



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA  
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

# **AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

*Optymalizacja długodystansowych, światłowodowych  
łączy do transferu czasu  
i częstotliwości, zawierających dwukierunkowe  
wzmacniacze optyczne*

Autor: mgr inż. Karol Salwik

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Łukasz Śliwczyński, prof. AGH

Praca wykonana:  
*Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji  
Instytut Elektroniki*

Kraków, 2026

## 1. Streszczenie

Rozprawa prezentuje rezultaty badań dotyczących optymalizacji pracy długodystansowych, światłowodowych łączy do transferu czasu i częstotliwości, zawierających dwukierunkowe wzmacniacze optyczne. Rozwiązania tego typu wymagają szczególnej uwagi w zakresie doboru wzmocnień, w celu zapewnienia możliwie wysokiej jakości przesyłanych sygnałów, przekładającej się na stabilność i niezawodność pracy łącza. Choć dobór ten może zostać wykonany w oparciu o metody symulacyjne, to ze względu na brak wiarygodnych danych pozwalających zamodelować łącze, metody te mają ograniczoną dokładność. W związku z tym uzasadnione jest przeprowadzenie tego procesu w łączy fizycznym, w oparciu o wyniki wykonywanych na bieżąco pomiarów jakości jego pracy.

Degradacja jakości pracy łącza związana jest z występowaniem zjawisk niepożądanych, takich jak np. pojedyncze i podwójne rozpraszanie Rayleigha, wzmocniona emisja spontaniczna, czy rozpraszanie Brillouina. Optymalizacja ma na celu znalezienie zestawu wzmocnień, przy których uzyskuje się minimalizację wspomnianych zjawisk niepożądanych, przy jednoczesnym zapewnieniu dużego marginesu, w jakim jakość przesyłanych w łączy sygnałów może ulec zmianie, bez wpływu na pracę całego systemu transmisyjnego. Do oceny tej jakości, można wykorzystać wyniki wykonywanych na końcach łącza pomiarów fluktuacji fazy przesyłanych sygnałów, czyli tzw. jittera, co jednak wymaga wcześniejszego doprowadzenia łącza do stanu operacyjnego. W związku z tym zaproponowano procedurę inicjalizacyjną, która pozwala ustawić wzmocnienia kolejnych wzmacniaczy „jeden po drugim” w taki sposób, by moc optyczna w sąsiadującym urządzeniu osiągnęła wartość powyżej przyjętego progu, związanego np. z czułością wykorzystywanych układów pomiarowych. Po zainicjalizowaniu pracy łącza można przeprowadzić jego optymalizację, zgodnie z opracowaną procedurą, polegającą na wprowadzaniu niewielkich korekt wzmocnień kolejnych wzmacniaczy, każdorazowo sprawdzając ich wpływ na jakość przesyłanych sygnałów. Decyzja odnośnie utrzymania lub wycofania wprowadzonej korekty podejmowana jest na podstawie wyników pomiaru jittera z obydwu końców i z wykorzystaniem kryterium minimax lub kryterium uproszczonego (analiza pierwiastka sumy kwadratów zmierzonych wartości jittera). Rozważono także sytuację, w której pomiar jittera wykonywany jest tylko na jednym z końców łącza. Rezultaty badań potwierdziły możliwość przeprowadzenia skutecznej optymalizacji i uzyskania spójnych rezultatów, bez względu na zastosowane kryterium decyzyjne, jak również niezależnie od sekwencji, w jakiej wprowadzane są korekty wzmocnień wzmacniaczy.

