



prof. dr hab. inż. Piotr Kisała  
Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechnika Lubelska

**SEKRETARIAT**  
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 7.01.2026  
RD AEEITK 510.11/25  
Zarejestrowano pod nr .....  
Podpis ..... *Sm*

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Karola Salwika:**  
**„Optymalizacja długodystansowych, światłowodowych łączy do transferu czasu i częstotliwości, zawierających dwukierunkowe wzmacniacze optyczne”**

### 1. Podstawa prawna

- pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie - dr. hab. inż. Ryszarda Sroki z dnia 7.11.2025 o sygnaturze RD AEEITK/510.11.2/25;
- Uchwała nr 147/2025 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 6 listopada 2025 r. w sprawie wyznaczenia recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne mgr. inż. Karolowi Salwikowi;
- Uchwała nr 83/2025 Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 6 lutego 2025 r. w sprawie wyróżniania rozpraw doktorskich w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie;
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r., poz. 1571).

### 2. Ocena poziomu merytorycznego pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Karola Salwika zatytułowana „Optymalizacja długodystansowych, światłowodowych łączy do transferu czasu i częstotliwości, zawierających dwukierunkowe wzmacniacze optyczne” dotyczy problemów optymalizacji pracy łączy światłowodowych. Praca skupia się na łącach długodystansowych zawierających dwukierunkowe wzmacniacze optyczne. Autor w podziale na pięć rozdziałów merytorycznych przedstawia metodologię doboru wzmacnień realizując cel, którym głównie jest maksymalizacja jakości przesyłanych sygnałów, w efekcie przekładająca się na jakość pracy samego łącza. W swojej rozprawie analizuje główne zjawiska prowadzące do degradacji jakości sygnałów, tj. pojedyncze i podwójne rozpraszanie Rayleigha, rozpraszanie Brillouina oraz wzmocnioną emisję spontaniczną. Już na wstępie niniejszej recenzji zwracam uwagę, że potwierdzenie przez mgr. inż. Karola Salwika możliwości wykonywania skutecznej optymalizacji ma potencjał użyteczny.

Autor za cel pracy postawił cyt. „przeprowadzenie badań dotyczących wpływu zjawisk niepożądanych, zachodzących w dwukierunkowych, długodystansowych łącach światłowodowych, na jakość przesyłanych sygnałów użytecznych, by na podstawie oceny (pomiaru) tej jakości, przeprowadzić optymalizację pracy łącza”. Stwierdzam, że tak naprawdę badania, o których mowa w przytoczonym celu są tak naprawdę raczej środkiem do osiągnięcia celów, które zostały zdefiniowane w dalszej części jako tzw. cele szczegółowe. Autor określił trzy takie cele, przy czym pierwszy z nich dotyczy opracowania algorytmu sterowania zainstalowanymi w łączy wzmacniaczami na podstawie pomiaru jakości przesyłanych sygnałów. Drugi cel szczegółowy dotyczy opracowania metody wczesnej detekcji zjawiska rozpraszania Brillouina w momencie, gdy jego wystąpienie nie zaburza pracy łącza w stopniu uniemożliwiającym prowadzenie transmisji sygnałów. Natomiast trzeci cel skupia się na zbadaniu możliwości właściwego doboru wzmacnień wzmacniaczy i przeprowadzenia optymalizacji pracy łącza w przypadku autonomicznej pracy wzmacniaczy, bez możliwości wymiany informacji pomiędzy zainstalowanymi w łączy urządzeniami. Uważam, że tak postawione cele są uzasadnione merytorycznie a ich realizację oceniam w dalszej części przedmiotowej recenzji. Autor zdefiniował również trzy

