

## Zastosowanie programu OptiSystem w modelowaniu oraz prezentacji właściwości układów i systemów światłowodowych

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wykorzystanie programu OptiSystem w nauczaniu techniki światłowodowej. Główny nacisk położono na zastosowanie programu w projektowaniu i modelowaniu właściwości układów transmisji cyfrowej o określonej przepływności. Ocenę przydatności i możliwości programu przeprowadzono w oparciu o literaturowe obliczeniowe zagadnienie problemowe. W celu rozwiązania i analizy tego zagadnienia na drodze symulacji komputerowych zaproponowano określony układ połączeniowy.

**Abstract.** The paper presents the use of the OptiSystem program in teaching optical fiber technology. The main emphasis was placed on the application of the program in designing and modeling the properties of digital transmission systems with a specific bit rate. The evaluation of the usefulness and possibilities of the program was carried out on the basis of some computational problem from the literature. In order to solve and analyze this problem by means of computer simulations, a specific connection system has been proposed.

**(Appliance of the OptiSystem program in modeling and presentation of the properties of optical fiber systems).**

**Słowa kluczowe:** OptiSystem, układy i systemy światłowodowe, symulacje, dydaktyka.

**Keywords:** OptiSystem, fiber optic systems, simulations, didactics.

### Wprowadzenie

Telekomunikacja światłowodowa lub szerzej fotonika, to jeden z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów nauki i techniki. Rozwój tego interdyscyplinarnego obszaru jest intensyfikowany przede wszystkim poprzez liczne badania eksperymentalne prowadzone w laboratoriach. Jednakże, niejednokrotnie jest on także wspomagany poprzez specjalistyczne narzędzia typu CAD (*Computer Aided Design*).

W literaturze wiele prac poświęconych jest problematyce nauczania na uczelniach technicznych, np. w obszarze szeroko rozumianej elektroniki [1-4]. W pracach tych przedstawiane są m.in. metody nauczania, ćwiczenia wykonywane na zajęciach, a także wykorzystywane narzędzia, np. dydaktyczne stanowiska laboratoryjne oraz specjalistyczne oprogramowanie komputerowe.

Wśród narzędzi typu CAD dedykowanych fotonice można wymienić takie programy jak pakiet Photonic System Tools, obejmujący programy OptSim oraz ModeSYS, oferowany przez firmę Synopsys [5] lub pakiet dziewięciu programów oferowanych przez firmę VPIphotonics [6] pozwalających na automatyzację projektowania układów fonicznych, określaną jako PDA (*Photonic Design Automation*). Z kolei, firma Cadence na własnej stronie internetowej informuje, iż prowadzi prace nad środowiskiem dedykowanym aplikacjom fonicznym typu EPDA (*Electronic/PDA*) [7].

Jednym z programów CAD/PDA z obszaru techniki światłowodowej jest także program OptiSystem oferowany od 2000 roku przez firmę Optiwave, od marca 2020 roku w wersji 17.0 [8]. Bazując na informacjach podawanych na stronie internetowej producenta tego oprogramowania w latach 2000-2019 program OptiSystem wykorzystano w ponad tysiącu ośmiuset pracach naukowych opublikowanych na konferencjach lub w czasopiśmie naukowych. W bazie ScienceDirect [9] można odnaleźć ponad czterdzieści artykułów naukowych opublikowanych w roku 2020, w których wykorzystywano program OptiSystem. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury należy stwierdzić, iż prace polskich naukowców wykorzystujących rozważany program są nieliczne.

Funkcjonujące w Uniwersytecie Morskim w Gdyni Laboratorium Optoelektroniki, Fotowoltaiki i Techniki Światłowodowej dysponuje programem OptiSystem w wersji 14.2. Program ten jest wykorzystywany w uczelni w procesie dydaktycznym na kursie magisterskim na kierunku

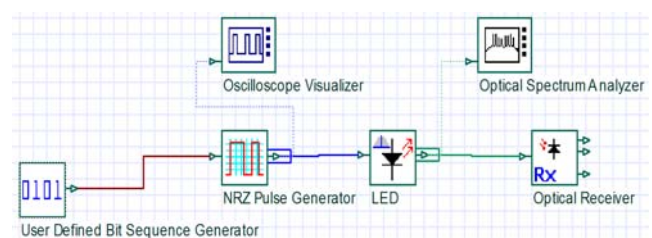
Elektronika i Telekomunikacja dla potrzeb nauczania o układach i systemach światłowodowych. Zdaniem autorów podstawową zaletą dysponowania tego typu oprogramowaniem w dydaktyce jest możliwość nauczania o właściwościach układów i systemów optycznej transmisji cyfrowej, w tym w szczególności projektowania, a następnie sprawdzenia działania tych układów bez konieczności dysponowania w laboratorium rzeczywistymi układami transmisyjnymi i narzędziami pomiarowymi.

