



Politechnika Poznańska
Instytut Telekomunikacji Multimedialnej

61 - 131 Poznań, ul. Polanka 3, tel.: (61) 665 3900, fax. (61) 665 3899

Poznań, 28 marca 2022 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEE

30. 03. 2022

Wpłynęło dnia
Zarejestrowano pod nr
Podpis 

Dr hab. inż. Mieczysław Jessa, profesor uczelni

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

1. Temat rozprawy, aktualność zagadnienia, cel pracy

Znaczący wzrost zapotrzebowania na sygnały czasu i częstotliwości zawdzięczamy wielu dziedzinom nauki. Niezawodne i wysokiej jakości sygnały czasu i częstotliwości są potrzebne w sieciach 4G, 5G, 6G, w sieciach telekomunikacyjnych, informatycznych, energetycznych, między innymi do datowania zdarzeń i ustalania hierarchii czasowej zdarzeń, do rozliczeń międzybankowych, do porównywania skal czasu itd. Spośród zdarzeń, które przyczyniły się do istotnego zwiększenia znaczenia sygnałów czasu i częstotliwości niektóre mają znaczenie kluczowe. Zachowując chronologię, pierwszym z nich jest uznanie przez społeczność międzynarodową skali czasu UTC (*ang.* Universal Time Coordinated) jako powszechnie obowiązującej skali czasu. Skala UTC bazuje na danych zbieranych z kilkadziesiątu ośrodków naukowych znajdujących się na wszystkich kontynentach poza Antarktydą, co wymaga dysponowania systemem transmisji danych, systemem porównywania skal czasu oraz systemem dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości do potencjalnych użytkowników. Początkowo do porównań skal czasu używano systemów satelitarnych, a do dystrybucji do użytkowników końcowych nadajników radiowych lub sieci komputerowych. Przykładem dystrybucji skali czasu drogą radiową jest nadajnik zlokalizowany we Frankfurcie n. Menem, pozyskujący sygnał czasu z ośrodka czasu i częstotliwości znajdującego się w Darmstadt. Dystrybucję sygnału czasu w sieci komputerowej reprezentuje protokół NTP (*ang.* Network Time Protocol) opracowany przez Davida Millsa. Dokładność tak dystrybuowanego sygnału czasu nie jest znacząca i waha się od około 1 ms do około 1 sekundy.

Drugim znaczącym wydarzeniem było opracowanie globalnych systemów pozycjonowania GNSS (*ang.* Global Navigation Satellite Systems), z których pierwszym był system GPS (*ang.* Global Positioning System). Rozwój systemów GNSS w znaczący sposób przyczynił się do upowszechnienia dostępu do sygnałów czasu i częstotliwości o wysokiej dokładności. Obecnie najbardziej zaawansowane systemy komercyjne wykorzystujące GNSS umożliwiają dystrybucję sygnału czasu z błędem około 10 ns oraz częstotliwości z błędem rzędu 10^{-14} .

Kolejnym znaczącym zdarzeniem było opracowanie ogólnosiwiatowego systemu transmisyjnego, zdolnego do przesyłania danych cyfrowych z dużymi szybkościami za pomocą światłowodów. Opracowany system nazwano Synchroniczną Hierarchią Cyfrową SDH (*ang.* Synchronous Digital Hierarchy). Już w nazwie zawarto podstawową zasadę pracy systemu – synchroniczność strumieni podlegających procesowi zwielokrotnienia. System SDH oraz jego nowsza wersja, NG-SDH (*ang.* Next Generation SDH), lepiej dostosowana do transportu sygnałów z sieci Internet, są obecnie podstawowymi, globalnymi systemami transmisyjnymi. Wadą obu systemów jest to, że sygnały przetwarzane w węzle sieci są sygnałami elektrycznymi. Dlatego obecne sieci SDH i NG-SDH są sukcesywnie zastępowane sieciami czysto optycznymi określanymi jako sieci OTH (*ang.* Optical Transport Hierarchy) lub częściej, jako sieci OTN (*ang.* Optical Transport Network).