Spośród analizowanych zjawisk niepożądanych, szczególną uwagę zwrócono na wymuszone rozpraszanie Brillouina, które może utrudnić lub wręcz uniemożliwić działanie łącza. W rozprawie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych dotyczących warunków występowania samego zjawiska, jak i możliwości jego wczesnego wykrycia. Stwierdzono, że dla niskich wartości mocy sygnału rozproszonego, nieliniowość zjawiska ujawnia się w mniejszym stopniu niż w momencie, gdy rozpraszanie zachodzi w sposób intensywny. Pozwoliło to zaproponować metodę detekcji, polegającą na analizie przyrostów prądu fotodiody, w której następuje zdudnianie sygnałów pochodzących z nieliniowego rozpraszania Brillouina oraz liniowego rozpraszania Rayleigha. Jeśli

przyrostowi mocy sygnału, który podlega rozpraszaniu (związanemu np. ze zwiększeniem wzmocnienia wzmacniacza) odpowiada w przybliżeniu liniowo proporcjonalny przyrost prądu, to można przyjąć, że rozpraszanie Brillouina nie zachodzi w sposób mogący zaburzyć pracę łącza.

Ostatnia część rozprawy odnosi się do przypadku, w której pomiary jakości przesyłanych sygnałów wykonywane są nie w modułach brzegowych, ale lokalnie we wzmacniaczach. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że możliwe jest lokalne odwzorowanie warunków panujących na końcach łącza, w stopniu pozwalającym na prawidłową ocenę jakości jego pracy. Na tej podstawie można przeprowadzić optymalizację bez konieczności zapewnienia komunikacji między zainstalowanymi w łączy urządzeniami.

## 2. Cel i tezy pracy

Celem ogólnym niniejszej pracy było przeprowadzenie badań dotyczących wpływu zjawisk niepożądanych, zachodzących w dwukierunkowych, długodystansowych łączach światłowodowych, na jakość przesyłanych sygnałów użytecznych, by na podstawie oceny (pomiaru) tej jakości, przeprowadzić optymalizację pracy łącza. Proces ten wiąże się z doбором zestawu wzmocnień zainstalowanych w łączy wzmacniaczy optycznych, przy którym uzyskuje się minimalizację zjawisk niepożądanych. W założeniu, optymalizacja taka wykonywana jest w działającym łączy, a jej prowadzenie nie może zaburzyć jego pracy. W obszarze działań związanych z realizacją tak postawionego celu ogólnego, zdefiniowano następujące cele szczegółowe:

- Opracowanie algorytmu sterowania zainstalowanymi w łączy wzmacniaczami na podstawie pomiaru jakości przesyłanych sygnałów. Zagadnienie obejmuje kwestię doboru kryterium decyzyjnego, uwzględniającego wyniki pomiarów wykonanych w odbiornikach znajdujących się na dwóch przeciwległych końcach łącza.
- Opracowanie metody wczesnej detekcji zjawiska rozpraszania Brillouina w momencie, gdy jego wystąpienie nie zaburza pracy łącza w stopniu uniemożliwiającym prowadzenie transmisji sygnałów.
- Zbadanie możliwości właściwego doboru wzmocnień wzmacniaczy i przeprowadzenia optymalizacji pracy łącza w przypadku autonomicznej pracy wzmacniaczy, bez możliwości wymiany informacji pomiędzy zainstalowanymi w łączy urządzeniami.

W niniejszej pracy postawione zostały trzy tezy.

1. 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 wzmocnień wzmacniaczy.

2. Zjawisko wymuszonego rozpraszania Brillouina może zostać wykryte na podstawie analizy charakterystycznych, nieliniowych zmian prądu fotodiody, w której następuje zduńnianie sygnałów z rozpraszania Rayleigha i Brillouina.
3. W dwukierunkowym łączy światłowodowym możliwe jest lokalne (tj. w zainstalowanych w łączy wzmacniaczach) odwzorowanie warunków panujących na końcach łączy i pozwalających na ocenę jakości jego pracy, w stopniu wystarczającym do ustawienia optymalnego wzmocnienia, bez konieczności wykonania pomiarów w modułach brzegowych.

