

Prof. dr hab. inż. Krzysztof M. Abramski  
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów  
Politechnika Wrocławska,  
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
Budynek C-5, im. Profesora M. Suskiego  
tel. (71) 320 30 24, e-mail: krzysztof.abramski@pwr.edu.pl

Wrocław, 6 marca 2022

S E K R E T A R I A T  
Rady Dyscypliny AEE

Wpłynęło dnia .....10.03.2022.  
Zarejestrowano pod nr .....  
Podpis ..... 

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Turzy  
pod tytułem:  
„Dystrybucja ultraprecyzyjnych sygnałów czasu i częstotliwości w sieci  
optycznej DWDM”**

Opiniowana praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Turza pod tytułem „**Dystrybucja ultraprecyzyjnych sygnałów czasu i częstotliwości w sieci optycznej DWDM**”, powstała w Instytucie Elektroniki, na Wydziale „Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji”, Akademii Górniczo-Hutniczej, pod promotorską opieką profesora Przemysława Krehlika. Praca bardzo dobrze wpisuje się w badawczą dyscyplinę elektronika, wchodząc w interdyscyplinarne wątki takich dziedzin jak fotonika i telekomunikacja. Tematyka tej rozprawy jest naturalną kontynuacją poprzedniej rozprawy doktorskiej prowadzonej pod promotorstwem profesora Krehlika (Łukasz Buczek, „Różnicowa stabilizacja długości fal laserów półprzewodnikowych dla potrzeb światłowodowego transferu czasu i częstotliwości”), którą również recenzowałem i co pozwala mi podkreślić, że grupa profesora Krehlika jest mocno zaangażowana w prace nad dystrybucją wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości w sieciach światłowodowych w kraju i Europie i jest zespołem badawczym wyznaczającym nowe trendy w tej dziedzinie.

Rozprawa liczy 139 stron w 6 rozdziałach, zawiera 95 pozycji literaturowych. Doktorant w swojej dysertacji doktorskiej powołuje się tylko na jedną swoją publikację z IF, której jest zresztą pierwszym autorem. Tymczasem dzięki dociekliwości recenzentki, wymusiłem na Doktorance prezentację Swojego dorobku publikacyjnego i jest on zdecydowanie bogatszy, bo Pan Turza jest współautorem 5 publikacji z IF (z czego w trzech jest głównym autorem), współautorem 14 prezentacji konferencyjnych na konferencjach międzynarodowych i jednej konferencji krajowej. Doceniam tę niepotrzebną nadmierną skromność. Chcę nadmienić, że Pan Turza wygłosił 4 marca br. na forum „Katedry Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki” Politechniki Wrocławskiej seminarium, omawiając i wyjaśniając większość aspektów dotyczących dysertacji doktorskiej.

### **O pracy doktorskiej**

Rozdział **WSTĘP** zawiera uzasadnienie podjętej tematyki badawczej przez Pana Krzysztofa Turzę, a dotyczącej transferu wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości sieciami światłowodowymi, zwłaszcza sieciami DWDM.

Rozdział 1, **CEL I TEZY ROZPRAWY** zawiera:

- **jeden cel ogólny**; znalezienie czynników determinujących dwa podstawowe parametry, stabilność i niepewność dystrybucji referencyjnych sygnałów czasu i częstotliwości w światłowodowych sieciach DWDM,
- **i dwa cele szczegółowe**; (1) opracowanie metody korekcji fluktuacji tzw. różnicowego czasu propagacji w światłowodowej sieci DWDM, (2) opracowanie modelu szacowania stabilności transferu czasu i częstotliwości na podstawie znajomości użytych linii światłowodowych i komponentów DWDM.