Czwartym znaczącym zdarzeniem, które przyczyniło się do znaczącego wzrostu zapotrzebowania na sygnały czasu i częstotliwości jest powstanie sieci komórkowej 4G, 5G oraz prace nad siecią 6G. Wymienione sieci do działania wymagają wysokiej jakości synchronizacji częstotliwości oraz synchronizacji znaczników czasu z błędem nie przekraczającym 1,5 μ s. Chociaż oba wymagania zaspokajają obecnie systemy GNSS, to ze względu na ich silną podatność na sygnały zakłócające poszukuje się rozwiązań alternatywnych. Pomocna jest dokładniejsza wersja protokołu NTP, nazwana PTP (*ang.* Precise Time Protocol, obecnie PTP w wersji 2), która oferuje błąd znacznika czasu rzędu 1,0 μ s. Rozwijany jest także projekt otwarty nazwany White Rabbit, który ma zredukować błąd znacznika czasu do wartości poniżej 10 ns dla odległości przekraczających 1000 km (obecnie są to ułamki nanosekund dla odległości do 10 km), a więc ma on być mniejszy od błędu oferowanego przez systemy GNSS. Wadą PTP i White Rabbit są koszty instalacji i eksploatacji w sieci operatora.

Równolegle, od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, rozwijano inne podejście do dystrybucji częstotliwości wzorcowej i sygnału czasu. Dynamiczny rozwój transmisji optycznej, w szczególności powstanie gęstych systemów zwielokrotnienia falowego DWDM (*ang.* Dense Wavelength Division Multiplexing) spowodował, że w ułożonych kablach

światłowodowych pojawiło się wiele wolnych włókien, które przyjęło się nazywać ciemnymi włóknami (*ang.* Dark Fibers). Ponieważ nie są one używane do transmisji danych, można je zagospodarować na potrzeby transmisji sygnałów czasu i częstotliwości. Ten sposób transferu czasu i częstotliwości oferuje zdecydowanie najmniejsze błędy transferu, około 10 ps. Przykładem jest wspomniany w rozprawie system dystrybucji ELSTAB (*ang.* Electronically STABILized fiber T/F distribution System) opracowany przez zespół naukowców z Akademii Górniczo Hutniczej. Istotną przeszkodą w upowszechnieniu tej metody jest brak zgody operatorów na wykorzystanie włókien optycznych wyłącznie na potrzeby transferu czasu i częstotliwości w budowanej sieci OTN. Podstawową przyczyną są wysokie koszty utrzymania infrastruktury dedykowanej wyłącznie transferowi czasu i częstotliwości. Jedynym rozwiązaniem pozostaje wykorzystanie już zagospodarowanych włókien na potrzeby dystrybucji czasu i częstotliwości. Metoda bazuje na istniejącej infrastrukturze i korzysta z niewielkiej części dostępnego pasma optycznego. W związku z tym nakłady finansowe związane z implementacją oraz utrzymaniem takiego systemu są znacząco mniejsze niż rozwiązań wykorzystujących infrastrukturę dedykowaną. Także sama implementacja rozwiązań transmisji obcych sygnałów optycznych, nie pochodzących z urządzeń sieci OTN, nie rodzi już większych obaw operatorów telekomunikacyjnych. Podstawową konsekwencją implementacji dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości w istniejącej infrastrukturze są większe błędy transferu znaczników czasu oraz większe zmiany tych błędów w dłuższych przedziałach czasu względem rozwiązań opartych o dedykowaną infrastrukturę światłowodową.

Autor za cel swojej pracy postawił przeprowadzenie wszechstronnych badań czynników determinujących jakość procesu dystrybucji wzorcowych sygnałów czasu i częstotliwości w sieci optycznej oraz czynników wpływających na stacjonarność tego procesu. Cel ten obejmuje także ilościowe określenie jakości dystrybucji oraz propozycje rozwiązań zmierzających do jej poprawy. Cele szczegółowe zdefiniowano w następujący sposób:

- Opracowanie metody korekcji fluktuacji różnicowego czasu propagacji w optycznej sieci DWDM w oparciu o informacje dostępne z poziomu systemu zarządzania systemem DWDM.
- Opracowanie modelu szacowania stabilności transferu czasu i częstotliwości na podstawie znajomości typu użytych komponentów DWDM oraz rodzaju linii światłowodowej, który będzie mógł być wykorzystany jako jedno z głównych kryteriów wyboru optymalnej ścieżki optycznej.

