowane były w formacie RAW wraz z danymi pomocniczymi z czujników monitorujących stan cieplny kamery. Dane rejestrowano na komputerze, z którym kamera była połączona przez złącze USB. Zebrane dane posłużyły do opracowania modeli korekcji odpowiednio głównego składnika dryftu termicznego, składnika wywołanego szumem ustalonym i składowej wynikającej z niejednorodności resztkowej. Analizę składowych dryftu i estymację współczynników modeli przeprowadzono w środowisku obliczeniowym Matlab wykorzystując do tego samodzielnie przygotowane przez Autora procedury.

Autor bardzo skrupulatnie i metodycznie podszedł do budowy modeli korekcji składowych dryftu temperaturowego każdorazowo szczegółowo analizując zebrane charakterystyki kamery, wydzielając obszary modelowania, dobierając klasę funkcji modelującej i w końcu rząd wielomianu. Przeprowadzone analizy oraz badania były bardzo czasochłonne a liczba różnych możliwych kombinacji rozpatrywanych przypadków duża. Dzięki metodycznemu i systematycznemu działaniu Doktorant świetnie poradził sobie z analizą zebranych danych i prawidłowym wyciągnięciem wniosków, które konsekwentnie wyrażał w treści rozdziału. W trakcie analizy rozdziału pojawiło się jednak kilka zagadnień dyskusyjnych, które wymagają wyjaśnienia:

- Przed przystąpieniem do korekcji niejednorodności resztkowej, w celu usunięcia szumu ustalonego zastosowano filtr Gaussa o parametrze $\sigma=9$. Z czego wynikał dobór metody eliminacji szumu ustalonego na tym etapie badań i czy oceniono wpływ parametru filtru na eliminację pozostałych składników dryftu temperaturowego?
- Zarówno w przypadku określania niejednorodności resztkowej jak i głównego składnika dryftu zaproponowano podział obszarów korekcji rezygnując z wygładzania granic nieciągłości funkcji. Spowodowało to, że w przypadku modelu korekcji głównego składnika dryftu na obrazie widoczne są granice obszarów. Z punktu widzenia ilościowego faktycznie różnice te są nieistotne, jednak z punktu widzenia jakościowego mogą ujawnić się w trakcie analizy jakościowej obrazów rejestrowanych w trakcie badań nieniszczącymi metodami termografii aktywnej. W tego typu badaniach bardzo często defekty strukturalne objawiają się niewielkimi różnicami temperaturowymi a obecność dodatkowych artefaktów może prowadzić do fałszywych wniosków.

W dalszej części rozdziału Doktorant zaproponował koncepcję estymacji współczynników modeli korekcji z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Zastosowanie tej technologii zostało dobrze uzasadnione zarówno przeglądem zalet i wad tego typu rozwiązań, prawidłowym doбором topologii i parametrów sieci oraz odpowiednim przygotowaniem danych do procesu trenowania i testowania odpowiedzi sieci na nieznanie wcześniej wartości parametrów. Wyjaśnienia wymaga jednak aspekt implementacji rozwiązania w oprogramowaniu kamery. Z treści podrozdziału 4.3. wynika, że wszystkie operacje wykonywane były na wcześniej zarejestrowanych danych z wykorzystaniem komputera zewnętrznego co czyni dyskusyjnym użycie pojęcia czas rzeczywisty w tytule i treści podrozdziału 4.3. Nie do końca jest jasne w jaki sposób sieci miałyby działać w oprogramowaniu kamery w czasie rzeczywistym i czy moc obliczeniowa procesora jest wystarczająca do ich implementacji w tym trybie.

Czy przewidziano procedurę douczania sieci w trakcie eksploatacji kamery? Warto również jasno zdefiniować co Autor rozumie pod pojęciem czas rzeczywisty.

W końcowej części rozdziału 4 zaprezentowano sposób korekcji składowej dryftu związanej z szumem ustalonym, który nie budzi większych wątpliwości oraz opisano procedurę kalibracji całego systemu. Do celów kalibracji systemu wykorzystano dane zarejestrowane w trakcie symulacji stanów statycznych a jako model krzywej kalibracyjnej przyjęto wielomian trzeciego stopnia. Kalibrację przeprowadzono w niewielkim zakresie temperatur. Z punktu widzenia możliwości komercjalizacji metody celowym byłoby wykorzystanie pełnego zakresu pomiarowego kamery i przeprowadzenie pełnej kalibracji z zastosowaniem choćby klasycznego modelu RBF.

W rozdziale piątym zaprezentowano wyniki działania opracowanej metody dryftu temperaturowego badanej kamery dla sekwencji obrazów wcześniej nie wykorzystywanych przy uczeniu sieci neuronowych. Wyniki działania metody porównano z wynikami uzyskanymi bez stosowania metody. Rezultaty działania metody potwierdzają, że osiągnięto główny cel pracy jakim było umożliwienie ciągłego pomiaru temperatury obiektu przy aktywacji przesłony z 40 minutowym interwałem. W rozdziale dokonano również analizy dokładności działania opracowanej metody korekcji dryftu dla różnych obszarów matrycy. Posługiwano się do tego celu rozrzutem i odchyleniem standardowym, których wartości mieściły się w zakresie błędu pomiarowego deklarowanego przez producentów kamer wysokiej klasy. Dodatkowo przetestowano metodę dla sekwencji obrazów sceny rzeczywistej. Sposób opracowania wyników weryfikacyjnych jest przejrzysty i nie budzi wątpliwości. Wyjaśnienia jednak wymaga sposób prowadzenia badań weryfikacyjnych. Z wcześniejszych stwierdzeń pojawiających się w pracy można było się spodziewać, że metoda zostanie zaimplementowana w kamerze, będzie działała w czasie rzeczywistym i weryfikacja będzie przeprowadzona w trakcie ponownej symulacji warunków dynamicznych. Z treści rozdziału wynika jednak, że weryfikacja została przeprowadzona w środowisku komputerowym na wcześniej zarejestrowanej sekwencji obrazów termograficznych.