Ponadto Autor stawia trzy tezy w Swojej dysertacji doktorskiej:

- **Światłowodowe sieci DWDM umożliwiają stabilności dystrybucji sygnałów częstotliwości na poziomie  $10^{-16}$  i stabilności dystrybucji czasu na poziomie 100 ps.**
- **Stabilność dystrybucji częstotliwości i czasu w światłowodowej sieci DWDM może być znacząco poprawiona przez kompensację różnicowych fluktuacji czasu propagacji.**
- **Niestabilności i niepewności przesyłanych sygnałów częstotliwości i czasu mogą wyznaczone na podstawie znajomości budowy węzłów sieciowych i linii światłowodowych.**

Rozdział ten zawiera także krótki opis zawartości poszczególnych rozdziałów.

Rozdział 2,

## **TRANSFER CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI**

Jest to obszerny rozdział wprowadzający w istotę dysertacji. Autor definiuje pojęcia miar jakości transferu sygnałów wzorcowych:

- stabilność sygnałów częstotliwości, bazującej na takich parametrach jak dewiacja (bądź wariancja) Allana  $ADEV(\tau)$  czy zmodyfikowana dewiacja częstotliwości  $MDEV(\tau)$ ,
- stabilność dystrybucji czasu  $TDEV(\tau)$ ,
- niepewność dystrybucji częstotliwości  $FE_{RMS}$ ,
- niepewność dystrybucji czasu  $TIE_{RMS}$ .

Wykorzystywanie wysokostabilnych wzorców czasu i częstotliwości na potrzeby pomiaru choćby jednoczesności zjawisk w różnych miejscach na Ziemi jest badawczą motywacją poszukiwań sposobu transmisji tych sygnałów na duże odległości. Te wzorce to: ustalone znaczniki czasu 1PPS oraz częstotliwości radiowe (5, 10 i 100 MHz) i czyste niemodulowane wiązki świetlne o ustalonej długości fali. Tutaj prym wiodą systemy satelitarne, ale wydaje się, że one ze względu na dużą zmienność czynników środowiskowych (niekontrolowane zmiany temperatury i ciśnienia atmosfery) ustaliły już swoje poziomy maksymalnych osiągnięć: niepewności transferu czasu (1-2 ns) i niepewności transferu częstotliwości ( $10^{-15}$ ) przy bardzo długich czasach uśredniania rzędu kilku dni. Transmisja wysokostabilnych sygnałów czasu i częstotliwości w sieciach światłowodowych jest logiczną konkurencyjną alternatywą poprawy tych wyników.

Autor wyróżnia i analizuje podstawowe parametry światłowodów istotne dla transmisji wzorcowych sygnałów:

1. Dyspersje chromatyczna i falowodowa. Typowa ich sumaryczna praktyczna wartość to około 17 [ps/(nm·km·K)].
2. Dyspersja polaryzacyjna. Typowa praktyczna wartość to +/- 4 [ps/(nm·km·K)].
3. Zmiany opóźnienia propagacji sygnału w światłowodzie na skutek zmian temperatury, zmiany współczynnika załamania ( $1,06 \cdot 10^{-5}$  [1/K]) i termicznej rozszerzalności światłowodu ( $5,6 \cdot 10^{-7}$  [1/K]), co składa się łącznie na zmiany opóźnienia sygnału na poziomie 37-40 [ps/(nm·km·K)].

4. Wprowadza pojęcie opóźnienia różnicowego sygnału wzorcowego (różnica między czasem propagacji od źródła sygnału do odbiornika i czasem powrotnym), będącego miarą stabilności sieci.

Prosta analiza pokazuje, że przy 100-kilometrowej linii światłowodowej zmiana temperatury o 1K zmienia czas propagacji sygnału o około 4 ns, co puszczane samopas, niestety jest nieakceptowalne. Stąd konieczność aktywnej kompensacji tych zmian do poziomu dużo poniżej nanosekundy.