W rozprawie postawiono trzy tezy:

1. Optyczne sieci telekomunikacyjne, stosujące technikę zwielokrotnienia falowego DWDM umożliwiają dystrybucję sygnałów: częstotliwości ze stabilnością na poziomie 10^{-16} oraz czasu ze stabilnością na poziomie 100 ps, czyli adekwatną do jakości nowoczesnych wzorców atomowych.
2. Stabilność dystrybucji częstotliwości oraz czasu w sieci optycznej DWDM można znacząco poprawić poprzez kompensację różnicowych fluktuacji czasu propagacji, z wykorzystaniem informacji (zmian temperatury modułów) dostępnych w standardowym systemie zarządzania siecią.
3. Wyznaczenie niestabilności i niepewności dystrybuowanych sygnałów częstotliwości oraz czasu możliwe jest na podstawie dedykowanego modelu uwzględniającego budowę węzłów sieciowych oraz rodzaje linii światłowodowych

Zagadnienie wykorzystania istniejącej infrastruktury optycznej do dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości jest zagadnieniem aktualnym i bardzo ważnym dla nauki i techniki. Postawione cele są ambitne, a ich realizacja istotna dla wdrożenia niezwodnych metod transferu czasu i częstotliwości.

2. Analiza stanu wiedzy, dobór źródeł i sposób formułowania wniosków wynikających z analizy źródeł

Literatura na temat czasu i częstotliwości jest bardzo bogata, liczy co najmniej kilka tysięcy pozycji. Relatywnie niewiele z nich poświęcono przesyłaniu sygnałów czasu i częstotliwości w sieciach telekomunikacyjnych i komputerowych. Spis literatury podany przez Autora zawiera prace ważne z punktu widzenia realizacji celu rozprawy i jest jej mocną stroną. Analiza stanu wiedzy jest przeprowadzona konsekwentnie, z uwzględnieniem najnowszych publikacji na temat metod przesyłania sygnałów czasu i częstotliwości za pomocą sygnałów optycznych. Zarówno sposób formułowania jak i treść wniosków wynikających z analizy źródeł wskazują na dużą wiedzę Autora w obszarze objętym tematem rozprawy oraz w obszarach pokrewnych.

3. Struktura rozprawy i sposób przedstawienia wyników

Rozprawa została napisana w języku polskim, a jej zasadnicza część obejmuje 134 strony. Została podzielona na sześć rozdziałów uzupełnionych spisem literatury zawierającym 95 pozycji bibliograficznych, zapisanych na 5 stronach. Przed spisem treści Autor umieścił streszczenie rozprawy w języku polskim, angielskim oraz podziękowania.

Sposób przedstawienia wyników oceniam jako zasadniczo właściwy. Rozdziały pozostają w odpowiednim związku przyczynowo-skutkowym. Autor jasno przedstawia koncepcję rozprawy, formułuje cel główny i cele cząstkowe. Wydaje się jednak, że opis przeprowadzonych badań mógłby być bardziej spójny. Autor przyjął koncepcję co najmniej dwuetapowego opisu części zagadnień. Przykładowo, właściwości włókien optycznych są opisane najpierw ogólnie (rozdział 2.2.1), a potem opisany jest ich ogólny wpływ na jakość transferu czasu i częstotliwości (rozdział 3.1). Z kolei szczegółowy wpływ włókien optycznych na proces transferu czasu i częstotliwości jest analizowany w rozdziałach kolejnych. Wydaje się, że bardziej komunikatywna byłaby konstrukcja, w której parametry oraz wpływ danego czynnika na jakość transferu czasu i częstotliwości są określane od początku do końca w jednym rozdziale głównym, co wiąże się z istotną zmianą struktury pracy.

Za wysoce dyskusyjny uważam sposób numerowania podrozdziałów. Przykładowo rozdziały 5.1 i 5.2 zawierają tylko po jednym podrozdziale, a dojście do każdego podrozdziału jest poprzedzone znaczącym fragmentem tekstu. Zdecydowanie lepiej byłoby każdemu z tych fragmentów nadać tytuł odwołujący się do tematu rozdziału odpowiednio 5.1, 5.2. Wówczas rozdziały 5.1 i 5.2. zawierałyby po dwa podrozdziały każdy.

