

Wrocław, 09.10.2023

Prof. dr hab. inż. Sławomir Sujecki  
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki  
Politechnika Wrocławska

### Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta Krzysztofa Cybulskiego

#### Analiza właściwości nieliniowego przyciągania polaryzacji jako narzędzia do kontroli polaryzacji sygnału w światłowodowych systemach transmisyjnych

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

W pracy sformułowano następującą **tezę**: Możliwe jest wykorzystanie rozpraszania Ramana we włóknie światłowodowym do uzyskania kontroli polaryzacji i wzmocnienia sygnału optycznego w systemie transmisji optycznej.

Natomiast **cele pracy** są sformułowane następująco:

- Określenie zależności efektywności zjawiska czysto-optycznego przyciągania polaryzacji i wzmocnienia fali optycznej od mocy fali pompującej oraz współczynnika nieliniowości światłowodu
- Określenie zależności efektywności zjawiska nieliniowego przyciągania polaryzacji oraz wzmocnienia fali optycznej od efektu wyczerpania mocy fali pompującej
- Eksperymentalna weryfikacja przydatności nieliniowego przyciągania polaryzacji do uzyskania automatycznego dopasowania polaryzacji sygnału użytkowego na wejściu odbiornika w systemie transmisyjnym z detekcją koherentną.

Cele i teza rozprawy zostały sformułowane jasno.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

W spisie literatury autor rozprawy powołał się na 99 pozycji przy czym około 35 razy odniósł się do wiodących czasopism naukowych z zakresu telekomunikacji optycznej, t.j. Journal of Lightwave Technology, IEEE Photonics Technology Letters, Optics Express. Ponadto spis literatury zawiera odnośniki do wiodących konferencji naukowych z zakresu telekomunikacji światłowodowej, t.j. CLEO, ECOC, OFC i książek. Stwierdzam zatem, że w mojej opinii analiza źródeł została przeprowadzona w sposób właściwy i stanowi wierne odwzorowanie obecnego stanu wiedzy w zakresie rozważanej tematyki. Jedyna uwaga jaką mam odnośnie analizy źródeł to odnośniki 32 i 36 w bibliografii wydają się nie być kompletne. Brakuje najprawdopodobniej nazwy czasopisma.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Na podstawie wyprowadzonych równań autor przygotował w środowisku VPI Photonics przy wykorzystaniu VPItransmissionMaker Optical Systems oprogramowanie do analizy stanu polaryzacji sygnału optycznego we włóknie światłowodowym z uwzględnieniem zjawiska nieliniowego przyciągania polaryzacji. Następnie przy pomocy opracowanego oprogramowania dokonał analizy zależności stanu polaryzacji sygnału od mocy pompy długości światłowodu, współczynnika dyspersji polaryzacyjnej oraz właściwości nieliniowych światłowodu, a w szczególności parametru nieliniowości  $\gamma$ . Następnie zestawił stanowisko pomiarowe do eksperymentalnej weryfikacji wyników uzyskanych przy pomocy opracowanego pakietu oprogramowania i dokonał weryfikacji eksperymentalnej wyników uzyskanych w wyniku obliczeń numerycznych. W ostatniej części pracy autor przeprowadził analizę zastosowania atraktora polaryzacji do kontroli polaryzacji sygnału użytecznego w systemie transmisji światłowodowej z detekcją koherentną. Według mojej opinii autor rozwiązał postawione zagadnienia i poprawnie dobrał metody zaś przyjęte założenia są uzasadnione.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy polega na opracowaniu oprogramowania do analizy zjawiska przyciągania polaryzacji światłowodem telekomunikacyjnym i samodzielnym opracowaniu stanowiska pomiarowego do eksperymentalnej weryfikacji wyników uzyskanych za pomocą metod numerycznych. W szczególności autor dokonał kompleksowej zarówno teoretycznej jak i eksperymentalnej analizy zjawisk przyciągania polaryzacji i wzmocnienia optycznego, które występują we włóknie światłowodowym jako konsekwencja wymuszonego rozpraszania Ramana. W przypadku badań teoretycznych analizę przeprowadzono dla wybranych parametrów włókna światłowodowego, tj. stopień nieliniowości i dwójłomności oraz długość odcinka światłowodu, a także mocy oraz stanu polaryzacji fali pompującej oraz wzmacnianej. O oryginalności pracy świadczą również badania laboratoryjne. Badanie laboratoryjne zjawiska przyciągania polaryzacji przeprowadzono dla typowego światłowodu stosowanego w telekomunikacji (G.652.D). Pomiary wykonano dla różnych wartości mocy pompy oraz stanów polaryzacji fali pompującej. Rezultaty pracy są unikalne, ze względu na fakt, iż podobne analizy dostępne w literaturze dokonano jedynie dla wysoko nieliniowych włókien światłowodowych bez rozróżniania stanów polaryzacji fali pompującej.