W niniejszej pracy podjęto próbę zilustrowania wybranych możliwości programu OptiSystem i jego przydatności w procesie dydaktycznym w obszarze techniki światłowodowej.

### Opis programu OptiSystem

Program OptiSystem jest narzędziem umożliwiającym modelowanie obiektowe, tj. z wykorzystaniem obiektów reprezentujących określone modele komponentów stosowanych w technice światłowodowej, zawartych w bibliotekach programu, i modelowanie skryptowe (z użyciem języka Visual Basic) pozwalające m.in. na deklarowanie nowych zmiennych projektowanego układu oraz tworzenie nowych funkcji obliczeniowych z użyciem parametrów układu. Należy zaznaczyć, iż niniejsza praca dotyczy modelowania obiektowego.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy układ nadawczo-odbiorczy utworzony w programie OptiSystem. Jak można zauważyć na rysunku, linie sygnałowe łączące poszczególne zaciski użytych obiektów (komponentów) składających się na tor sygnałowy posiadają różne kolory: czerwony – linie sygnałów elektrycznych binarnych, niebieski – linie sygnałów elektrycznych analogowych, zielony – linie sygnałów optycznych. Komponenty posiadające funkcje narzędzi pomiarowych podłączone są do toru sygnałowego za pomocą linii przerywanych.



Rys. 1. Przykładowy schemat blokowy układu nadawczo-odbiorczego

Spektrum projektów, które można realizować w rozważanym programie obejmuje zarówno sieci optyczne z transmisją sygnałów analogowych, jaki i sieci z transmisją sygnałów cyfrowych, w tym m.in. systemy DWDM, OTDM, OFDM, SDH, OCDMA, PON oraz FSO. Automatyzacja projektowania pozwala na przykład na automatyczne łączenie komponentów przy umieszczaniu ich w szablonie edycyjnym lub automatyczne obliczenia określonych parametrów modelowanego układu zdefiniowanych przez podłączone w układzie narzędzia pomiarowe.

OptiSystem zawiera wiele bibliotek obejmujących modele różnorodnych komponentów elektrycznych, optoelektrycznych oraz optycznych, dedykowanych dla torów nadawczych, odbiorczych oraz torów transmisyjnych. Oprócz komponentów dedykowanych do tworzenia układów lub systemów, rozważane oprogramowanie posiada biblioteki narzędzi pomiarowych definiujących jakie parametry układu będą obliczone i służących do wizualizacji wyników obliczeń. Przykładowymi narzędziami są: analizator tzw. diagramu „oka” (*eye diagram*), analizator elementowej bitowej stopy błędu BER (*Bit Error Rate*), analizator polaryzacji oraz analizator widma optycznego OSA (*Optical Spectrum Analyzer*).

Różnorodność dostępnych bibliotek z punktu nauczania jest szczególnie cenna, gdyż pozwala zapoznać się studentom z bardzo szeroką gamą komponentów z obszaru techniki światłowodowej, ich parametrami oraz zastosowaniem w układach i systemach światłowodowych, a z którymi w formacie praktycznym w trakcie zajęć laboratoryjnych niejednokrotnie nie mają możliwości się zetknąć (ze względu na znaczny koszt zakupu tych urządzeń oraz ograniczoną bazę lokalową).