tezy badawcze w brzmieniu: 1 teza: optymalizacja pracy dwukierunkowego łącza światłowodowego do transferu czasu i częstotliwości, prowadzona w sposób iteracyjny z wykorzystaniem pomiarów wykonywanych w czasie rzeczywistym, pozwala na uzyskanie zbieżnych rezultatów niezależnie od wykorzystanego kryterium decyzyjnego, jak również bez względu na sekwencję, w jakiej wprowadzane są korekty wzmacniaczy, 2 teza: zjawisko wymuszonego rozpraszania Brillouina może zostać wykryte na podstawie analizy charakterystycznych, nieliniowych zmian prądu fotodiody, w której następuje zdudnianie sygnałów z rozpraszania Rayleigha i Brillouina, 3 teza: w dwukierunkowym łączu światłowodowym możliwe jest lokalne (tj. w zainstalowanych w łączu wzmacniaczach) odwzorowanie warunków panujących na końcach łącza i pozwalających na ocenę jakości jego pracy, w stopniu wystarczającym do ustawienia optymalnego wzmacnienia, bez konieczności wykonania pomiarów w modułach brzegowych. W kolejnych rozdziałach pracy tezy te są konsekwentnie broniące, a ich zasadność ostatecznie udowodniana jest rozdziałach czwartym i piątym, dotyczących modelu łącza, opracowania metody wczesnej detekcji rozpraszania Brillouina oraz badań przeprowadzonych w oparciu o model łącza, dotyczących możliwości autonomicznej pracy wzmacniaczy optycznych. Struktura rozprawy jest prawidłowa, zawiera ona pięć rozdziałów merytorycznych, których zawartość i aspekty naukowe omówiono w niniejszym punkcie recenzji oraz podsumowanie z wnioskami końcowymi, których zasadność i trafność oceniono w końcowej części niniejszej recenzji. Obok rozdziałów *stricto* merytorycznych znajduje się również takie jak wstęp, cel i tezy rozprawy oraz organizacja pracy – tj. rozdział omawiający zakres poszczególnych rozdziałów i strukturę rozprawy.

W rozdziale pierwszym autor opisał koncepcję transferu czasu i częstotliwości przy wykorzystaniu dwukierunkowych łączy światłowodowych odwołując się do systemu ELSTAB (ang. *ELectronically STABILized time and frequency distribution system*). Jest to światłowodowy system dystrybucji czasu i częstotliwości opracowany w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, wykorzystujący łącze działające w zamkniętej pętli w obrębie pojedynczego włókna światłowodowego. Już na wstępie autor uściślił, że w swojej pracy skupia się na aspektach związanych z wykorzystaniem dwukierunkowych wzmacniaczy optycznych, diagnozując wszelkie źródła problemów powodujących swobodną propagację sygnałów niepożądanych w całym łączu. Rozdział zawiera również zestawienie metod zwiększenia zasięgu w łączach światłowodowych wraz z opisem czynników, które na taki zasięg wpływają. Autor analizuje także główne ograniczenia wpływające na pracę w tego typu systemach komunikacyjnych, opisując zjawiska oddziałujące negatywnie na przesyłane sygnały w pracy nazywane jako tzw. sygnały pożądane. Odnajdujemy tu szczegółowy opis mechanizmu rozpraszania Rayleigha wraz z uzasadnieniem stosowania dwóch bliskich spektralnie okien, zapewniających odseparowanie sygnałów pożądanych i rozproszonych i tym samym dających możliwość filtracji sygnałów niepożądanych. Autor wykazuje, że wzmacniacze optyczne stanowią nieodłączny element łącza, umożliwiając pracę długodystansową, ale stanowią jednocześnie źródło problemów, przyczyniając się do wydłużenia efektywnej drogi rozpraszania sygnałów i prowadząc do wzmacnienia niepożądanych sygnałów rozproszonych. Jak słusznie zauważa autor, umieszczenie w łączu odcinka włókna domieszkowanego jonami erbu z rozpraszającymi z natury sygnały światłowodami po obu stronach, a także z elementami odbijającymi, tj. złączami i spawami, stanowi swojego rodzaju układy wnęk rezonansowych, będących źródłem dodatkowych, niepożądanych sygnałów optycznych. Autor odpowiada również na pytanie, dlaczego całkowita eliminacja zjawiska wzmacnionej emisji spontanicznej nie jest możliwe na drodze filtracji optycznej, jednocześnie wskazując możliwości znacznego jej ograniczenia. W rozdziale tym autor wprowadza również wykorzystywane i badane w dalszej części pracy miary jakości przesyłanych sygnałów, tj. stosunek sygnał-szum oraz jitter. Istotnym elementem tej części pracy jest również opis podstawowych metod przeciwdziałania zjawiskom niepożądanym w łączach światłowodowych. Autor analizuje właściwy dobór wzmacnień wzmacniaczy, zastosowanie tzw. regeneratorów sygnałów oraz podział łącza na krótsze sekcje.