### **3. Najważniejsze wyniki pracy**

Optymalizacja pracy długodystansowych, światłowodowych łączy do transferu czasu i częstotliwości, zawierających dwukierunkowe wzmacniacze optyczne stanowi istotne działanie mające na celu zapewnienie niezawodności działania oraz sprostanie wymogom jakie stawia współczesna metrologia czasu i częstotliwości. Przedstawione w rozprawie badania odnoszą się w głównej mierze do przypadku, gdy optymalizacja taka, polegająca na znalezieniu zestawu wzmocnień zainstalowanych w łączy wzmacniaczy optycznych, zapewniającego najwyższą jakość pracy tego łączy, prowadzona jest w oparciu o wyniki wykonywanych na bieżąco pomiarów, a nie przy wykorzystaniu modelu matematycznego. Podejście takie jest uzasadnione faktem, że zachodzące w łączy zjawiska mogą być bardzo złożone, a przez to trudne do wiernego zamodelowania. Ponadto, samo odwzorowanie fizycznego łączy w modelu może być problematyczne ze względu na niepełną lub odbiegającą od stanu faktycznej specyfikację, co zaobserwowano w trakcie prowadzonych badań eksperymentalnych. Zaproponowane podejście, w którym optymalizacja pracy łączy prowadzona jest na podstawie oceny jakości tej pracy (realizowanej przez pomiar jittera w sygnale uzyskanym na wyjściach fotoodbiorników) pozwala dobrać wzmacnianie wzmacniaczy w sposób adekwatny do aktualnie panujących warunków, a nie do warunków przyjętych w modelu.

Dokonanie oceny jakości pracy łączy na podstawie wykonanych pomiarów jittera wiąże się z koniecznością zapewnienia w łączy warunków, przy których dwukierunkowa transmisja sygnałów jest możliwa. W związku z tym zaproponowano, procedurę inicjalizacyjną, pozwalającą na ustawienie instalowanych w łączy wzmacniaczy optycznych w taki sposób, aby zapewnić minimalne wartości mocy przesyłanych sygnałów pożądaných, przy których ich poprawna detekcja jest możliwa. Procedura taka działa iteracyjnie i pozwala na ustawienie zainstalowanych w łączy wzmacniaczy „jeden po drugim” w taki sposób, aby wzmocnienie danego wzmacniacza pozwoliło osiągnąć przyjęty poziom mocy sygnału w kolejnym urządzeniu (którym może być następny wzmacniacz lub odbiornik w module brzegowym na końcu łączy). Badania przeprowadzone zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i podczas eksperymentów polowych, prowadzonych z wykorzystaniem łączy zestawionego pomiędzy Warszawą a Łomżą, potwierdziły skuteczność procedury inicjalizacji. Stwierdzono, że uzyskane w jej wyniku wartości wzmocnień nie tylko

zapewniają warunki niezbędne do prowadzenia transmisji sygnałów, ale stanowią właściwy punkt startowy do prowadzonej w kolejnym kroku optymalizacji pracy łącza.

Procedura optymalizacji pracy łącza, opracowana w toku prowadzonych badań stanowi realizację pierwszego ze zdefiniowanych celów szczegółowych. Zaproponowane rozwiązanie polega na wprowadzaniu niewielkich (0,5 – 1 dB) korekt wzmacnień kolejnych wzmacniaczy, z każdorazową kontrolą wpływu takiej zmiany na jakość pracy łącza. W opracowanym algorytmie sterowania wzmacniaczami przyjęto, że w pierwszej kolejności wzmacnienie zostaje zwiększone, a jeśli zmiana ta prowadzi do pogorszenia jakości, wówczas podejmowana jest próba zmniejszenia wzmacnienia. Jeśli każda z tych zmian prowadzi do pogorszenia jakości pracy łącza wówczas wzmacniacz traktowany jest jako „ustawiony optymalnie”, a procedura optymalizacji jest kontynuowana w kolejnym urządzeniu. Algorytm kończy się w momencie, gdy jakakolwiek zmiana wzmacnienia w dowolnym wzmacniaczu prowadzi do pogorszenia jakości pracy łącza. W toku prowadzonych badań stwierdzono, że procedura optymalizacji łącza zawierającego 3-4 wzmacniacze optyczne trwa około kilkunastu minut, ale co ważniejsze, w trakcie jej trwania łącze cały czas pozostaje w stanie operacyjnym (prowadzona optymalizacja nie zaburza transmisji sygnałów). W tym kontekście należy zaznaczyć, że bardziej złożone metody optymalizacyjne (np. algorytmy simpleksowe lub genetyczne) nie znajdują zastosowania w rozważanym problemie optymalizacyjnym, bowiem w fizycznym łączy skutek zmiany wzmacnienia jest znany dopiero w momencie zastosowania tej zmiany. Można zatem rozważyć sytuację, w której algorytm przeszukujący przestrzeń potencjalnych rozwiązań natrafia na przypadek uniemożliwiający prawidłowe funkcjonowanie łącza, co jednak zostaje wykryte post factum.