Istotny wpływ na szybkość i dokładność wykonywanych w programie OptiSystem obliczeń oraz wymaganą pamięć używaną podczas obliczeń mają tzw. parametry globalne. Parametry te należy deklorować osobno dla każdego analizowanego układu. Na rysunku 2 przedstawiono fragment okna dialogowego zawierającego tabelę parametrów globalnych (z aktywną zakładką dotyczącą opcji symulacji). Jak widać na rysunku, parametry podzielono łącznie na pięć grup (zakładek). Pierwsza zakładka zawiera podstawowe ustawienia (parametry), do których należy m.in. wartość szybkości transmisji bitów (przepływności) – *bit rate*, czas okna, podczas którego symulator dokonuje próbkowania danych (sygnałów) – *time window*, długość transmitowanej sekwencji bitów – *sequence length*, liczba próbek na bit – *samples per bit* oraz częstotliwość próbkowania – *sample rate*. Wymienione parametry są ze sobą powiązane zgodnie z trzema kolejnymi relacjami: *time window = sequence length / bit rate*; *number of samples = sequence length x samples per bit*; *sample rate = number of sample / time window*.

Simulation			
Signals   Spatial effects   Noise   Signal tracing			
Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	10e+006	bit/s	Normal
Time window	51.2e-006	s	Normal
Sample rate	640e+006	Hz	Normal
Sequence length	512	bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Guard Bits	0		Normal
Symbol rate	10e+006	symbols/s	Normal
Number of samples	32768		Normal

Rys. 2. Parametry globalne dotyczące symulacji

Warto dodać, że na przykład długość sekwencji zależy od typu symulowanego układu, a dokładniej problemu, który jest analizowany. Przykładowo, dla oceny poziomu BER lub uzyskaniu diagramu „oka” należy stosować dłuższe sekwencje, natomiast przy badaniu efektów optycznych, np. dyspersji, sekwencje bitów mogą być krótkie. Pozostałe

cztery zakładki dotyczą m.in. takich ustawień jak określenie liczby iteracji obliczeń (zakładka *Signals*), ustalanie wymiarów powierzchni przy analizie efektów przestrzennych propagowanej wiązki optycznej (zakładka *Spatial effects*), określenia sposobu uwzględniania szumu w analizie, tj. jego próbkowania lub nie (zakładka *Noise*) oraz ustalenia sposobów prezentacji uzyskiwanych wyników obliczeń, np. jednostki mocy (zakładka *Signal tracing*).

## Rozwiązanie symulacyjne wybranego zagadnienia literaturowego

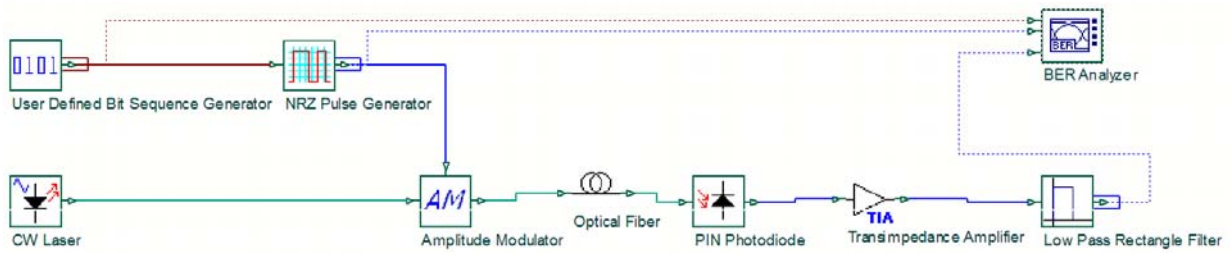
W niniejszym rozdziale zaprezentowano zagadnienie powiązane z projektowaniem układów światłowodowych. Dotyczy ono opracowania układu nadawczo-odbiorczego zapewniającego określoną przepływność oraz elementową bitową stopę błędu. Zagadnienie to zaczerpnięto z pracy [10].

**Zagadnienie, część nr 1:** System bez zniekształceń międzysymbolowych pracuje w temperaturze 300 K na długości fali optycznej równej 1300 nm z binarną impulsową modulacją amplitudy o szybkości transmisji wynoszącej 10 Mb/s. Fotodiody zastosowana w fotodiodniku posiada sprawność kwantową równą 0,9 oraz prąd ciemny o wartości równej 1 nA. Rezystancja polaryzacji i obciążenia fotodiody jest równa 1,5 MΩ. Transkonduktancja wejściowego tranzystora wzmacniacza odbiorczego wynosi 5000 μS. Funkcja transmitancji wzmacniacza wejściowego jest niezależna od częstotliwości, a jego rezystancja jest równa 3 MΩ. W torze odbiorczym zastosowano filtr o prostokątnej odpowiedzi impulsowej. Dla rozważanego systemu należy wyznaczyć moc optyczną sygnału wejściowego padającego na fotodiodę, zapewniającą prawdopodobieństwo błędnego bitu  $P_e$  wynoszące  $1 \cdot 10^{-9}$ . W systemie występują szumy termiczne.