W drugim rozdziale autor opisał wykorzystanie modelu dwukierunkowego łącza światłowodowego do optymalizacji jego pracy. Analiza rozpoczyna się od zamodelowania propagacji sygnałów w łączu, które autor wykonuje w oparciu o schemat długodystansowego łącza światłowodowego, wykorzystującego wzmacniacze optyczne. Autor stosuje klasyczne podejście polegające na matematycznym opisie propagacji sygnałów w przeciwnych kierunkach, uwzględniając przy tym czynniki związane ze wzmacnianiem sygnałów we wzmacniaczach oraz tłumieniem w kolejnych sekcjach łącza. Przedstawił zachodzący wzdłuż całej długości łącza proces rozpraszania Rayleigha prowadzący do powstania niepożądanych sygnałów rozproszonych oraz modelowanie tego procesu polegające na podziale łącza na pojedyncze odcinki, nie zawierające wzmacniaczy i strat punktowych wprowadzanych przez poszczególne łącza. W rozdziale dotyczącym modelu łącza istotną część stanowi także zjawisko podwójnego rozpraszania Rayleigha. Autor odwołuje się do zależności matematycznych i fizycznych opisanych wcześniej dla przypadku rozpraszania pojedynczego, wyznaczając wartości mocy rozproszonej niezależnie w każdej sekcji, a następnie dokonując akumulacji i obliczając skumulowaną w całym łączu moc sygnału podwójnie rozproszonego, docierającego do modułu zdalnego. Opracowany i opisany model dwukierunkowego łącza światłowodowego uwzględnia także wzmacnioną emisję spontaniczną we wzmacniaczu. Autor opisuje propagację sygnału pochodzącego z ASE zachodzącej we wzmacniaczach optycznych, a następnie wylicza całkowitą moc tego sygnału widzianą na obu końcach łącza. Ostatecznie, przy analizie detekcji zachodzącej w odbiornikach w dwukierunkowych systemach transferu czasu i częstotliwości, brane są pod uwagę sygnały pożądane, sygnały pochodzące z podwójnego rozpraszania Rayleigha oraz sygnały pochodzące z emisji spontanicznej we wzmacniaczach. Autor tłumaczy

brak uwzględnienia sygnału pochodzącego z pojedynczego rozpraszania Rayleigha tym, że sygnał z pojedynczego rozpraszania Rayleigha jest usuwany przez poprzedzający odbiornik filtr optyczny, co eliminuje jego wpływ na odebrany sygnał użyteczny. Poproszę o rozwinięcie tego stwierdzenia w dalszej części recenzji w sekcji pytań do autora. Niezbędnym elementem tego typu pracy, w której wykonuje się optymalizację jest zdefiniowanie kryterium jakości sygnału, stanowiącego funkcję celu. W niniejszej rozprawie kwestę tę przedstawiono również w rozdziale drugim. Autor wykorzystuje w tym celu znany i dobrze określony parametr, tj. stosunek sygnał-szum SNR (ang.: *Signal to Noise Ratio*). Sam algorytm optymalizacji pracy łącza zaimplementowano w środowisku Matlab. W procedurze optymalizacji pracy łącza zastosowano kryterium minimax, uwzględniając wartości SNR na obu końcach łącza uzyskaną dla zadanych wartości wzmocnień. Metoda optymalizacyjna operuje na zadanym wektorze wzmocnień wzmacniaczy optycznych. Rezultatem jej implementacji jest uzyskanie takich nastaw parametrów, aby wypadkowy SNR na obydwu końcach łącza był jak największy. Końcowym zagadnieniem poruszonym w rozdziale jest walidacja modelu, która polegała na przeprowadzeniu pomiarów z wykorzystaniem zestawionych w laboratorium łączy zawierających różną liczbę sekcji i wzmacniaczy, a następnie na odniesieniu uzyskanych rezultatów do wyników symulacji uzyskanych z wykorzystaniem zbudowanego modelu. Autor udowodnił zgodność wartości stosunku sygnał-szum wyznaczonych w modelu i uzyskanych na drodze pomiarowej. Użyteczność modelu została także potwierdzona poza laboratorium, dzięki jego wykorzystaniu przy projektowaniu, instalacji i uruchomieniach rzeczywistych łączy zarówno w kraju jak i za granicą. Opracowany model pozwala przewidzieć wiele kwestii już na etapie symulacji komputerowych oraz z jakimi potencjalnymi ograniczeniami trzeba się liczyć, projektując łącze do transferu czasu i częstotliwości. Dotyczy to m.in. długości sekcji światłowodowych czy nawet ilości wzmacniaczy.

