

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Buczka  
pod tytułem:  
„Różnicowa stabilizacja długości fal laserów półprzewodnikowych dla potrzeb  
światłowodowego transferu czasu i częstotliwości ”**

Opiniowana praca doktorska mgr inż. Łukasza Buczka, „**Różnicowa stabilizacja długości fal laserów półprzewodnikowych dla potrzeb światłowodowego transferu czasu i częstotliwości**”, powstała w Katedrze Elektroniki, na Wydziale „Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji”, Akademii Górniczo-Hutniczej, pod promotorską opieką profesora Przemysława Krehlika. Praca formalnie obejmuje dziedzinę elektroniki, a dokładnie dotyczy zagadnień interdyscyplinarnych: elektroniki, fotoniki i telekomunikacji. Tematyka tej rozprawy ma bardzo konkretną motywację badawczą, zwłaszcza praktyczną, której istotę dobrze oddaje jej tytuł. Grupa naukowa Profesorów: Marcina Lipińskiego, Przemysława Krehlika i Łukasza Śliwczynskiego, od kilku lat z sukcesem współpracuje na niwie europejskiej w dziedzinie transferu standardowych sygnałów czasu i częstotliwości.

Rozprawa liczy 136 stron w 8 rozdziałach, zawiera 98 odnośników literaturowych. Doktorant w swoim dorobku publikacyjnym jest współautorem 6 publikacji z IF i autorem jednej publikacji krajowej oraz współautorem 6 prezentacji na konferencjach międzynarodowych. Chcę nadmienić, że Pan Buczek wygłosił 17 listopada br. na forum „Katedry Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki” Politechniki Wrocławskiej seminarium, na którym omówił i wyjaśnił w szczególności większość aspektów dotyczących dysertacji doktorskiej.

### **O pracy doktorskiej**

Rozdział 1, **Cel i tezy rozprawy**, formułuje cele i tezy dysertacji oraz jej zawartość. Cel ma dwa aspekty:

- naukowy: **Analiza, symulacje i eksperymenty niezbędne do stabilizacji różnicy częstotliwości między dwoma półprzewodnikowymi laserami telekomunikacyjnymi przy użyciu szybkich liczników cyfrowych,**
- aplikacyjny: **Opracowanie wersji demonstratora układu stabilizacji częstotliwości różnicowej z układem szybkich liczników cyfrowych jako specyficznego układu dyskryminacji częstotliwości w pętli sprzężenia.**

Teza 1: **Detekcja koherentna umożliwia wykorzystanie różnicy częstotliwości optycznych do budowy modułów laserów o stabilizowanej różnicy długości fali z dokładnością nie gorszą niż 1pm (czyli z dokładnością do 125 MHz),**

- Teza 2: **Powyższa metoda stabilizacji długości fali wymiennie poprawi parametry systemu światłowodowego transferu sygnałów czasu i częstotliwości.**

Rozdział 2, **Systemy transferu czasu i częstotliwości – wybrane zagadnienia**, to bardzo obszerny rozdział dotyczący transferu wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości. Wprowadza opisy podstawowych parametrów transferów czasu i częstotliwości:

- dewiację Allana, jako podstawowy parametr stałości częstotliwości sygnałów referencyjnych,
- dewiację czasu, jako podstawowy parametr stałości przedziału czasu,
- maksymalny błąd przedziału czasu.

Omówiono parametry, wady i zalety systemów wykorzystujących fale radiowe:

- istniejący od 50 lat system DCF77,
- system nawigacji GPS,
- dwukierunkowe satelitarne transfery czasu i częstotliwości.

Zasadniczą część tego rozdziału stanowi opis transferu sygnałów wzorcowych przez sieci światłowodowe. Jako główny aspekt transferu światłowodowego Autor uwypuklił i przeanalizował w sposób przekonujący zmiany czasu propagacji w medium światłowodowym spowodowane: fluktuacjami temperatury, fluktuacjami długości fali w wyniku dyspersji światłowodu oraz fluktuacjami czasu propagacji elementów elektronicznych.

W celu kompensacji fluktuacji czasu propagacji sygnałów wzorcowych w Katedrze Elektroniki AGH zbudowano oryginalny układ stabilizacji częstotliwości czasu propagacji, pod nazwą ELSTAR. Doktorant był współrealizatorem tego systemu i opisowi tego systemu poświęcił znaczącą część tego rozdziału. Należy dodać, że ten system, jego koncepcja i wdrożone egzemplarze w Polsce i zagranicą sprawdziły się i cieszą się uznaniem kontrahentów.