**Zagadnienie, część nr 2:** Dla układu z części nr 1 należy określić prawdopodobieństwo błędnego bitu przy wzroście szybkości transmisji do wartości równej 144 Mb/s przy zachowaniu obliczonej wartości mocy optycznej fotoemitera oraz wyznaczyć pożądaną moc sygnału optycznego, zapewniającą prawdopodobieństwo  $P_e = 1 \cdot 10^{-9}$ .

W rozważanej pracy zaprezentowano matematyczne rozwiązanie zagadnienia. W przypadku części pierwszej, wartość mocy optycznej zapewniająca założone prawdopodobieństwo błędnego bitu wynosi 3,76 nW, z kolei w przypadku drugiej części zagadnienia wartość  $P_e$  wynosi  $7,23 \cdot 10^{-2}$ , natomiast wartość mocy sygnału dla wymaganego  $P_e = 1 \cdot 10^{-9}$  równa jest około 14,27 nW. Należy zaznaczyć, iż podane moce dotyczą przedziału symbolowego odpowiadającego logicznej jedynce.

Matematyczne rozwiązanie problemu w [10] polega m.in. na wyznaczaniu wartości wielkości, które nie mają swoich bezpośrednich analogów w parametrach modeli obiektów dostępnych w programie OptiSystem. Zatem, w celu rozwiązania rozważanego zagadnienia w omawianym programie należy wybrać i użyć komponenty, których parametry można ustalić bazując na podanych danych. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy opracowanego układu. Utworzony w oprogramowaniu tor symulacyjny składa się z następujących obiektów: generator sekwencji bitów, generator impulsów NRZ (*Non Return to Zero*), optyczny modulator amplitudy, laser półprzewodnikowy o pracy ciągłej, światłowod, fotodiody PiN, wzmacniacz transimpedancyjny oraz filtr sygnałowy o prostokątnej odpowiedzi impulsowej. Jedynym narzędziem pomiarowym w rozpatrywanym przypadku jest analizator BER.



Rys. 3. Schemat blokowy modelowanego układu

Dla obu części analizowanego problemu długość sekwencji bitów ustalono na 512 bitów, natomiast wartość liczby próbek na bit równa jest 64. Należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór długości sekwencji, gdyż mniejsza ilość bitów testowych powodować może, iż wyniki symulacji będą miały losowy charakter, a z kolei większa długość zwiększa okno czasowe symulacji i czas obliczeń. Liczba próbek na bit jest również istotna, gdyż zbyt mała częstotliwość próbkowania może przełożyć się na niewielką dokładność obliczeń.

Wybór emitera sygnału optycznego w postaci diody laserowej podyktowany jest długością fali optycznej, na której pracuje system (zapewnia wąskie widmo sygnału optycznego, co ogranicza wystąpienie zjawiska dyspersji) oraz możliwością określenia konkretnej wartości mocy optycznej. Przyjęto, iż symulacje dla części pierwszej problemu będą wykonywane w trybie „sweep” (przemiatania), co pozwala na obliczenia dla różnych wartości mocy z wybranego przedziału wartości. W niniejszym przypadku przyjęto przedział mocy optycznej lasera w zakresie od 1 nW do 5 nW z krokiem równym w przybliżeniu około 0,21 nW (w efekcie program wykona dwadzieścia iteracji obliczeniowych).

W przypadku generatora sekwencji bitów ustalono generację ciągu o postaci 0101101110 z szybkością określoną parametrem globalnym *bit rate*. Zadeklarowana sekwencja bitów wyzwala generator kodu NRZ, który następnie z wykorzystaniem modulatora amplitudy, moduluje sygnał optyczny wytwarzany przez diodę laserową. W modulatorze amplitudy możliwe jest określenie współczynnika głębokości modulacji. Na potrzeby analizy ustalono, iż głębokość modulacji jest równa 100%.