W rozdziale trzecim znajduje się dokładny opis koncepcji i realizacji procedur zarówno inicjalizacji jak też optymalizacji pracy łącza, prowadzonych na podstawie wykonywanych w czasie rzeczywistym pomiarów mocy oraz jakości przesyłanych w łączu sygnałów. Również w tej części pracy wybrzmiewają aspekty aplikacyjne zaproponowanej metody, ponieważ opisane tu eksperymenty prowadzone były z wykorzystaniem łącza zestawionego pomiędzy Warszawą a Łomżą. Pomiarów wykonywanych w łączu podzielone zostały na dwie grupy. Pierwsza dotyczy pomiarów wymaganych na etapie inicjalizacji pracy systemu, natomiast druga grupa dotyczy pomiarów pozwalających ocenić jakość przesyłanych sygnałów w działającym systemie, stosowanych z kolei już w samym procesie optymalizacji jego pracy. Ocenę jakości pracy łącza autor dokonuje na podstawie fluktuacji fazy występującej w przesyłanym w łączu sygnale, tj. na podstawie jittera. Zastosowany przez autora układ pomiarowy umożliwił pomiar jittera w zakresie od ~2 ps do 50 ps. Autor słusznie zauważa, że wymóg dotyczący utrzymania pracy łącza w trakcie prowadzonej optymalizacji jego pracy, jak również sam fakt, że optymalizacja prowadzona jest w działającym systemie transmisyjnym, praktycznie uniemożliwia zastosowania w tym celu znanych algorytmów i metod optymalizacyjnych dedykowanych rozwiązywaniu złożonych problemów. Należy tutaj zauważyć, że w sytuacji, gdy proces optymalizacji parametrów łącza jest wykonywany w trakcie jego pracy w warunkach operacyjnych, wynik optymalizacji parametrów jakościowych uzyskuje się dopiero w momencie wprowadzenia wartości zmiennych, czyli konkretnych wartości wzmocnień wzmacniaczy. Cennym elementem tej części pracy jest opracowanie szczegółowego schematu blokowego procedury optymalizacji pracy łącza, wykonywanej iteracyjnie poprzez wprowadzanie niewielkich zmian wartości wzmocnienia kolejnych wzmacniaczy i kontroli jakości sygnałów odbieranych w modułach brzegowych łącza. Doktorant udowodnił, że kolejność wykonywania nastaw wzmacniaczy nie jest istotna, a uzyskiwane w każdym przypadku rezultaty końcowe są ze sobą zgodne. Przy wyznaczaniu jakości pracy łącza zastosowano trzy kryteria decyzyjne: pierwsze kryterium, minima, w którym decyzja odnośnie jakości pracy łącza podejmowana jest na podstawie relacji parametrów określających jakość pracy łącza przed i po zmianie wartości wzmocnienia, drugie kryterium uproszczone, w którym decyzja jest wypadkową zmian jakości pracy łącza na obydwu końcach przed i po zmianie wzmocnienia oraz trzecie kryterium (za autorem) jednostronne, w którym decyzja podejmowana jest na podstawie zmiany jakości pracy tylko na jednym końcu łącza. Na uwagę zasługują obszernie wyjaśnienia sporządzone w formie tabelarycznej dotyczące już samej implementacji pierwszego kryterium decyzyjnego. Każdy z przypadków posiada sporządzoną reprezentację graficzną, do każdej z nich wykonano szczegółowe opisy przypadków. Najciekawszą, z punktu widzenia zastosowań aplikacyjnych, częścią tego rozdziału jest opis wyników eksperymentalnych, w którym autor wykorzystał istniejącą infrastrukturę telekomunikacyjną, tj. system zainstalowany na trasie Warszawa – Wyszaków – Ostrołęka – Łomża. Testy przeprowadzone przy użyciu zarówno łącza zestawionego w laboratorium, jak i łącza rzeczywistego potwierdziły prawidłowość działania procedury automatycznego uruchamiania systemu transferu czasu i częstotliwości także w przypadku bardziej złożonych topologii. Ciekawym elementem tej części rozprawy jest seria testów skuteczności optymalizacji pracy łącza o asymetrycznej topologii, wykorzystującego wzmacniacze wyposażone w izolatory optyczne. Autor konkluduje, że uzyskał większe wartości fluktuacji, niż miało to miejsce w przypadku prostszej topologii łącza wykorzystywanej we wcześniejszej fazie eksperymentów, przy czym punktem wyjściowym do wszystkich procedur optymalizacji był zestaw minimalnych wzmocnień, dobrany tak, by zapewnić możliwość transmisji sygnałów w obu kierunkach. W tym miejscu warto zwrócić uwagę na fakt, że w każdym z przedstawionych wyżej przypadków przeprowadzona optymalizacja skutkowałą około 55% redukcją jittera w stosunku do wartości początkowej, a przy optymalizacji pracy łącza Warszawa – Łomża o około 35% redukcją tego

parametru. W końcowej części rozdziału autor udowodnił, że pomiar jittera może być w pewnych, ściśle określonych warunkach pracy łącza, niewystarczający by skorygować niepoprawne ustawienia wzmacnień i zapewnić prawidłowe warunki jego pracy.