Doktorant rozróżnia dwie zasadnicze metody dystrybucji sygnałów referencyjnych z aktywną kompensacją zmian czasu propagacji: we włóknie pojedynczym (w tak zwanym włóknie dedykowanym albo „ciemnym”), albo wykorzystując dwa włókna w sieci dwukierunkowej DWDM. Temu pierwszemu przypadkowi zespół Profesora Krehlika poświęcił w przeszłości owocne badania, konstruując bardzo udany system ELSTAB przystosowany dla „ciemnych włókien” stosowanych w sieci PIONIER, którego dużym fragmentem był doktorat dr. inż. Łukasza Buczka. Sukces systemu ELSTAB postawił zapytanie, jak dalece układ aktywnej kompensacji drogi optycznej między źródłem sygnału (wzorzec), a odbiorcą sygnału może być stosowany w światłowodowych sieciach DWDM. I to jest istotą recenzowanej pracy doktorskiej. Trzeba tu podkreślić, że sieć DWDM jest „żywym organizmem telekomunikacyjnym” Poza systemem ELSTAB Pan Turza przedstawił podstawowe koncepcje dystrybucji czasu i częstotliwości w systemach DWDM: (1) w zmodyfikowanym układzie transmisji sygnałów czasu/częstotliwości dwukierunkowo w jednokierunkowym systemie DWDM i (2) w układzie transmisji sygnałów czasu/częstotliwości w niezmodyfikowanej sieci DWDM. Oczywiście jest, że ta druga koncepcja jest naturalną, gdyż dotyczy wykorzystania realnych sieci DWDM i ten typ sieci DWDM jest przedmiotem dysertacji.

Rozdział 3,

### **ANALIZA CZYNNIKÓW DETERMINUJĄCYCH STABILNOŚĆ I DOKŁADNOŚĆ DYSTRYBUCJI CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI W SIECI DWDM.**

Powtarzając za Autorem, dystrybucja sygnałów czasu/częstotliwości wymaga jak największej symetrii jednoczesnego oddziaływania zakłóceń zewnętrznych dla obu kierunków transmisji. W systemach DWDM każdy kierunek transmisji ma osobne włókno i przeważnie osobne komponenty węzłowe. Stąd duża większa trudność kompensowania opóźnienia różnicowego w porównaniu do „ciemnego włókna”, gdzie zakłócenia prawie się kompensują we wspólnym włóknie dla obu kierunków transmisji. W tym rozdziale Autor omawia różne czynniki wpływające na transmisję sygnałów metrologicznych czasu/częstotliwości.

I tak, Autor rozpoczyna od kabli światłowodowych. Fakt, że sygnały referencyjne i zwrotny propagują się różnym światłowodami tego samego kabla ma już istotny wpływ na opóźnienie różnicowe. Pokazane zmierzone roczne i dzienne zmiany temperatury powietrza oraz gruntu pozwalają na zgrubne szacowania fluktuacji czasów transmisji w sieciach napowietrznych i gruntowych. Mając do dyspozycji sieć PIONIER otaczającą już znacząco Polskę z głównymi ośrodkami (Poznań, Warszawa, Toruń, Wrocław, Kraków, Gdańsk), w specjalnie zbudowanych układach pomiarowych (rys. 3.4 i 3.9), Autor przeprowadził szereg ważnych pomiarów dotyczących fluktuacji różnicowego czasu propagacji i fluktuacji opóźnienia całkowitego w parach włókien rzeczywistych kabli światłowodowych. Istotą tych pomiarów jest fakt, że fluktuacje opóźnienia różnicowego w czasie doby w 100-kilometrowym kablu:

- napowietrzny wynoszą ponad 1 ns,
- doziemny wynoszą około 10 ps,

Tymczasem fluktuacje opóźnienia całkowitego w czasie doby w kablu:

- napowietrzny wynoszą około 70 ns,
- doziemny wynoszą kilka nanosekund.

Ważnym wnioskiem jest mocna korelacja między tymi dwoma typami fluktuacji.

Z kolei obszerne pomiary średnio- i długookresowej stabilności transferu częstotliwości i czasu (czas uśredniania od  $10^2$ - $10^5$  s) w parze włókien pokazują, że kable ziemne charakteryzują się zdecydowanie lepszą jakością transmisji sygnałów metrologicznych (nawet 2 rzędy mniejsza dewiacja Allana).