Biorąc pod uwagę, że do oceny jakości pracy łącza uwzględnia się rezultaty pomiarów jittera, wykonanych na obydwu końcach łącza, w toku prowadzonych badań przetestowano trzy kryteria decyzyjne, które w różnoraki sposób wiążą ze sobą te rezultaty i na podstawie których podejmowana jest decyzja odnośnie poprawy bądź pogorszenia jakości pracy łącza jako całości. Spośród zaimplementowanych i przetestowanych, najbardziej złożonym jest kryterium minimax, które w całościowej ocenie jakości pracy łącza uwzględnia wzajemną relację pomiędzy wynikami pomiarów jittera, wykonanych na obydwu końcach łącza, przed i po wprowadzeniu korekty wzmacnienia. Kryterium to jest również najbardziej uniwersalne i może zostać zastosowane zarówno w systemach, w których przesyłane w obie strony sygnały są od siebie niezależne (np. pochodzą z dwóch zegarów atomowych umieszczonych po przeciwległych stronach łącza), jak również w systemach dystrybucji czasu i częstotliwości, działających w zamkniętej pętli, gdzie moduł odbiorczy (tzw. moduł zdalny) odsyła odebrany sygnał do modułu nadawczego (tzw. moduł lokalny) na potrzeby stabilizacji opóźnienia propagacyjnego. Dwukierunkowa transmisja sygnałów w zamkniętej pętli sprawia, że jitter zmierzony w module lokalnym będzie zawsze większy od jittera zmierzonego w module zdalnym, w którym odebrany sygnał propaguje przez łącze dwukrotnie („tam i z powrotem”), będąc tym samym dwukrotnie narażonym na czynniki degradujące jego jakość. Z tego też względu szczegółowa analiza wzajemnej relacji parametrów (wartości jittera), jaką wykonuje się w ramach kryterium minimax, może w pewnych przypadkach być nadmiarowa, bowiem część potencjalnych zestawień tych

parametrów nigdy nie wystąpi. W związku z tym zaproponowano drugie kryterium, które w sposób uproszczony łączy ze sobą wyniki pomiarów poprzez wyznaczenie „jakości wypadkowej” jako pierwiastka sumy kwadratów wartości jittera, zmierzonych na obydwu końcach łącza. Decyzja dotycząca podtrzymania lub odrzucenia korekty wzmacnienia podejmowana jest na podstawie zmian tak wyznaczonego parametru, bez szczegółowej analizy wzajemnej relacji między zmierzonymi wartościami jittera. Ostatnie kryterium odnosi jakość pracy łącza do wartości jittera zmierzonego na jednym z końców łącza (kryterium jednostronne). Zastosowanie takiego kryterium może okazać się jedynym możliwym wyjściem w sytuacji awaryjnej (co miało miejsce także w toku prowadzonych eksperymentów z wykorzystaniem łącza Warszawa - Łomża), stąd też uzasadnionym było zbadanie, jakich rezultatów można spodziewać się przy jego wykorzystaniu. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły stwierdzić, że niezależnie od wyboru kryterium decyzyjnego, prowadzona optymalizacja prowadzi do spójnych rezultatów (zestaw optymalnych wzmacnień), a ewentualne różnice są w praktyce pomijalne. Badania uwidocznily, że optimum jakości pracy łącza nie jest ostre, przez co w jego bliskim otoczeniu różnice wzmacnienia rzędu 1-2 dB nie przekładają się znaczącą zmianę tej jakości. Rezultat ten potwierdza również, że nawet stosując prostsze kryteria, można dobrać wzmacnienia wzmacniaczy w sposób zapewniający prawidłowe funkcjonowanie łącza. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły również stwierdzić, że na rezultat końcowy nie ma wpływu sekwencja, w jakiej wprowadzane są korekty wzmacnień poszczególnych wzmacniaczy. Również początkowy zestaw wzmacnień, stanowiący punkt startowy do prowadzonej optymalizacji nie ma wpływu na uzyskiwany rezultat końcowy. W szczególności, wzmacnienia ustawione w wyniku działania procedury inicjalizacyjnej, powalają na skuteczne przeprowadzenie optymalizacji pracy łącza. W tej kwestii zidentyfikowano jednak szczególny przypadek, przy którym optymalizacja może się nie powieść. Jest to sytuacja, gdy początkowe wzmacnienia znacząco przekraczają wartości wymagane w łączy o danej strukturze, co potencjalnie może prowadzić do wzbudzenia zjawiska wymuszonego rozpraszania Brillouina.