Ponadto autor zaproponował teoretyczną analizę możliwości wykorzystania nieliniowego przyciągania polaryzacji do uzyskania jednoczesnej kontroli polaryzacji i wzmocnienia optycznego sygnału w systemie transmisyjnym z detekcją koherentną. Podejście to, wcześniej nie prezentowane w literaturze, umożliwia redukcję złożoności systemu telekomunikacyjnego poprzez usunięcie wzmacniaczy

}}

optycznych z toru oraz uproszczenie konstrukcji odbiornika koherentnego, przy jednoczesnym zachowaniu odporności systemu na losowe zmiany polaryzacji sygnału powstałe wskutek transmisji w linii światłowodowej.

Podsumowując stwierdzam, że uzyskane wyniki nie odbiegają od wyników i poziomu techniki prezentowanych w dostępnych czasopismach i materiałach konferencyjnych.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

W mojej opinii autor wykazał się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Rysunki, które prezentują wyniki są wykonane starannie. W mojej opinii doktorant poprawnie wykorzystał tabele i różne rodzaje wykresów w celu poparcia wniosków. Niemniej jednak w kilku miejscach trudno jest zrozumieć tekst lub rysunki. Na przykład, na stronie 14stej cele są sformułowane w sposób zawyły. W mojej opinii można to uprościć. Na rysunku 5.4 trudno jest zrozumieć jak tor światłowodowy połączony jest z torem pomiarowym. Czy brakuje jakiejś linii na tym rysunku? Pozostały też w tekście tzw. literówki. We wzorze (40) występuje  $A_{eff}$  a powinno być  $A_{eff}$ . Ponadto w rozdziale czwartym autor mógł szerzej opisać metody numeryczne zastosowane do rozwiązania równań 48 i 49. Nie podano na przykład metody numerycznej wykorzystanej do obliczenia rozwiązań równań 48 i 49. W rozdziale siódmym zamieszczono bezpośrednio schematy zaczerpnięte ze środowiska obliczeniowego firmy VPI Photonics. Dla osoby, która nie posługuje się tym pakietem oprogramowania interpretacja wszystkich elementów schematu nie jest oczywista. To z kolei utrudnia zrozumienie zastosowanych metod obliczeniowych i w konsekwencji prezentowanych wyników.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych?

W ramach przeprowadzonych badań opracowano oprogramowanie do numerycznej analizy zjawiska przyciągania polaryzacji w światłowodach telekomunikacyjnych. Wyniki uzyskane przy zastosowaniu metod numerycznych zostały zweryfikowane eksperymentalnie. Autor także wyznaczył zakres parametrów pracy układu do automatycznego dopasowania polaryzacji na wejściu odbiornika z detekcją koherentną światłowodowego systemu telekomunikacyjnego. Wyznaczony zakres parametrów pracy układu może zostać użyty do praktycznej realizacji koherentnego odbiornika, który wykorzystuje zjawisko przyciągania polaryzacji i zastosowania takiego odbiornika w systemach telekomunikacji światłowodowej.

Biorąc pod uwagę przedstawioną przez Doktoranta rozprawę stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego wnoszę o przyjęcie niniejszej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Roberta Krzysztofa Cybulskiego do publicznej obrony.

Stawomir Ligeza