W ogólności Autor swobodnie operuje językiem polskim. Niemniej jednak w wielu miejscach posługuje się tzw. żargonem inżynierskim, co jest związane przede wszystkim z tłumaczeniem nazw angielskich na język polski. Przykładowo słowo angielskie „link” jest używane dosłownie, zamiast polskiego słowa „łącze”, pomiar za pomocą mechanizmu wbudowanego w system ELSTAB określono jako pomiar rezydualny, błąd przedziału czasu TIE jest nazwany błędem interwału czasu. Z kolei tłumaczenie słowa „stability” na „stabilność” w kontekście parametrów sygnału czasu i częstotliwości nie zawsze oddaje istotę zagadnienia (zob. pkt. 7 recenzji). Błędy literowe zdarzają się relatywnie rzadko, jeden błąd na około 16 stron. W przypadku tabel należałoby zastosować taki sam system numeracji jak dla wzorów i rysunków, tj. numer tabeli powinien składać się z numeru rozdziału głównego, w którym wprowadzamy tabelę oraz z numeru tabeli w rozdziale.

4. Metodologia rozwiązywania problemu, ocena założeń i wniosków z badań

Autor postawił trzy tezy, a realizację głównego celu pracy uzależnił od wykonania postawionych przez siebie dwóch celów szczegółowych, wymienionych na stronie 15 rozprawy. Zauważył, że obecnie najlepszą jakością transferu czasu (impulsów sekundy) oraz częstotliwości wzorcowych osiąga się w sieciach wykorzystujących dedykowane pojedyncze włókno światłowodowe. Wykorzystanie pojedynczego włókna oraz specjalizowanych urządzeń skutkuje dokładnościami transferu czasu i częstotliwości nieosiągalnymi dla systemów satelitarnych. Następnie przeprowadził krytyczną analizę ograniczeń istniejących metod z punktu widzenia możliwości ich powszechnego zastosowania w sieciach optycznych. Rezultatem analizy jest stwierdzenie, że pomimo spektakularnych osiągnięć w rozwoju światłowodowych systemów transferu czasu i częstotliwości, ich implementacja napotyka spore trudności związane z koniecznością zagwarantowania dedykowanej infrastruktury światłowodowej, np. wymaga dzierżawy włókien, instalowania w węzłach sieci specjalistycznych urządzeń, co przekłada się na wysoki koszt utrzymania infrastruktury odpowiedzialnej za przesył sygnałów czasu i częstotliwości wzorcowej. Trafnie zauważył, że „rozwiązaniem tego problemu może okazać się dystrybucja czasu i częstotliwości z wykorzystaniem tych samych technologii ale dostosowanych do transferu z wykorzystaniem powszechnie używanych, telekomunikacyjnych sieci zwielokrotnienia falowego”. Dostrzegł, że „systemy transferu czasu i częstotliwości w sieciach optycznych wykorzystują tylko niewielką część dostępnego pasma optycznego (zazwyczaj jeden z ponad dziewięćdziesięciu dostępnych kanałów optycznych), oraz bazują na istniejącej infrastrukturze wzmacniaczy optycznych. W związku z tym nakłady finansowe związane z implementacją oraz utrzymaniem takiego systemu są znacząco mniejsze niż rozwiązań wykorzystujących infrastrukturę dedykowaną.” Relatywnie mała ingerencja w istniejącą infrastrukturę „nie rodzi już większych obaw operatorów sieci i jest coraz powszechniej wdrażana.”

Sformułowane spostrzeżenia oraz przyjęcie założenia o sensowności wykorzystania istniejącej infrastruktury optycznej, bez znaczącej ingerencji w zasoby operatora telekomunikacyjnego, uważam za w pełni uzasadnione. Podstawowe pytanie dotyczy jakości transferu czasu i częstotliwości wzorcowej w takiej sieci. W kolejnych rozdziałach rozprawy Autor stara się odpowiedzieć na to pytanie.

Analizę rozpoczyna od wprowadzenia w rozdziale drugim miar, które opisują jakość dystrybucji znacznika czasu oraz częstotliwości wzorcowej. Jest to zestaw parametrów,

uznanych powszechnie za obowiązujące w tym obszarze wiedzy. W kolejnym kroku analizuje właściwości światłowodów używanych we współczesnych sieciach optycznych oraz możliwy wpływ ich parametrów na transmisję sygnałów optycznych, które mogą posłużyć do przesyłania znaczników czasu oraz częstotliwości wzorcowej. Następnie przedstawia metody transferu czasu i częstotliwości możliwe do zastosowania w sieci optycznej. Opisuje sposób transferu czasu i częstotliwości w systemie ELSAT, który to system jest w dalszej części rozprawy traktowany jako referencyjny.