Wymuszone rozpraszanie Brillouina jest zjawiskiem nieliniowym o relatywnie niskim progu mocy optycznej, przy którym może ono wystąpić. Ograniczenie dopuszczalnej mocy propagującego w łączy sygnału stanowiło podstawowy mechanizm przeciwdziałania temu zjawisku, jaki zastosowano w metodach optymalizacji pracy łącza wykorzystujących jego model. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że podejście takie może być niewystarczające, bowiem w dwukierunkowym łączy światłowodowym wykorzystującym wzmacniacze optyczne, rozpraszanie może zachodzić wzdłuż całej długości łącza, a moc sygnału rozproszonego, propagującego w kierunku przeciwnym do sygnału, który temu rozpraszaniu podlega, charakteryzuje się trendem rosnącym w kierunku źródła sygnału. Oznacza to, że nawet niezbyt intensywne rozpraszanie w sekcjach łącza, gdzie moce optyczne nie są duże, może mieć wpływ na sygnał rozproszony w sekcjach, gdzie sygnały rozproszone osiągają niezaniadbywalne poziomy, mogące prowadzić do zaburzenia pracy łącza. Ta obserwacja pozwoliła stwierdzić, że zjawisko rozpraszania Brillouina może uwidocznic się na początku łącza. W toku prowadzonych badań, opracowano układ pomiarowy pozwalający na wykrycie zachodzącego w łączy zjawiska rozpraszania, a wspomniana obserwacja pozwoliła

przyjąć, że układ taki powinien znajdować się jak najbliżej każdego z końców łącza (ze względu na dwukierunkowość łącza).

Opracowane rozwiązanie pomiarowe opiera się o zjawisko zdudniania sygnałów optycznych w fotodiodzie. W omawianym przypadku zdudnianiu podlegają sygnały z dwóch zachodzących w łączy procesów rozpraszania – liniowego rozpraszania Rayleigha i nieliniowego rozpraszania Brillouina. Rezultatem zdudniania jest sygnał elektryczny na wyjściu fotodiody, zależny od mocy optycznej obu tych sygnałów rozproszonych. Ponieważ zmiany mocy sygnału podlegającego obu wspomnianym procesom rozpraszania przekładają się na zmianę mocy zarówno sygnału z rozpraszania Rayleigha, jak i rozpraszania Brillouina, w procesie zdudniania nie występuje żaden sygnał, który można by przyjąć za jednoznaczny i stałą referencję. W związku z tym detekcję rozpraszania Brillouina oparto o zaproponowane kryterium przyrostowe. Stwierdzono, że dla małych wartości mocy optycznej sygnału podlegającego rozpraszaniu, nieliniowość rozpraszania Brillouina uwidacznia się w znacznie mniejszym stopniu niż w przypadku, gdy moc optyczna sygnału jest większa. Tym samym, jeśli związanemu ze zwiększeniem wzmocnienia przyrostowi mocy sygnału podlegającego rozpraszaniu, odpowiada w przybliżeniu liniowo proporcjonalny przyrost prądu fotodiody, w której sygnały rozproszone ulegają zdudnianiu, to zjawisko rozpraszania Brillouina nie zachodzi w sposób intensywny, mogący zaburzyć pracę łącza. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że rozważane zjawisko nie stanowi zagrożenia dla funkcjonowania łącza, jeśli przyrostowi mocy optycznej odpowiada przyrost prądu nie większy niż 2 dB od spodziewanego. Zaproponowane kryterium narzuca wymóg, by układ pomiarowy umieszczony był we wzmacniaczu, gdzie w sposób jednoznaczny, na podstawie zmiany wzmocnienia, można określić przyrost mocy optycznej. Biorąc pod uwagę rezultaty wcześniejszych obserwacji, układ ten powinien znaleźć się we wzmacniaczach najbliższych modułom brzegowym systemu transferu czasu i częstotliwości.