W Rozdział 3, **Podstawowe metody stabilizacji długości fali w półprzewodnikowych laserach telekomunikacyjnych**, Autor dokonuje kompetentnego przeglądu układów stabilizacji laserów półprzewodnikowych względem referencyjnych linii spektralnych etalonu Fabry-Perota bądź linii absorpcyjnych cyjanowodoru, z termicznym przestrajaniem długości fali lasera półprzewodnikowego. Przede wszystkim przedstawił obszerny przegląd analizy wyników fluktuacji długości fali, które mogą być potencjalnie kompensowane przez termalną stabilizację długości fali. I przypisuje tym wartościom parametry transferu wzorcowych sygnałów – dewiacji Allana, dewiacji czasu i maksymalnego błędu przedziału czasu przy różnych wartościach tak zwanej skumulowanej dyspersji.

Rozdział 4, **Różnicowa stabilizacji długości fali bazująca na cyfrowych licznikach**, to jest podstawowy rozdział dysertacji oddający jej istotę. Opracowany system transmisji sygnałów referencyjnych ELSTAB wymaga stabilnej różnicy częstotliwości, chociaż ze względu na wymaganą stałość ( $1\text{pm} \sim 125\text{MHz}$ ), lepiej jest mówić o stabilnej różnicy długości fali, co zresztą Autor konsekwentnie stosuje. Istota autorskiej koncepcji stabilizacji różnicy długości fali polega na detekcji heterodynowej różnicy częstotliwości dwóch laserów półprzewodnikowych i przez zastosowanie szybkich cyfrowych liczników zliczających, poprzez stosowny układ automatycznej regulacji, realizuje stabilizację różnicy długości fal. Jest jednak istotny problem. Telekomunikacyjne lasery półprzewodnikowe mają swoją niemałą szerokość spektralną linii emisyjnej rzędu kilkunastu i więcej MHz (Autor przedstawił pomiary szerokości linii) i trzeba zachować stosowny odstęp częstotliwości między laserami, by sygnał heterodynowania był jednoznacznie interpretowany i zliczany. Pełną analizę teoretyczną i eksperymentalną takich przypadków Autor przeprowadził w tym fragmencie dysertacji.

Rozdział 5, **Budowa i badania układu różnicowej stabilizacji**, przedstawia zbudowany przez Autora prototyp układu stabilizacji, na który składają się z: modułu detekcji sygnału zdudniania, modułu preskalera, modułu stabilizacji. Tutaj należy podkreślić samodzielność w koncepcji i realizacji zaawansowanych układów elektronicznych – analogowych, cyfrowych i mikroprocesorowych. W zbudowanym układzie stabilizacji Doktorant przeprowadził szereg pomiarów stałości częstotliwości różnicowej dla różnych warunków symulujących zmiany

temperatury (w tym celu Pan Buczek zbudował specjalną komorę termiczną utrzymującą zadaną temperaturę lub wymuszającą jej zaprogramowane zmiany). To istotny materiał eksperymentalny, który pokazuje ograniczenia i warunki, w których układ pracuje pomyślnie.

Rozdział 6, **Różnicowa stabilizacja długości fal z pomiarem sekwencyjnym**, to bardzo sprytny sposób rozszerzenia zakresu stabilizowanych różnic długości fal (zwłaszcza, gdy zakres ten przewyższa znacząco pasmo przenoszenia użytego fotodetektora). Układ z dwoma „przestrajanymi laserami pomocniczymi” i sekwencyjnym pomiarem pozwala zrealizować stabilizację dla bardzo różniących się długości fal (do nawet setek GHz). Autor z sukcesem zademonstrował taką stabilizację.

W rozdziale 7, **Ocena wpływu zaproponowanych metod różnicowej stabilizacji laserów na parametry systemu transferu czasu i częstotliwości**, zawarto szeroką dyskusję możliwości zbudowanego układu. Przedstawiono rodziny charakterystyk parametrów transferu sygnałów wzorcowych dla potencjalnych światłowodowych sieci transferu określając ramy zastosowań, ze względu na: częstotliwość odstrojenia diod laserowych, rozległość sieci, wartości dyspersji skumulowanej. To jest bardzo ważny zestaw analiz, który potwierdza, że przed zainstalowaniem systemu ELSTAB trzeba dokonać podstawowej charakteryzacji sieci światłowodowej w celu porównania jej parametrów do charakterystyk referencyjnych, a co z kolei pozwala rozstrzygnąć o przydatności systemu.