W treści rozważanego problemu nie określono typu i parametrów włókna światłowodowego. Przyjęto zatem, iż medium transmisyjnym jest bezstratne włókno światłowodowe, w którym nie występują efekty związane m.in. z dyspersją, polaryzacją oraz zjawiskami nieliniowymi. W tym celu wyzerowano parametry użytego obiektu. Zamiennie, w celu uzyskania idealnego medium transmisyjnego możliwe jest także bezpośrednie połączenie wyjścia modulatora amplitudy z wejściem fotodiody.

W projekcie przyjęto, iż do detekcji sygnału optycznego wykorzystana będzie dioda typu PiN. Wybór taki jest podyktowany m.in. brakiem w treści zagadnienia parametrów, które wskazywałyby na zastosowanie diody lawinowej. Do parametrów wybranej fotodiody, które dla rozważanego przypadku należy określić w programie należy czułość prądowa (równa 0,948 A/W), prąd ciemny oraz widmowa gęstość mocy szumów termicznych wyrażona w  $[A/Hz^{1/2}]$ . Gęstość widmową mocy szumów cieplnych można wyznaczyć znając rezystancję fotodiody [10-12]. Na rysunku 4a przedstawiono przyjęte ustawienia wartości parametrów modelu fotodiody związane z szumami. Jak widać, wartość prądu ciemnego jest równa 1 nA, wartość widmowej gęstości szumów cieplnych zdefiniowana jako stała jest równa  $74,297 \cdot 10^{-15} A/Hz^{1/2}$ .

Ponieważ w zagadnieniu nie są rozważane szumy wybuchowe w ustawieniach modelu są one wyłączone.

Komponentem wzmacniającym zastosowanym w symulacjach jest wzmacniacz transimpedancyjny (TIA – *transimpedance amplifier*). Wybór ten jest podyktowany popularnością tego typu wzmacniaczy w torach wejściowych odbiorników światłowodowych [12]. Właściwości takiego wzmacniacza w programie wyznaczone są w dwojaki sposób: tryb *user defined* - w oparciu o podaną wartość transimpedancji lub tryb *calculated* - w oparciu o rezystancję sprzężenia zwrotnego, wzmocnienie napięciowe otwartej pętli sprzężenia i pojemność wejściową. Przy konfiguracji tego obiektu zdecydowano się na tryb pierwszy. Przyjęto, iż analogiem transimpedancji wzmacniacza jest odwrotność transkonduktancji tranzystora w stopniu wejściowym TIA. Ponadto, zgodnie z pracami [10-12] stopień wejściowy wzmacniacza wpływa na gęstość widmową szumów termicznych wzmacniacza. Decydującą rolę odgrywa w tym przypadku transkonduktancja tranzystora wejściowego oraz rezystancja wejściowa wzmacniacza. Na rysunku 4b pokazano wybrane ustawienia TIA. Jak widać transimpedancja jest równa 200  $\Omega$ , wyznaczona wartość widmowej gęstości mocy szumów cieplnych wzmacniacza jest równa  $0,429 \cdot 10^{-15} A/Hz^{1/2}$ , natomiast odpowiedź częstotliwościowa wzmacniacza jest idealna.

a)

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Dark current	1	nA	Normal
<input type="checkbox"/>	Noise calculation type	Numerical		Normal
<input type="checkbox"/>	Noise bandwidth source	Use sample rate		Normal
<input type="checkbox"/>	Add signal-ASE noise	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Add ASE-ASE noise	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<b>Thermal noise</b>				
<input type="checkbox"/>	Add thermal noise	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Bandwidth (Thermal)	Bit rate	5 Hz	Script
<input type="checkbox"/>	Thermal noise calculation	Defined		Normal
<input type="checkbox"/>	Thermal power density	$74.29699999999997e-015$	A/Hz <sup>0.5</sup>	Normal
<input type="checkbox"/>	Absolute temperature	298	K	Normal
<input type="checkbox"/>	Load resistance	50	Ohm	Normal
<b>Shot noise</b>				
<input type="checkbox"/>	Add shot noise	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Bandwidth (Shot)	Bit rate	5 Hz	Script
<input type="checkbox"/>	Shot noise distribution	Gaussian		Normal
<input type="checkbox"/>	Time interval points	None		Normal