Autorską propozycję transferu czasu i częstotliwości w sieci optycznej wprowadzono w rozdziale 2.3. Podstawową ideę ilustruje rysunek 2.13. Autor proponuje realizację dwukierunkowego transferu czasu i częstotliwości z wykorzystaniem pary włókien, zamiast pojedynczego włókna. W tym przypadku sygnały czasu i częstotliwości są multipleksowane poprzez zwielokrotnienie falowe w dedykowanym, istniejącym w sieci DWDM kanale optycznym, z sygnałami telekomunikacyjnymi i są przesyłane poprzez niezmodyfikowaną sieć optyczną. Oznacza to, że sygnały transmitowane w przeciwnych kierunkach są przesyłane w fizycznie różnych włóknach optycznych oraz przechodzą przez różne urządzenia sieci DWDM. Propozycję Autora poprzedza szczegółowa analiza istniejących rozwiązań w zakresie transferu czasu i częstotliwości w jednym włóknie optycznym. W rozwiązaniu proponowanym przez Autora „używa się wspólnych, istniejących w strukturze sieci, wzmacniaczy optycznych dla całego przenoszonego pasma optycznego. Ponadto, jest ono technicznie dużo prostsze do realizacji, wymaga znacznie mniejszych nakładów finansowych niż rozwiązanie dwukierunkowe we wspólnym włóknie, a co najważniejsze jest akceptowalne przez większość operatorów telekomunikacyjnych.” Podstawowym ograniczeniem metody jest zachwianie, niezwykle istotnej dla metod transferu czasu i częstotliwości, symetrii pomiędzy kanałem nadawczym, a kanałem zwrotnym, co może powodować znaczące pogorszenie jakości transferu czasu i częstotliwości. Są to wnioski prawidłowe.

Analizę czynników wpływających na jakość proponowanej metody transferu czasu i częstotliwości zawiera rozdział trzeci. Analizowany jest wpływ kabli światłowodowych oraz urządzeń stosowanych w sieci optycznej na parametry krótkoterminowe oraz długoterminowe przesyłanego sygnału czasu i częstotliwości wzorcowej. Autor dokonuje porównania oczekiwanej jakości transferu w dwóch generacjach systemu optycznego. Pierwszy, starszy, wymaga zastosowania włókna kompensującego dyspersję. Drugi, nowszy, dedykowany transmisji koherentnej nie wymaga stosowania tego typu włókna, określanego w pracy także terminem „moduł DCF”. Rezultatem szczegółowych i wielokryterialnych badań opisanych

w tym rozdziale jest stwierdzenie Autora, że największy wpływ na pogorszenie parametrów przesyłanego sygnału czasu mają zmiany asymetrii czasu propagacji we włóknach optycznych, nawet teoretycznie o tej samej długości, spowodowane zmianami temperatury oraz stosowanie modułów DCF. Wpływ zmian temperatury na linie doziemne jest mniejszy niż w przypadku linii napowietrznych. Wpływ pracy urządzeń węzłowych na jakość dystrybucji oceniono jako mniej znaczący w porównaniu do zmian asymetrii czasu propagacji we włóknach optycznych ale jednak istotnie zależny od zmian temperatury.

Ponieważ starsza generacja sieci optycznych wymaga stosowania kompensatorów DCF, w rozdziale czwartym zaproponowano metodę korekcji fluktuacji fazy sygnałów wzorcowych dystrybuowanych w takiej sieci. Autor zaproponował użycie czujników temperatury wbudowanych fabrycznie w urządzenia węzłowe, co jest pomysłem ciekawym i jak pokazały dalsze badania skutecznym.