Istotnym źródłem fluktuacji sygnałów różnicowych są komponenty węzłów systemu DWDM (bo nie tylko światłowód jest źródłem niestałości propagowanych sygnałów) takich jak: moduły światłowodów DCF (*Dispersion Compensating Fibers*), wzmacniaczy i przełączników optycznych węzła DWDM. Jak pokazał Autor, ogniwem wywołującym największe fluktuacje opóźnień różnicowych są kompensatory dyspersji chromatycznej, światłowody DCF, sięgające kilkuset pikosekund. W specjalnie zbudowanym układzie pomiarowym do badania fluktuacji opóźnień różnicowych dwóch kierunków pojedynczej karty DWDM (rys. 3.13) różnicowe opóźnień sięgają setek nanosekund i znacząco przewyższają opóźnień w głównym światłowodzie. Natomiast ich czułości termiczne nie przekraczają 3 [ps/K], a asymetria czułości termicznej 2 [ps/K]. Te pomiary wskazują na potrzebę stabilizacji temperatury węzłów DWDM.

W celu oszacowania niestabilności transferu sygnałów czasu i częstotliwości Autor przeprowadził badania na „żywym organizmie” w dwóch 1500-kilometrowych pętlach DWDM (pierwsza z włóknami DCF i druga bez). Przedstawił całą serię pomiarów fluktuacji fazy sygnału referencyjnego, z których wynika, że stosowanie włókien DCF bardzo zwiększa asymetrię transferu sygnałów różnicowych w sieci DWDM. Ponadto asymetria transmisji sygnałów w obu kierunkach sieci, zwłaszcza zawierającej włókna DCF może sięgać kilku mikrosekund. Stąd wniosek, że taka sieć wymaga zewnętrznej kalibracji systemami satelitarnymi.

Wyniki pomiarów niestabilności transferu znaczników czasu w sieci DWDM pokazują, że dystrybucja czasu w sieciach DWDM może być atrakcyjną alternatywą dla transferu systemami satelitarnymi.

Z kolei pomiary transferu częstotliwości, wskazują na duży destrukcyjny wpływ włókien DCF na stabilności wzorcowego sygnału częstotliwości, zwłaszcza przy dużych czasach uśredniania spowodowanych wpływem temperatury klimatyzacji węzłów DWDM.

#### Rozdział 4.

### **METODY KOREKCJI FLUKTUACJI RÓŻNICOWEGO CZASU PROPAGACJI W OPTYCZNEJ SIECI DWDM**

Ten rozdział poświęcono istotnemu problemowi poprawy stabilności i niepewności dystrybuowanych sygnałów wzorcowych z wykorzystaniem pary włókien światłowodowych w systemie DWDM. Oczywiście, znacznie lepsze wyniki uzyskuje się w transferze sygnałów wzorcowych jednym włóknem. Podstawowym czynnikiem psującym stabilność i powtarzalność sygnałów czasu i częstotliwości jest fluktuująca temperatura światłowodów i elementów węzłów sieci optycznej. Na część światłowodową rozłożoną w terenie nie mamy wpływu, ale na elementy w węzłach już tak, poprzez systemy pomiaru i kontroli temperatury. Tutaj Autor przedstawia szereg użytecznych eksperymentów i pomiarów. Mając do dyspozycji szereg krajowych tras światłowodowych zarządzanych w Poznaniu (PCSS), Autor przeprowadził szereg interesujących pomiarów stabilności dla różnych warunków klimatyzacyjnych i różnych tras DWDM. Te pomiary wykazały, że próbkowanie temperatury węzła z okresem co 60 s jest wystarczające do efektywnych korekcji.