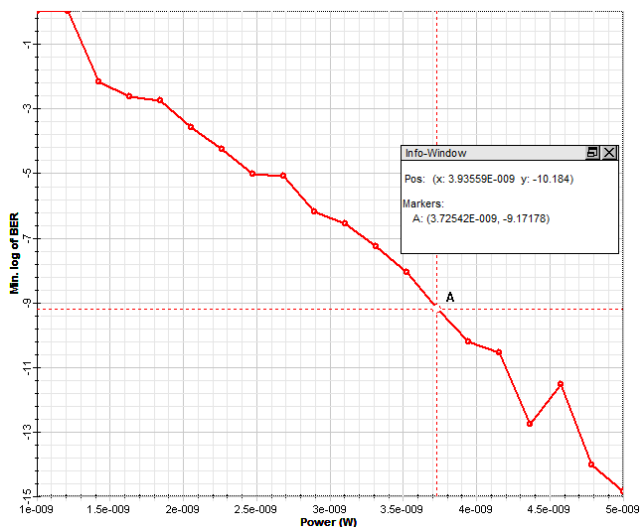
b)

Disp	Name	Value	Units	Mode
<b>Amplifier characteristics</b>				
<input type="checkbox"/>	Transimpedance calculation	User-defined		Normal
<input type="checkbox"/>	Transimpedance	200	Ohm	Normal
<input type="checkbox"/>	Open loop voltage gain	600	Ohm	Normal
<input type="checkbox"/>	Total input capacitance	3	pF	Normal
<input type="checkbox"/>	Feedback resistance	$0.01e+006$	Ohm	Normal
<b>Noise characteristics</b>				
<input type="checkbox"/>	Include noise	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Noise equivalent bandwidth	$10e+006$	Hz	Normal
<input type="checkbox"/>	Noise figure	3	dB	Normal
<input type="checkbox"/>	Absolute temperature	300	K	Normal
<input type="checkbox"/>	Noise calculation method	User-defined		Normal
<input type="checkbox"/>	Input noise density	$0.4284999999999999e-015$	A/Hz <sup>0.5</sup>	Normal
<input type="checkbox"/>	Add noise to signal	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<b>Frequency response characteristics</b>				
<input type="checkbox"/>	Transfer function model	Ideal		Normal

Rys. 4. Okna parametrów: a) fotodiody PiN, b) wzmacniacza transimpedancyjnego

Filtr dolnoprzepustowy umiejscowiony na schemacie blokowym jako obiekt wyjściowy symulowanego toru filtruje sygnał użyteczny do górnej częstotliwości granicznej *cutoff frequency* proporcjonalnej do szybkości transmisji. Sygnał z filtru podawany jest do analizatora BER, który wyznacza elementową stopę błędu bitu. Umożliwia on także wyznaczenie współczynnika Q reprezentującego elektryczną miarę stosunku sygnału do szumu oraz wyświetla i wyznacza parametry diagramu oka. Blok BER posiada trzy wejścia. Do pierwszego z nich należy podać nadawany sygnał binarny, do drugiego wejścia podawany jest referencyjny sygnał elektryczny, np. sterujący nadajnikiem optycznym, natomiast do trzeciego wejścia podawany jest sygnał elektryczny uzyskiwany po detekcji w odbiorniku.

Na rysunku 5 w postaci wykresu zależności  $\log(\text{BER})$  od mocy optycznej lasera przedstawiono rezultat obliczeń uzyskanych w programie OptiSystem dla pierwszej części zagadnienia. Punkty na charakterystyce reprezentują wartości obliczone dla poszczególnych iteracji. Jak wynika z koordynatów markera A zaznaczonego na rysunku, prawdopodobieństwo błędu bitowego na danym poziomie uzyskuje się dla mocy optycznej równej około 3,72 nW. Różnica pomiędzy uzyskaną wartością, a wartością literaturową wynosi zaledwie 0,04 nW.