Obszar badań dotyczący optymalizacji pracy dwukierunkowych łączy światłowodowych obejmował w głównej mierze kwestie oceny jakości pracy łącza przy wykorzystaniu rezultatów wykonanych na jego końcach pomiarów jittera (z ewentualnym włączeniem detekcji rozpraszania Brillouina). W rozprawie przedstawiono jednak również koncepcję, według której optymalizacja prowadzona jest na podstawie parametrów wyznaczonych (zmierzonych) lokalnie w każdym wzmacniaczu, bez wymiany informacji pomiędzy zainstalowanymi w łączy urządzeniami (wzmacniacze optyczne, moduły brzegowe). Podejście takie uzasadnione jest tym, że w prawnych przypadkach możliwości zdalnego zarządzania urządzeniami są ograniczone, co utrudnia prowadzenie optymalizacji, w której regulacja wzmacniacza prowadzona jest w oparciu o wyniki pomiarów wykonanych w modułach brzegowych. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że na podstawie danych zmierzonych lokalnie we wzmacniaczu istnieje możliwość odwzorowania warunków panujących na końcach łącza w stopniu pozwalającym na przeprowadzenie optymalizacji i uzyskanie wyników zbliżonych z tymi, które uzyskuje się opierając ten proces na wynikach pomiarów jittera na końcach łącza.

Prowadzone badania ukierunkowane były na poszukiwanie rozwiązań, które pozwoliłyby odnieść jakość pracy dwukierunkowych łączy do transferu czasu i częstotliwości

do parametrów, które można uzyskać w wyniku wykonanych pomiarów, przez co faktycznie odzwierciedlających aktualne warunki panujące w łączy. Podejście to stanowi uzupełnienie, a w pewnych przypadkach alternatywę dla rozwiązań, w których optymalizacja pracy łączy prowadzona jest na podstawie danych uzyskanych z jego modelu. Należy jednak zaznaczyć, że model łączy, był wielokrotnie wykorzystywany w toku prowadzonych badań, w trakcie których został rozbudowany m.in. o możliwość uwzględnienia zjawiska wymuszonego rozpraszania Brillouina oraz wyznaczenia rozkładu mocy sygnałów rozproszonych wzdłuż całego łączy. Uzyskane w ten sposób rezultaty pozwoliły na opracowanie kryterium przyrostowego, stosowanego podczas detekcji zjawiska rozpraszania Brillouina. Ponadto, możliwość symulacji łączy daje możliwość przeprowadzenia części badań dla szerszego zakresu przypadków konfiguracji łączy, których każdorazowe zestawienie w postaci fizycznej mogłoby być problematyczne.