#### Rozdział 5

### **MODELOWANIE JAKOŚCI TRANSFERU CZASU I CZĘSTOTLIWOŚCI W SIECI DWDM**

Istotą tej najobszerniejszej części dysertacji jest wyznaczenie limitów jakości transferu czasu i częstotliwości w sieci DWDM (z wykorzystaniem pary włókien światłowodowych) w

porównaniu do transferu w tych sygnałów w dedykowanym pojedynczym włóknie. W tym celu Autor, na bazie licznych przeprowadzonych pomiarów przedstawia procedurę modelowania miar jakości transferu czasu i częstotliwości w postaci wykresów niestabilności i niepewności dystrybuowanego sygnału wzorcowego. W modelu korzystano z licznych pomiarów:

- zmian temperatury w wielu węzłach rzeczywistych sieci DWDM,
- zmian temperatury ze stacji pogodowych (powietrza i gruntu na różnych głębokościach),
- fluktuacji opóźnienia sygnałów wzorcowych w rzeczywistych liniach światłowodowych z uśrednionymi zmianami dla kabli światłowodowych.

Wprowadza parametry jakościowe w postaci analitycznej zależne od czasu uśredniania:

- dewiacja Allana  $ADEV(\tau)$ , którą można przedstawić w wersji czasowej jako splot odchylenia dewiacji częstotliwości  $y(t)$  ze stosowną funkcją wagową  $h(t)$ ,
- dewiacja Allana  $ADEV(\tau)$ , którą można przedstawić w wersji widmowej jako splot jednostronnej gęstości widmowej mocy sygnału odchylenia dewiacji częstotliwości  $S_y(f)$  z kwadratem transformaty Fouriera  $|H(f)|^2$  funkcji wagowej  $h(t)$ ,
- zmodyfikowaną dewiację Allana  $MDEV(\tau)$  w dziedzinie widmowej,
- dewiację czasu  $TDEV(\tau)$  w dziedzinie widmowej,
- średniokwadratowy, względny błąd częstotliwości  $FE_{RMS}(\tau)$ ,
- średniokwadratowy błąd transferu interwałów czasu  $TIE_{RMS}(\tau)$ .

Algorytm procesu modelowania dystrybucji jakości sygnałów został klarownie przedstawiony na rys. 5.1. Najpierw Autor kolekcjonował zbiory danych wejściowych (wszelkie zmiany temperatury), potem transformowanie tych danych na widma zmian temperatury i wyznaczanie odpowiednich parametrów modeli. W ten sposób każdej linii (bądź jej fragmentowi) można przypisać model widmowej gęstości mocy zmian temperatury  $S_T(f)$  w funkcji częstotliwości. Potem tzw. rzutowanie widma temperatury na widmo zmian fazy i na końcu wyznaczanie wszystkich parametrów jakości transmisji.

Jednak szacowane fluktuacje fazy (Rys.5.2) na podstawie pomiarów zmian temperatury, porównane do zmierzonych w linii Poznań-Gniezno-Poznań (wykorzystując system ELSTAB, ale bez włączonej kompensacji opóźnienia) dają spore rozbieżności. Dalej Autor prezentuje różne pomiary: w różnych liniach, a także w różnych węzłach (11 węzłów), węzłach typu Add/Drop (8 takich węzłów) i węzłach z modułami DCF (6 takich węzłów), opisując każdy węzeł charakterystycznymi parametrami aproksymującymi lorentzowski kształt widmowej gęstości mocy zmian temperatury (Tabele 5, 6 i 8). Pomiary objęły praktycznie wszystkie ważniejsze węzły światłowodowe w Polsce.

W podrozdziale 5.3 Doktorant przedstawił symulację jakości transferu czasu i częstotliwości ( $ADEV/MDEV/EF_{RMS}$ ,  $TDEV$ ), dla kilku tras: Poznań – Warszawa, Poznań – Gdańsk, Poznań-Genewa.

## Rozdział 6. PODSUMOWANIE

To solidne kompendium kompresujące liczne badania i cenne wnioski, a zwłaszcza komentarze do postawionych na początku celów i tez dysertacji.