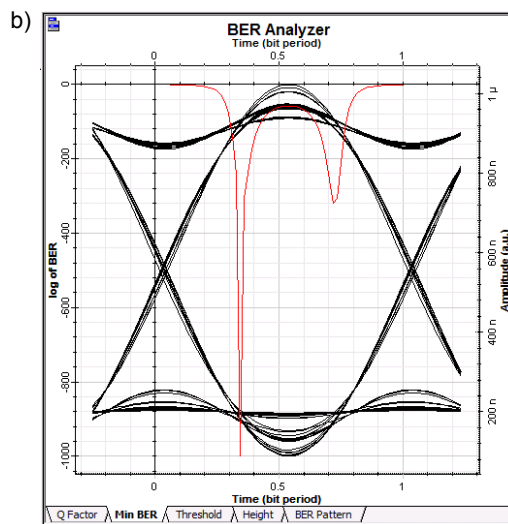
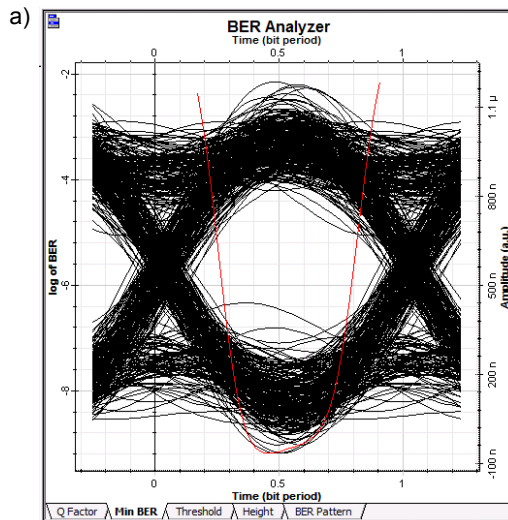


Rys. 5. Obliczona logarytmiczna zależność prawdopodobieństwa elementowego błędu bitowego od mocy optycznej diody laserowej dla szybkości transmisji 10 Mb/s

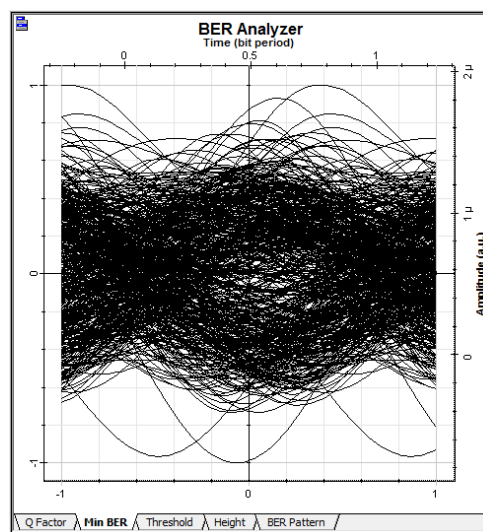
Z kolei, na rysunku 6 pokazano dwa diagramy oka. Czytelność diagramu oka jest miarą jakości transmisji prowadzonej w torze światłowodowym. Pierwszy z nich – rysunek 6a, uzyskano dla transmisji z szumami, natomiast drugi – rysunek 6b, z ich pominięciem w obliczeniach. Jak widać, szumy mogą znacząco zdegradować jakość transmisji, co objawia się m.in. rozmyciem diagramu, zmniejszeniem jego współczynnika otwarcia oraz wzrostem odchyłeń standardowych poziomów logicznego zera i logicznej jedynki. Ponadto, w diagramy oka rysowane są także obliczone wartości  $\log(\text{BER})$  – krzywe w kolorze czerwonym, przypadające na jeden przedział symbolowy. Na rysunkach widoczny jest charakterystyczny silny wzrost  $\log(\text{BER})$  na krańcach przedziału symbolowego, gdzie typowo dochodzi do interferencji międzysymbolowych i błędnej detekcji informacji binarnej.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, iż zwiększenie szybkości transmisji sygnału z 10 Mb/s do 144 Mb/s przy zachowaniu wartości mocy optycznej sygnału równej 3,725 nW skutkuje silnym wzrostem BER aż do wartości równej 1.

W rozwiązaniu literaturowym dla takiej sytuacji podano wartość prawdopodobieństwa elementowego błędu bitowego równą około  $1 \cdot 10^{-1}$ . Na rysunku 7 pokazano rozmyty diagram oka występujący w rozważanym przypadku.