Przeprowadzone badania, których rezultaty zawarto w rozprawie, pozwoliły stwierdzić, że zachodzące w łączy zjawiska niepożądane oddziałują na przesyłane w łączy sygnały degradując ich jakość, co uwidacznia się jako zwiększenie jittera w sygnałach na wyjściach fotodiodników w modułach brzegowych. Wykorzystując jitter jako miarę jakości pracy łączy można skutecznie przeprowadzić optymalizację jego pracy, polegającą na doborze wzmacnień wzmacniaczy optycznych. Istotnym wnioskiem, stanowiącym potwierdzenie pierwszej z postawionych w pracy tez jest to, iż na końcowy rezultat optymalizacji (czyli zestaw wzmacnień gwarantujący minimalizację zjawisk niepożądanych i szeroki margines w jakim jakość przesyłanych sygnałów może ulec pogorszeniu bez wpływu na pracę całego systemu transmisyjnego), nie wpływa zarówno sekwencja, w jakiej korekty wzmacnień wprowadzane są w kolejnych wzmacniaczach, jak również przyjęte kryterium decyzyjne, łączące wyniki pomiarów jittera z obydwu końców łączy w jeden parametr odzwierciedlający jakość pracy całego łączy.

W kontekście wyznaczania jakości pracy łączy, stwierdzono, że pomiar jittera może być niewystarczający do przeciwdziałania wymuszonemu rozpraszaniu Brillouina. Przeprowadzone badania dotyczące tego zjawiska pozwoliły zaproponować metodę jego wczesnej detekcji, opartą o analizę prądu fotodiody pomiarowej, w której następuje zdudnianie sygnałów z liniowego rozpraszania Rayleigha i nieliniowego rozpraszania Brillouina. Uzyskane rezultaty dotyczące skuteczności tego rozwiązania, stanowią potwierdzenie drugiej z postawionej w pracy tez, dotyczącej możliwości wykrycie wymuszonego rozpraszania Brillouina w dwukierunkowym łączy światłowodowym.

Optymalizacji pracy dwukierunkowych łączy światłowodowych do transferu czasu i częstotliwości ma na celu przede wszystkim zapewnienie możliwie wysokiej jakości przesyłanych sygnałów, uzyskiwanej w modułach brzegowych, czyli na końcach łączy. W toku prowadzonych badań rozważono jednak sytuację, w której komunikacja między urządzeniami nie może zostać zapewniona, a zainstalowane w łączy wzmacniacze działają w sposób autonomiczny, dokonując doboru swoich nastaw na podstawie lokalnie zmierzonych parametrów. Uzyskane rezultaty pozwoliły potwierdzić trzecią z postawionych

w pracy tez, stanowiąc, iż możliwe jest lokalne odwzorowanie warunków panujących na końcach łącza w stopniu wystarczającym do ustawienia optymalnego wzmocnienia, bez konieczności wymiany informacji z innymi zainstalowanymi w łączy urządzeniami.

#### **4. Ważniejsze publikacje**

- [1] Salwik, K., Śliwczyński, Ł., Krehlik, P., Kołodziej, J. (2021). Optimization of time and frequency fiber-optic links exploiting bi-directional amplifiers, based on real-time performance measurement. *Opt. Fiber Technol.*, 62, 102465, 1-6.
- [2] Salwik, K., Śliwczyński, Ł., Krehlik, P. (2018). Monitoring of phase jitter in fibre optic time and frequency transfer systems. *Metrol. Meas. Syst.*, 25(3), 487-497. DOI: 10.24425/123900.
- [3] Salwik, K., Śliwczyński, Ł., Krehlik, P. (2022). Detection of Stimulated Brillouin Scattering in Bi-directional Fiber-optic Links. *2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*, Paryż, Francja, 1-2.
- [4] Salwik, K., Śliwczyński, Ł., Krehlik, P., Kołodziej, J. (2018). On-line optimization of time and frequency fiber optic links exploiting bi-directional amplifiers. *2018 European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 152-154.
- [5] Salwik, K., Śliwczyński, Ł., Krehlik, P. (2017). Modeling of Brillouin scattering in long-distance fiber optic links with bidirectional optical amplifiers. *Proc. SPIE 10445, Photonics applications in astronomy, communications, industry, and high-energy physics experiments 2017*, Wilga, Polska, 104450F, 1-8.