Czwarty rozdział pracy zawiera wyniki analizy i badania łącza ze szczególnym uwzględnieniem rozpraszania wymuszonego Brillouina. Doktorant opisał zjawisko fluktuacji mocy sygnału mogące prowadzić do utraty stanu synchronizacji pomiędzy modułami brzegowymi. W rozdziale zestawiono charakterystyki spektralne sygnałów widzianych na początku łącza testowego dla zmiennych ustawień wzmacnienia wzmacniaczy optycznych wraz z zaznaczeniem charakterystycznych prążków sygnału użytecznego, sygnału z rozpraszania Rayleigha oraz wymuszonego rozpraszania Brillouina. Autor wykonał badania udowadniające, że intensywność rozpraszania Brillouina zmienia się w sposób nieliniowy, o czym świadczy fakt, że początkowo praktycznie niezauważalny prążek odpowiadający sygnałowi rozproszonemu, przyrasta wraz ze wzrostem wzmacnień wzmacniaczy szybciej, niż prążek sygnału pochodzącego z liniowego procesu rozpraszania Rayleigha. Jest to wyraźnie widoczne przy porównaniu rysunków 4.3 i 4.4. Autor stwierdza, że przy zapewnieniu kompensacji tłumienia światłowodu, rozpraszanie Brillouina może wystąpić nawet w łączu o znacznej długości, w którym spodziewane poziomy mocy sygnałów są relatywnie niskie, pozornie nie wskazujące na wzbudzenie tego zjawiska. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że wykorzystywane przez doktoranta w badaniach łącze testowe składało się z trzech równych odcinków światłowodu, każdy o długości 100 km. Autor jednak ma świadomość faktu, że przypadek łącza, w którym wszystkie odcinki światłowodów są równe, praktycznie nie występuje w instalacjach polowych, gdzie długości sekcji i lokalizacja wzmacniaczy podyktowane są w zdecydowanej większości uwarunkowaniami techniczno-geograficznymi. Ważnym wnioskiem użytkowym jest również określenie, że wystąpienie zjawiska wymuszonego rozpraszania Brillouina może w pewnych warunkach skutecznie uniemożliwić dokończenia procesu optymalizacji pracy łącza. Istotnym elementem tego rozdziału jest również opis modelu zjawiska wymuszonego rozpraszania Brillouina. Autor wychodząc od równań opisujących propagację sygnałów wyznacza przebieg funkcji obrazującej wypadkowe tłumienie łącza, a następnie zgodnie z opracowanym algorytmem iteracyjnym przedstawia rozwiązanie układu równań propagacji sygnału, wykonując kolejne kroki prowadzące do wyznaczenia pożądanej wartości mocy sygnału rozproszonego. W rozdziale znajduje się również schemat stanowiska pomiarowego wykorzystanego do wyznaczenia wartości parametrów wzmacnienia Brillouina i mocy sygnału pochodzącego ze spontanicznego rozpraszania Brillouina. W części dotyczącej analizy rezultatów przeprowadzonych obliczeń numerycznych autor przedstawia przykładowe wyniki obliczeń łącza 3·100 km, przy czym zmienianym parametrem były wzmacnienia wzmacniaczy. Analiza wykazała szereg trendów i zmian mocy sygnałów, które uzyskano podczas analizy spektralnej, wykonywanej na podstawie danych rzeczywistych mierzonych z wykorzystaniem analizatora widma optycznego. Autor wykazał istnienie efektu kumulacji mocy rozproszonej prowadzącego do sytuacji, że w sekcjach bliższych nadajnikowi sygnału następuje kumulacja wartości mocy optycznej z większej liczby sekcji, a dodatkowo sygnały rozproszone ulegają wzmacnieniu w większej, niż ma to miejsce w dalszych punktach łącza, ilości wzmacniaczy. Zawarty w dalszej części tego rozdziału opis detekcji zjawiska wymuszonego rozpraszania Brillouina w łączu został oparty o koncepcję zdudniania sygnałów optycznych na fotodiodzie. Autor uzyskuje sygnał elektryczny o parametrach zależnych od intensywności, z jaką zachodzi rozpraszanie Brillouina. Wartościowym efektem prac doktoranta w tym zakresie są również rezultaty obrazujące działanie opracowywanego detektora rozpraszania Brillouina w postaci widm sygnałów optycznych doprowadzonych do detektora rozpraszania Brillouina oraz odpowiadające im przebiegi napięciowe, obserwowane na jego wyjściu. W końcowej części rozdziału autor określił przyrostowe kryterium decyzyjne dotyczące detekcji zjawiska rozpraszania Brillouina oparte na relacji zmiany poziomu mocy sygnałów i zmiany wartości skutecznej sygnału wyjściowego z fotodiody detektora. Na uwagę zasługuje fakt, że autor nie ogranicza się jedynie do stwierdzeń typu cyt. „Analizując zebrane w tabeli 4.2 rezultaty warto również zwrócić uwagę, że dla dużych wartości wzmacnienia wzmacniacza SPBA 1 następuje odwrócenie trendu wzrostowego prądu ze zdudniania sygnałów rozproszonych”, ale także podaje uzasadnione merytorycznie, przyczyny tego zjawiska.