W Rozdziale 8, **Podsumowanie**, przedstawiono w sposób skondensowany zestaw osiągnięć pracy, z którymi się zgadzam i akceptuję.

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Buczka ma charakter eksperymentalny z wyraźnym wątkiem wdrożeniowym, wsparta solidną wiedzą teoretyczną, niezbędną do interpretacji wyników i zakończyła się konkretnym wynikiem praktycznym – budową oryginalnego prototypu układu stabilizacji różnicy długości fal. Dysertacja przedstawia koncepcje i analizy. Trzeba sobie jednak zdawać sprawę, że za tą pracą stoi ogrom prac konstrukcyjnych, eksperymentalnych, projektów elektronicznych, co symbolicznie reprezentuje kilka zdjęć układów elektronicznych na końcu dysertacji. Z sukcesem zbudował układ stabilizacji różnicy długości fal stosując licznik cyfrowy i przeprowadził szereg eksperymentów weryfikacyjnych. **Uznaję, że cele naukowy i praktyczny, jakie sobie Doktorant postawił, zostały osiągnięte.**

Autor pokazał, że poziom fluktuacji różnicy długości fal nie przekracza wartości 20 MHz, przy fluktuacjach temperatury kilkunastu stopni, **przez co udowodnił eksperymentalnie podstawową tezę pracy, że można zejść z dokładnością stabilizacji różnicy długości fal do poziomu poniżej 1 pm, czyli 125 MHz.**

Analiza źródeł literaturowych jest kompetentna i obszerna. Tematyka jest nowa, oryginalna i dorobiła się już uznania w środowisku międzynarodowym. Wiele elementów pracy było prezentowanych na uznanych konferencjach międzynarodowych (European Frequency and Time Forum, International Frequency Control Symposium), co należy uznać za fakt, że jest to tematyka z frontu problemów dotyczących propagacji wzorcowych sygnałów częstotliwości i czasu.

Zauważone nieliczne literówki w pracy ignoruję. Poniżej zwracam uwagę na trzy krytyczne aspekty dotyczące dysertacji:

1. W całej dysertacji Doktorant używa regularnie słowa „stabilność częstotliwości”, „stabilność długości fali” kierując się angielskim „stability”. W polskiej literaturze technicznej stabilność oznacza stan pracy rozważanego układu (stan stacjonarny lub stan wzbudzenia, samooscytacji). Zdecydowanie lepiej sens oddaje w tym kontekście - „stałość częstotliwości/długości fali”. Sam

kiedyś popełniałem ten błąd, zajmując się stabilizacją częstotliwości laserów gazowych, zanim któryś z purystów językowych zwrócił mi na to uwagę.

2. Dysertacja jest napisana językiem poprawnym i zrozumiałym. Natomiast odniosłem wrażenie, że jest ona nieco „zbeletryzowana”. Mam tu na myśli fakt, że wiele fragmentów dysertacji jest „przegadanych” kosztem na przykład ciekawych układów elektronicznych zbudowanych przez Doktoranta. Jednak nie odmawiam oczywiście Doktorantowi prawa do własnej narracji naukowej.

3. W bardzo licznych (ponad połowie) odnośnikach literaturowych brakuje pełnego opisu bibliograficznego, co niestety robi złe wrażenie.

Te uwagi nie mają wpływu na moją bardzo pozytywną opinię o wynikach tego przewodu doktorskiego.

**Rozróżniając jakość kategorii rozpraw doktorskich na:**

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,

b/ wymagającą wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,

c/ spełniająca wymagania,

d/ zasługującą na wyróżnienie,

**zaliczam tę rozprawę, jako „zasługującą na wyróżnienie”, motywując to wyjątkową determinacją Pana Łukasza Buczka do doprowadzenia do wersji prototypowej układu stabilizacji różnicy długości fal, zweryfikowaniem jego pracy i nakreśleniem nowej metody stabilizacji fluktuacji parametrów sieci światłowodowej przeznaczonej do propagacji wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości. Ponadto wydaje się, że Doktorant spełnia z nadmiarem warunki publikacyjne narzucone przez Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji” AGH.**

**Podsumowując zatem stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Łukasza Buczka w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz o jej wyróżnienie.**