Wysoka zależność jakości transferu czasu i częstotliwości od zmian temperatury skłoniła Autora do opracowania modelu, przedstawionego w rozdziale piątym, który pozwoliłby oszacować bieżącą jakość sygnału czasu i częstotliwości u odbiorcy dla czasów uśredniania krótszych od około 1000 sekund oraz dla czasów wyraźnie dłuższych, np. w skali doby i o dowolnej porze roku, z uwzględnieniem strefy klimatycznej. W celu opracowania modelu skorzystano z ogólnodostępnych danych meteorologicznych, tj. z danych na temat zmian temperatury z licznych stacji pogodowych rejestrujących zarówno temperaturę powietrza jak i gruntu na różnych głębokościach, z danych na temat zmian temperatury rejestrowanych przez czujniki umieszczone w kilkudziesięciu węzłach rzeczywistej sieci DWDM, w tym temperatury pojedynczych kart/modułów urządzeń sieciowych, oraz z wartości fluktuacji fazy zmierzonych w rzeczywistych liniach światłowodowych wraz z wynikającym z nich oszacowaniem zmian uśrednionej (względem długości linii) temperatury kabli. Pozyskanie oraz analizę tylu danych uważam za znaczące zadanie badawcze, a sam proces modelowania oraz uzyskane wyniki za prawidłowe i istotne dla zastosowań proponowanych rozwiązań.

Zasadniczą część rozprawy kończy Podsumowanie, w którym Autor zawarł opis podstawowych rezultatów rozprawy. Przedstawione wnioski są spójne i bardzo dobrze uzasadnione. Na podkreślenie zasługuje szeroki i dogłębny zakres przeprowadzonych badań, wsparty adekwatnym aparatem matematycznym.

5. Oryginalne wyniki rozprawy

Podstawowym oryginalnym wynikiem rozprawy jest system transferu czasu i częstotliwości wykorzystujący istniejącą infrastrukturę sieci DWDM. Proponowany system wychodzi naprzeciw postulatam operatorów telekomunikacyjnych i nie ingeruje znacząco w istniejącą infrastrukturę sieci, jest relatywnie łatwy do wprowadzenia i tani w utrzymaniu. Jest także konkurencyjny w stosunku do systemów satelitarnych w zastosowaniach telekomunikacyjnych, informatycznych, energetycznych i w wielu innych ale niekoniecznie dla porównań skal czasu. Za najważniejsze oryginalne wyniki rozprawy można uznać:

1. Opracowanie na podstawie wykonanych pomiarów, właściwości katalogowych układów oraz danych meteorologicznych, modelu jakości transferu czasu i częstotliwości w sieci optycznej. Na podstawie modelu można szacować jakość sygnałów czasu i częstotliwości dystrybuowanych w nowych lub istniejących sieciach, nie będących obiektem badań Autora, ale złożonych z komponentów analizowanych w rozprawie i eksploatowanych w warunkach temperaturowych rozważonych w pracy.
2. Wykazanie na drodze eksperymentalnej, że zmiany różnicowego czasu propagacji sygnału z wykorzystaniem pary włókien w kablach światłowodowych są silnie skorelowane ze zmianami czasu propagacji sygnału optycznego w światłowodzie, spowodowanymi zmianami jego temperatury.
3. Oszacowanie jakości transferu sygnału czasu i częstotliwości dla linii doziemnych i napowietrznych dla dwóch metod transmisji sygnałów optycznych – niekoherentnej (starszej) oraz koherentnej (nowszej).
4. Oszacowanie wpływu modułów oraz urządzeń istniejących sieci optycznych na jakość transferu czasu i częstotliwości.
5. Zaproponowanie metody korekty negatywnego wpływu modułów różnicujących systemy niekoherentne i koherentne na jakość transferu czasu i częstotliwości.

6. Słabe strony rozprawy

W rozprawie dokonano wszechstronnej analizy czynników wpływających na proces dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości w sieci DWDM. Wiele opisanych rozwiązań to autorskie propozycje Doktoranta. Są one istotne i użyteczne zarówno obecnie jak i w dającej

się przewidzieć przyszłości. Podstawowe zastrzeżenia dotyczą bazy pojęciowej oraz sposobu przedstawienia zagadnienia. Są to:

1. W tytule pracy oraz w jej treści Autor odwołuje się do dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości w sieci optycznej DWDM. Taki zapis nie jest precyzyjny. Akronim DWDM oznacza metodę (sposób) zwielokrotnienia. Zapis „sieć optyczna DWDM” oznacza sieć urządzeń dokonujących zwielokrotnienia falowego połączonych kablami optycznymi. Nie jest to w pełni zgodne z treścią pracy, w której Autor odwołuje się także do pracy urządzeń służących do wprowadzania/wyprowadzania sygnałów optycznych jakimi są rekonfigurowalne optyczne krotnice transferowe ROADM, nazywane także w środowisku inżynierskim rekonfigurowalnymi multiplekserami add/drop. Zestaw analizowanych urządzeń oraz połączeń wskazuje, że badania przeprowadzono dla szerszej kategorii pojęciowej.
2. Opisany system transferu czasu i częstotliwości korzysta z istniejących kanałów optycznych. W sieci wielopierścieniowej może się zdarzyć, że sygnał czasu lub częstotliwości wzorcowej przenoszony na długości fali λ_n zostanie przeniesiony na długość fali λ_m , gdzie m jest różne od n . Możliwa jest także dynamiczna rekonfiguracja transmisji, spowodowana uszkodzeniami, zarządzaniem ruchem albo rozbudową sieci. Jaki wpływ będą miały te zdarzenia na jakość transferu czasu i częstotliwości w takiej sieci?
3. W pracy autor często korzysta z tłumaczenia terminu angielskiego „stability” na polskie słowo „stabilność”, co w przypadku sygnałów czasu i częstotliwości jest nieprecyzyjne i może wprowadzać w błąd. W języku polskim termin stabilność oznacza brak zmienności w czasie, brak wzbudzeń, a więc niezmiennosc stanu układu w czasie. Zapis „stability 10^{-x} ” przetłumaczony na język polski z użyciem słowa „stabilność” powinien mieć postać „stabilność 10^{16} ”. Precyzyjne tłumaczenie terminu „stability 10^{-x} ” na język polski to „niestałość 10^{-x} ”. Inna nieścisłość pojawia się przy omawianiu parametrów jakościowych dystrybucji czasu i częstotliwości w określonym przedziale czasu. Na stronie 17 Autor napisał „*Jednym z najważniejszych parametrów jakościowych jest niestabilność transferu, zdefiniowana jako statystyczna ocena fluktuacji fazy (czasu propagacji) przesyłanego sygnału referencyjnego w danym czasie obserwacji.*” Jest tutaj mowa o „niestabilności transferu”, co sugeruje, że może dochodzić do niestabilności w procesie transferu sygnałów czasu i częstotliwości, co nie pokrywa się ze stanem faktycznym. Podobny problem występuje w tytule rozdziału 3.

4. Utożsamianie fluktuacji fazy z fluktuacjami czasu propagacji nie jest poprawne. Na fluktuacje fazy wpływają nie tylko fluktuacje czasu propagacji ale także praca i szumy urządzeń użytych w sieci.
5. W przeprowadzonym modelowaniu jakości transferu czasu i częstotliwości (rozdział 5) nie określono czy celem jest możliwie precyzyjne dopasowanie modelu (modeli) do rzeczywistego stanu dla istniejących połączeń z możliwością projekcji otrzymanych rezultatów na inne istniejące lub przyszłe połączenia, czy też wyznaczenie modelu (modeli) dla najgorszego przypadku. Pewną wskazówkę można znaleźć na stronie 130, gdzie autor napisał „*Niepewność transferu wyznaczoną w procesie modelowania można traktować jako najgorszy przypadek, a właśnie określenie takiej wartości jest niezbędne w ocenie użyteczności danego systemu dla określonych zastosowań.*” Nie wiemy czy taki rezultat jest wynikiem celowych działań Autora, czy też jest to zbieg okoliczności.

7. Wniosek końcowy

Zgłoszone uwagi krytyczne nie zmieniają mojego przekonania, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Turzy wnosi nowe, istotne elementy do ważnego i aktualnego problemu budowy precyzyjnych i niskokosztowych systemów dystrybucji sygnałów czasu i częstotliwości. Rozprawa zawiera oryginalne, bardzo dobrze udokumentowane propozycje, które są przydatne zarówno w naukach technicznych jak i podstawowych. Na podkreślenie zasługuje obszerny zakres prac badawczych wykonanych przez Doktoranta, trafne założenia, spostrzeżenia oraz wnioski, a także staranne przygotowanie szaty graficznej rozprawy. Całość składa się na wysoką wartość merytoryczną recenzowanej rozprawy.

Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżyneryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony. Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Mieczysław Jęsa