Rozdział piąty zawiera końcowy i szczegółowy opis procedury optymalizacji pracy łącza na podstawie oceny jakości przesyłanych sygnałów wykonywanej we wzmacniaczach. Badania przedstawione w tej części rozprawy dotyczyły oceny możliwości autonomicznej pracy wzmacniaczy optycznych, które na podstawie wykonanych lokalnie pomiarów powinny być w stanie samoczynnie dobrać wartość swojego wzmacnienia, aby zapewnić optymalną pracę łącza. Stwierdzam, że zbadanie możliwości lokalnego odwzorowania warunków panujących na końcach łącza i przeprowadzenia optymalizacji jego pracy było spełnieniem głównego celu pracy. Autor dokonał optymalizacji na podstawie lokalnej oceny jakości pracy łącza przy założeniu, że wzmacniacze regulowane są w kolejności ich umiejscowienia w łączu, w kolejności losowej oraz w przypadku braku filtra optycznego, eliminującego wpływ pojedynczego rozpraszania Rayleigha. Badania wykonane przez autora wykazały także, że stosowany we wzmacniaczu fotoodbiornik nie musi być identyczny z odpowiednikiem stosowanym w elementach brzegowych. Jest to wniosek o istotnym znaczeniu aplikacyjnym. Autor potwierdził konieczność zastosowania filtra optycznego, eliminującego sygnał z pojedynczego rozpraszania Rayleigha, analogicznie do odbiorników umieszczonych na końcach łącza.

Uważam, że rozdziały czwarty oraz piąty rozprawy wnoszą nową wiedzę w obszarze badań zjawisk niepożądanych w dwukierunkowych, długodystansowych łącach światłowodowych oraz zawierają wiele

nieoczywistych i ważnych wniosków dotyczących optymalizacji pracy łączy do transferu czasu i częstotliwości. Spełnienie celów szczegółowych niniejszej rozprawy autor osiągnął poprzez

- opracowanie algorytmu sterowania zainstalowanymi w łączy wzmacniaczami,
- wykorzystanie pomiarów jittera, które pozwoliły w czasie rzeczywistym ocenić jakość przesyłanych sygnałów,
- przeprowadzenie optymalizacji pracy łączy w sposób adekwatny do aktualnych warunków panujących w łączy,
- opracowanie metody wczesnej detekcji zjawiska rozpraszania Brillouina,
- wykazanie, że jakość sygnałów wyznaczana lokalnie we wzmacniaczu nie wykazuje istnienia ekstremum jak to ma miejsce np. w modułach brzegowych,
- określenie i zbadanie czynników warunkujących możliwości autonomicznej pracy wzmacniacza optycznego.

### 3. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalnym dziełem autora jest niewątpliwie zaproponowanie rozwiązań pozwalających na inicjalizację i optymalizację pracy łączy światłowodowych mających na celu rozszerzenie możliwości, jakie daje istniejąca metoda wykorzystująca model łączy. Tematyka ta jest ważna i aktualna z punktu widzenia możliwości implementowania opracowanej metody do inicjalizacji oraz optymalizacji pracy tego typu infrastruktury komunikacyjnej. Dowodzi to oryginalności rozwiązanych przez autora problemów oraz aktualność tematyki badawczej poruszanej przez niego w ramach pracy. Aspekt innowacyjności i użyteczności zaproponowanego rozwiązania, szczególnie w kontekście spodziewanego upowszechnienia i szerokiego zastosowania opracowanej metody, która daje możliwość skutecznego przeprowadzania procesu optymalizacji pracy łączy przy wykorzystaniu danych uzyskanych lokalnie we wzmacniaczu, podnosi ocenę prowadzonych badań i uzyskanych wyników.

Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta uważam:

1. Udowodnienie zgodności wartości stosunku sygnał-szum wyznaczonych z wykorzystaniem modelu matematycznego i uzyskanych na drodze pomiarowej.
2. Zbudowanie modelu łączy światłowodowego i potwierdzenie jego aspektów użytecznych poprzez wykorzystanie go jako narzędzia wspomagające projektowanie, instalację i uruchamianie światłowodowych łączy do transferu czasu i częstotliwości, w kraju i za granicą.
3. Zaproponowanie iteracyjnej procedury optymalizacji pracy łączy w warunkach operacyjnych, umożliwiającej testowanie i wprowadzanie zmian relatywnie niewielkich i ograniczonych jednorazowo do pojedynczego urządzenia. Eliminacja zagrożenia polegającego na tym, że wprowadzona korekta uniemożliwiłaby funkcjonowanie łączy rzeczywistych.
4. Wykazanie w drodze eksperymentalnej, że kolejność korekty wzmacnień w procesie optymalizacji pracy łączy nie ma znaczenia. Udowodnienie, że kolejność, w jakiej wzmacniacze poddawane są modyfikacjom, nie jest istotna, a uzyskiwane w każdym przypadku rezultaty końcowe są ze sobą zgodne.
5. Wykazanie, że sam pomiar jittera może być w pewnych, ściśle określonych warunkach pracy łączy niewystarczający, by skorygować niepoprawne ustawienia wzmacnień i zapewnić prawidłowe warunki jego pracy.
6. Opracowanie procedury optymalizacji pracy łączy w fazie instalacji i jego konfiguracji z możliwością jej wykorzystania w celach kontrolnych, w celu wykrycia zmian warunków oraz pogorszenia stanu pracy poszczególnych urządzeń optoelektronicznych i całego łączy.
7. Eksperymentalne wykazanie, że w większości przypadków projektowania i uruchamiania światłowodowych systemów transmisyjnych, przyjęcie ograniczenia maksymalnej, dopuszczalnej mocy sygnałów pozwala skutecznie uniknąć zjawiska rozpraszania Brillouina.
8. Wykazanie, że próba optymalizacji pracy łączy na podstawie lokalnie wyznaczonych SNR nie jest skuteczna ze względu na trend zmian tego parametru. Wnioski płynące z tego osiągnięcia mogą być uogólnione i posiadają istotne znaczenie użyteczne.
9. Opracowanie metody wczesnej detekcji zjawiska rozpraszania Brillouina.
10. Określenie i zbadanie czynników warunkujących możliwości autonomicznej pracy wzmacniacza optycznego.

Stwierdzam, że powyższe osiągnięcia wskazują niewątpliwie na posiadaną przez autora umiejętność samodzielnego prowadzenia prac naukowych, dowodzą oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej w niej tematyki badawczej.

#### 4. Uwagi krytyczne, pytania

Pod względem językowym praca zredagowana jest poprawnie. Nie zawiera większych nieścisłości, aczkolwiek pojawiają się w niej błędy edycyjne i fleksyjne. Do opiniowanej pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Karola Salwika recenzent zgłasza następujące uwagi i pytania:

1. Autor zamiast krótkich i syntetycznych opisów rysunków stosuje często opis, który powinien pojawić się raczej w opisie rysunku zawartym w tekście pracy, przykładowo podpis rysunku 2.7 brzmi: cyt.: „Każdy wzmacniacz optyczny jest źródłem niepożądanego sygnału pochodzącego z wzmocnionej emisji spontanicznej (ASE). Jednocześnie każdy wzmacniacz wzmacnia sygnały wygenerowane w pozostałych wzmacniaczach.” Wydaje się, że wystarczyłoby np. podpis typu: *Propagacja/schemat propagacji sygnału pochodzącego z emisji spontanicznej.*
2. Dlaczego w równaniu (2.20) opisującym moc sygnału pochodzącego z wzmocnionej emisji spontanicznej zachodzącej w dowolnym,  $k$ -tym wzmacniaczu sumowanie odbywa się od  $i=k-1$  do wartości 1 dla  $g_i$ ? oraz od  $j=k$  również do wartości 1 dla  $s_j$ ?, czy nie powinno to być sumowanie do elementu  $n-1$  oraz  $n$  odpowiednio dla  $g_i$  oraz  $s_j$ ?
3. Autor tłumaczy brak uwzględnienia w analizie detekcji zachodzącej w odbiornikach w systemach dwukierunkowych sygnału pochodzącego z pojedynczego rozpraszania Rayleigha, tłumacząc to tym, że sygnał z pojedynczego rozpraszania Rayleigha jest usuwany przez poprzedzający odbiornik filtr optyczny, co eliminuje jego wpływ na odebrany sygnał użyteczny. Jest stwierdzenie prawidłowe, czy Autor mógłby rozwinąć ten aspekt?
4. Autor w rozdziale trzecim stwierdza, że opracowany układ pomiarowy umożliwi pomiar jittera w zakresie od  $-2$  ps do 50 ps. Powstaje pytanie jaka jest wartość wystarczająca? Proszę o wyjaśnienie jaka jest graniczna akceptowalna wartość tego parametru w badanym łączu.
5. Ile wynosiła i skąd wynikała liczba wykonanych integracji przy pomiarach jittera? Autor wspomniał w rozdziale 3.3, że wynik pomiarów jittera był uśredniany z kilku pomiarów, ale brakuje informacji odnośnie ich liczby i skąd ona wynikała, tj. dlaczego kilka, a nie kilkanaście czy kilkaset uśrednień? Czy to wynikało z wartości odchylenia standardowego wyliczonego z tych kilku pomiarów? Bardzo proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
6. W całej pracy rysunki składające się z kilku części nie są osobno ponumerowane, np. jako a), b) itp., natomiast autor oznacza je jako lewy, górny, środkowy, dolny itp., co wpływa niekorzystnie na przejrzystość ich śledzenia i porównywania.
7. W pracy autor nie ustrzegł się błędów językowych i interpunkcyjnych, typu zły przypadek odmienianych rzeczowników, powtórzenia wyrazów itp. Ze względu na ich dość sporą ilość oraz biorąc pod uwagę fakt, że nie wpływają one na ocenę merytoryczną, nie zostały one wyliczone w niniejszej recenzji.
8. Autor w rozdziale 3.5 konkluduje, że różnice w optymalizacji jittera (55% badania lab. oraz 35% badania na rzeczywistym łączu) wynikają z ograniczonych możliwości doboru odcinków światłowodu, przez co parametry łącza zestawionego w laboratorium nieznacznie odbiegały od parametrów łącza Warszawa – Łomża. Czy autor mógłby rozwinąć ten aspekt?
9. Rysunek 5.5 zawiera szereg istotnych wyników, brakuje jednak w tym zakresie szerszego lub nawet podstawowego komentarza autora.

#### 5. Ocena analizy źródeł

Przegląd źródeł literaturowych obejmuje łącznie 117 pozycji. Cytowane artykuły dotyczą głównie zagadnień związanych z rozpraszaniem Billouina i Rayleigha oraz problemami degradacji jakości sygnałów i algorytmami optymalizacyjnymi stosowanych w przypadku łączy telekomunikacyjnych. Stwierdzam, że tematyka poruszana przez doktoranta jest aktualna, literatura cytowana jest w sposób prawidłowy, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy. Przykładowo 3 prace cytowane przez autora pochodzą z roku 2025, 5 prac z roku 2024 oraz 5 prac z roku 2023.

#### 6. Podsumowanie

Recenzowana rozprawa dotyczy opracowania rozwiązań pozwalających na przeprowadzenie skutecznej optymalizacji pracy długodystansowych, dwukierunkowych łączy światłowodowych do transferu czasu i częstotliwości, polegających na właściwym doborze wartości wzmocnień zainstalowanych w łączu wzmacniaczy optycznych. Tematyka pracy jest aktualna, a sama praca ma wiele aspektów aplikacyjnych. Przedstawiony przez autora sposób modelowania zjawisk zachodzących w dwukierunkowym łączu do transferu czasu i częstotliwości, pozwolił uzyskać narzędzie do obliczeń numerycznych, które z dokładnością 2 dB odwzorowuje rezultaty osiągnięte w łączu rzeczywistym. Uwzględnia ono zarówno propagację sygnałów optycznych, zjawiska prowadzące do generacji sygnałów niepożądanych w domenie optycznej jak i procesy prowadzące do powstania szumu w domenie elektrycznej. W rezultacie prowadzonych przez autora badań,

opracowane zostały rozwiązania pozwalające na zainicjalizowanie pracy łącza i przeprowadzenie jego optymalizacji w sposób automatyczny, wykorzystując rezultaty pomiarów wykonywanych w czasie rzeczywistym. Pozwala to na bieżąco śledzić zmiany jakości sygnałów w zależności od wprowadzanych zmian wzmocnień. Niniejszym stwierdzam, że cele szczegółowe pracy zostały osiągnięte, a tezy pracy udowodnione. Recenzowana praca zawiera zarówno dobrze wykonaną część analityczną, jak i poparte dogłębną analizą literatury przedmiotu badania numeryczne i eksperymentalne.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Salwika „*Optymalizacja długodystansowych, światłowodowych łączy do transferu czasu i częstotliwości, zawierających dwukierunkowe wzmacniacze optyczne*” spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r., poz. 1571) stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Karola Salwika do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

/recenzent/  
  
prof. dr hab. inż. Piotr Kisala