W rozdziale szóstym, kończącym pracę zawarto podsumowanie wyników badań przeprowadzonych przez Autora. Uważam, że rozdział ten powinien być bardziej rozbudowany i uzupełniony przynajmniej o wnioski ogólne, które płyną z przeprowadzonych badań. Ponadto w dyskusji podsumowującej zabrakło omówienia następujących aspektów:

- Możliwość uogólnienia metody w celu jej dostosowania do korekcji dryftu w innych detektorach w szczególności tych nieposiadających unikatowych rozwiązań w zakresie np. monitorowania temperatury obudowy i nie stabilizowanych cieplnie za pomocą ogniw Peltiera. Czy i w jakim stopniu brak stabilizacji cieplnej matrycy wpłynie na skuteczność działania opracowanej metody? Warto by było odpowiedzieć na pytanie czy konieczne jest ostatecznie stosowanie tak wielu czujników monitorujących warunki cieplne kamery?
- Jak implementacja metody i stosowanie jej w czasie rzeczywistym w oprogramowaniu kamery wpłynie na zmianę warunków cieplnych wewnątrz kamery wywołanych wzrostem temperatury np. procesora, który będzie o wiele bardziej obciążony niż w przypadku, gdy prowadzono tylko akwizycję obrazów na dysk komputera współpracującego z kamerą w trakcie badań eksperymentalnych?
- Jak implementacja metody w kamerze wpłynie na pobór energii elektrycznej w kontekście możliwości przyszłej implementacji metody w kamerach zasilanych bateryjnie?
- W treści pracy wspomniano, że zastosowanie sieci neuronowych otwiera możliwości dynamicznego wyznaczania interwału czasowego pomiędzy zamknięciami przesłony w celu wykonania niezbędnej, dla prawidłowego funkcjonowania metody, korekcji jednopunktowej. Interwał ten może się zmieniać i zależeć od faktycznych warunków środowiskowych działania kamery. Jest to bardzo słuszna i innowacyjna koncepcja jednak zarówno w pracy jak i w

podsumowaniu zabrakło szerszej dyskusji na ten temat a także przykładu implementacji tego rozwiązania.

- Jakie mogą być kierunki dalszych badań w zakresie rozwoju, udoskonalenia i optymalizacji opracowanej metody.

3. Ocena końcowa

Opiniowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko. Podkreślenia wymaga duży zakres przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych. W pracy postawiono jednoznacznie określone cele i dzięki starannie zaplanowanym i prawidłowo przeprowadzonym działaniom osiągnięto je.

Do głównych oryginalnych osiągnięć Autora opiniowanej rozprawy zaliczam:

- opracowanie metodyki wyznaczania składników dryftu temperaturowego w bolometrycznych kamerach termowizyjnych z przesłoną,
- opracowanie metody korekcji dryftu temperaturowego matrycy bolometrycznej dla kamer metrologicznych, która pozwala na wydłużenie czasu pomiaru temperatury obiektu bez konieczności wykonania korekcji jednopunktowej do kilkudziesięciu minut,
- opracowanie modelu niejednorodności resztkowej i dryftu temperaturowego za pomocą którego możliwe jest wyznaczenie wartości przesunięć charakterystyk przejściowych detektorów w funkcji ich położenia na matrycy,
- opracowanie algorytmu estymacji współczynników opracowanych modeli składników dryftu termicznego z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych,
- opracowanie projektu oraz wykonanie i oprogramowanie metrologicznej kamery bolometrycznej z wbudowanym systemem czujników monitorujących parametry pracy urządzenia,
- opracowanie uproszczonego radiacyjnego modelu zaprojektowanej kamery bolometrycznej i wykonanie symulacji wpływu promieniowania pasożytniczego na wartość sygnału matrycy.

Należy podkreślić, że opracowana metoda korekcji dryftu temperaturowego matrycy bolometrycznej dla kamer termowizyjnych ma duże znaczenie aplikacyjne.

Opiniowana rozprawa dowodzi, iż jej Autor posiada odpowiednią wiedzę i umiejętności w zakresie objętym tematem rozprawy. Mgr inż. Robert Strąkowski potrafi przeprowadzać złożone analizy oraz potrafi planować i wykonywać wielowątkowe badania, zarówno numeryczne jak i eksperymentalne. Autor przedstawiając w rozprawie wyniki ilościowe działania opracowanej nowej metody korekcji dryftu temperaturowego w bolometrycznej, pomiarowej kamerze termowizyjnej, dowiódł słuszności postawionej tezy.

Całość rozprawy oceniam pozytywnie i uważam ją za istotną dla rozwoju elektroniki i termografii w podczerwieni. Pozytywna ocena rozprawy doktorskiej uzasadnia podany w punkcie 1. wniosek o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Marek Fidali