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Turzy ma charakter eksperymentalny z dodatkowym aspektem modelowania trudnych zjawisk rzeczywistych. Pan Turza posiada biegłą wiedzę praktyczną i teoretyczną o systemach optokomunikacji światłowodowej. Jest bardzo dobrze zaznajomiony z praktyczną obsługą i dostępem do sieci światłowodowych. Ma solidną wiedzę teoretyczną dotyczącą standardów czasu i częstotliwości i ich transferu. Bardzo dobrze operuje podstawowymi pojęciami parametrów jakości transferu sygnałów czasu i częstotliwości. Potrafił zaaranżować i wykonać mnóstwo pomiarów konfigurując różne trasy transferu wzorcowych sygnałów. Algorytm modelowania jakości transferu sygnałów wzorcowych jest oryginalny i z pewnością jest to prekursorska praca, którą zapewne będzie kontynuowana i

ulepszana. Dysertacji pana Turza nie czyta się łatwo. Muszę przyznać, że spędziłem wiele czasu na jej „przegryzieniu”. Z pewnością można by ją skompresować. Nieliczne błędy literowe pomijam. Widać, jak pojęcia „stabilności” i „niestabilności” tego samego parametru nie są w środowisku jeszcze ustalone. Ja cały czas obstaję przy używaniu pojęcia „stałości” lub „niestalości”.

Stwierdzam, że wytyczone cele i postawione tezy zostały spełnione. I tak:

**Cel ogólny**, znalezienia czynników determinujących dwa podstawowe parametry, stabilność i niepewność dystrybucji referencyjnych sygnałów czasu i częstotliwości w światłowodowych sieciach DWDM. **Autor bardzo dobrze zdefiniował te parametry.**

**Dwa cele szczegółowe**, (1) opracowanie metody korekcji fluktuacji tzw. różnicowego czasu propagacji w światłowodowej sieci DWDM, (2) opracowanie modelu szacowania stabilności transferu czasu i częstotliwości na podstawie znajomości użytych linii światłowodowych i komponentów DWDM. **Te dwa cele również zostały osiągnięte.**

**Teza 1.** Doktorant pokazał, że jest możliwe osiągnięcie stabilności transferu częstotliwości na poziomie  $10^{-16}$  nawet do 1000 km, ale wskazał na ograniczenia, że tylko w doziemnych liniach światłowodowych, oraz w systemach DWDM nie zawierających włókien DCF.

**Teza 2.** Istotnie, stabilność transferu sygnałów czasu i częstotliwości w sieci DWDM można znacząco poprawić, znając bieżące informacje o temperaturach poszczególnych modułów w węzłach, zwłaszcza modułów DCF.

**Teza 3.** Teza dotycząca możliwości i skuteczności modelowania podstawowych parametrów jakości transferu wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości została potwierdzona. Autor zaproponował i przedstawił taki model. Jest to pierwsza oryginalna próba takiego modelowania, niewątpliwie potrzebna do estymacji przydatności wybranej linii światłowodowej do transmisji sygnałów wzorcowych.

Jestem pod pozytywnym wrażeniem aktywności publikacyjnej Doktoranta, który jest współautorem mocno skorelowanych z dysertacją 5 publikacji z IF (w tym trzech głównym autorem), a ponadto brał udział w 14 konferencjach międzynarodowych i jednej krajowej. Sądzę, że ta praca stanowi milowy krok w technice transferu wzorcowych sygnałów częstotliwości i czasu. Tym bardziej, że w naszym laboratorium NLPQT mamy wypustki „ciemnych światłowodów” z sieci PIONIER i mamy zaplanowane korzystanie z sygnałów wzorcowych do prac nad „optycznymi laserowymi grzebieniami” w podczerwieni.

**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 oryginalnością, pomysłowością i zaradnością Pana Krzysztofa Kurza w realizacji doktoratu, a zwłaszcza bardzo dużą użytecznością tej pracy dla rozwoju transferu wzorcowych sygnałów.**

Podsumowując zatem stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Turzy w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie elektronika, odpowiadającej dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika” wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu MNiSzW z dnia 20 września 2018 r. (Dz.U.2018 poz.1818), oraz wnoszę o jej wyróżnienie.