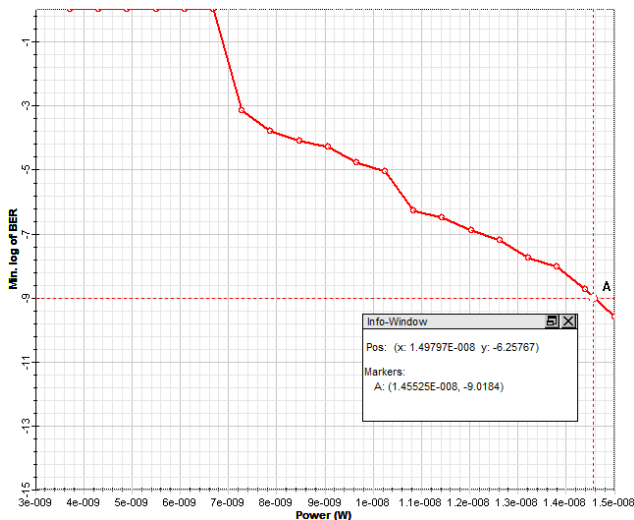


Rys. 6. Obliczone diagramy oka dla szybkości transmisji 10 Mb/s: a) z uwzględnieniem szumów, b) bez uwzględnienia szumów



Rys. 7. Rozmyty diagram oka dla BER równego 1

W celu wyznaczenia mocy sygnału optycznego zapewniającego pożądany poziom BER przy wzroście szybkości transmisji sygnału, wykonano symulacje przy przemiataniu wartości mocy diody laserowej w zakresie od 3,725 nW do 15 nW. Na rysunku 8 przedstawiono uzyskaną zależność  $\log(\text{BER})$  od mocy optycznej diody laserowej. Jak widać na rysunku, pożądane prawdopodobieństwo błędu bitowego uzyskuje się dla mocy równej 14,55 nW – marker A. Zatem, uzyskana w symulacjach wartość jest wyższa od wartości literaturowej zaledwie o 0,28 nW.



Rys. 8. Obliczona logarytmiczna zależność prawdopodobieństwa elementowego błędu bitowego od mocy optycznej diody laserowej dla szybkości transmisji 144 Mb/s

### Podsumowanie

W pracy zaprezentowano wykorzystanie i wybrane możliwości programu OptiSystem w modelowaniu układów i systemów światłowodowych. Jak wykazano na arbitralnie wybranym przykładzie literaturowego problemu obliczeniowego, rozważane oprogramowanie charakteryzuje się wysoką dokładnością obliczeń.

Jako komputerowe programowe narzędzie PDA może być ono z powodzeniem stosowane w dydaktyce na poziomie wyższych studiów technicznych, na kierunkach telekomunikacyjnych. Zdaniem autorów program OptiSystem wprowadza nową jakość w procesie kształcenia związanym z techniką światłowodową. Program ten umożliwia bez dysponowania rzeczywistymi układami transmisyjnymi zapoznanie się z szerokim spektrum układów i systemów światłowodowych oraz narzędziami pomiarowymi służącymi do oceny ich właściwości.

**Autorzy:** dr inż. Jacek Dąbrowski, mgr inż. Jakub Łaziński, Uniwersytet Morski w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: j.dabrowski@we.umg.edu.pl; jakub.lazinski81@gmail.com.

### LITERATURA

- [1] Dąbrowski A., Pawłowski P., Multiwibrator astabilny jako przykład układu tranzystorowego ze sprzężeniem zwrotnym w nauczaniu podstaw elektroniki, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr 10, 121-124.
- [2] Marciniak T., Dąbrowski A., Puchalski R., Dratwiak D., Marciniak W., Zastosowanie mikrokontrolera STM32F410 do prezentacji zagadnień cyfrowego przetwarzania sygnałów, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr 10, 118-120.
- [3] Noga K.M., Nauczanie Techniki Cyfrowej na kierunku Elektrotechnika w Uniwersytecie Morskim w Gdyni, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95(2019), nr 12, 276-281.
- [4] Dąbrowski J., Techniki szybkiego wytwarzania prototypowych obwodów drukowanych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95(2019), nr 9, 165-168.
- [5] <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-system-design-tools.html>
- [6] <https://www.vpiphotonics.com/index.php>
- [7] [https://www.cadence.com/en\\_US/home.html](https://www.cadence.com/en_US/home.html)
- [8] <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
- [9] <https://www.sciencedirect.com/>
- [10] Einarsson G., Podstawy telekomunikacji światłowodowej, *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa, 1998 (tłumaczenie, Principles of Lightwave Communications, John Wiley & Sons Ltd., 1996).
- [11] Siuzdak J., Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej, *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa, 1997.
- [12] Kolimbris H., Fiber optics communications, *Pearson Prentice Hall*, 2004.