

SŁAWOMIR ANDRZEJ TORBUS

**PROJEKTOWANIE
ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH
DLA CELÓW METROLOGICZNYCH
I ICH ZASTOSOWANIE
W CZUJNIKACH FARADAYA**

BYDGOSZCZ – 2014

Zamieszczony w opracowaniu autorski materiał ma wzbogacić wiedzę czytelnika w nowe zagadnienia związane z projektowaniem światłowodów jednomodowych oraz ich zastosowaniem w metrologii.

Zaprezentowane w publikacji wyniki badań eksperymentalnych uzyskał sam autor w ramach prac związanych z realizacją tematu Badań Statutowych Młodych pt. „*Badanie i analiza właściwości metrologicznych polarymetrycznych czujników natężenia prądu ze światłowodową cewką pomiarową*”. Pomiary i analizę wyników przeprowadzono na Wydziale Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszcy. Temat badawczy realizowano w latach 2012-2014.

Wyniki symulacji komputerowych uzyskał sam autor bądź przy pomocy dyplomanta – studenta IV roku elektrotechniki, Patryka Dutkiewicza, któremu autor składa serdeczne podziękowania za zaangażowanie w pracę oraz poświęcony czas.

Wydano na podstawie dostarczonych materiałów

Copyright © by Sławomir Andrzej Torbus

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. (052) 3749482, 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl <http://www.utp.edu.pl/~wyd>

*Moim nauczycielom
z Płońska i Bydgoszczy*

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
1. WSTĘP	9
2. TEORIA DOTYCZĄCA PROJEKTOWANIA ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH	15
3. WYNIKI SYMULACJI WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWYCH PROJEKTOWANYCH ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH	19
4. WYNIKI SYMULACJI WŁAŚCIWOŚCI PROPAGACYJNYCH I GEOMETRYCZNYCH PROJEKTOWANYCH ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH	22
5. ZASTOSOWANIE ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH W CZUJNIKACH FARADAYA I WERYFIKACJA PRZEDSTAWIONEJ METODY PROJEKTOWANIA	26
5.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA ORAZ CZUŁOŚĆ STATYCZNA BADANEGO PRZETWORNIKA	28
5.2. BŁĘDY STATYCZNE BADANEGO PRZETWORNIKA	31
5.3. FOURIEROWSKA ANALIZA SYGNAŁU OKRESOWEGO Z WYJŚCIA BADANEGO PRZETWORNIKA	33
6. ZAKOŃCZENIE	44
LITERATURA	47

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

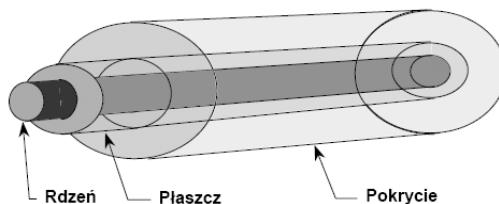
a	– promień rdzenia światłowodu, wymiar charakterystyczny profilu
a_1, a_2, a_3	– współczynniki równania Sellmeiera
b_1, b_2, b_3	– współczynniki równania Sellmeiera
B	– indukcja magnetyczna
c	– prędkość światła w próżni
f	– częstotliwość
f_s	– szybkość próbkowania
i	– wartość chwilowa natężenia prądu
I	– wartość skuteczna natężenia prądu
l	– długość pojedynczego zwoju światłowodowej cewki pomiarowej
L	– długość włókna światłowodowego, z którego nawijana jest cewka pomiarowa
LP	– mod liniowo spolaryzowany
m	– indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości
m_{e0}	– masa spoczynkowa elektronu
n	– współczynnik załamania światła w światłowodzie, indeks próbki wejściowej sygnału dyskretnego w dziedzinie czasu
n_1	– współczynnik załamania w rdzeniu
n_2	– współczynnik załamania w płaszczu
N	– liczba zwojów światłowodowej cewki pomiarowej, liczba próbek w ciągu wejściowym oraz liczba punktów w ciągu wyjściowym DFT
r	– promień, współrzędna
R	– promień znormalizowany, promień gięcia światłowodu podczas nawijania cewki pomiarowej
t	– czas
V	– stała Verdet
V_c	– częstotliwość odcięcia
$V_{c\infty}$	– częstotliwość znormalizowana

x	– stężenie molowe (ułamek molowy) domieszki germanu (GeO_2) w rdzeniu światłowodu bądź fluoru (F) w płaszczu światłowodu
α	– kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła
Δ	– względna różnica współczynników załamania, błąd bezwzględny
λ	– długość fali świetlnej
λ_c	– długość fali odcięcia
μ_0	– przenikalność magnetyczna próżni
DFT	– dyskretne przekształcenie Fouriera (ang. <i>Discrete Fourier Transform</i>)
DSF	– światłowód jednomodowy z przesuniętą dyspersją (ang. <i>Dispersion Shifted Fiber</i>)
ITU-T	– Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna (ang. <i>International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector</i>)
MMF	– światłowód wielomodowy (ang. <i>Multimode Fiber</i>)
NDSF	– światłowód jednomodowy z przesuniętą niezerową dyspersją (ang. <i>Non-zero Dispersion Shifted Fiber</i>)
SMF	– światłowód jednomodowy (ang. <i>Single Mode Fiber</i>)
THD	– współczynnik zawartości harmoniczných (ang. <i>Total Harmonic Distortion</i>)

1. WSTĘP

Fizyczny falowód optyczny (falowód włóknisty, światłowód), którego model wykorzystywany jest do matematycznej analizy transmisji fali świetlnej, jest złożony z dwóch warstw krzemionki – SiO_2 , które charakteryzują się różnymi współczynnikami załamania. Jest to więc cienkie wielowarstwowe włókno dielektryczne [1,2], którego wewnętrzną, centralnie położoną warstwę szkła zwaną jest rdzeniem i pokryta jest ściśle przylegającą warstwą szkła zwaną płaszczem. Rdzeń charakteryzuje się wyższym współczynnikiem załamania – n_1 niż warstwa otaczająca – płaszcz o współczynniku załamania – n_2 [1,3], aby na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia można realizować w nim transmisję.

We włóknach światłowodowych możemy dodatkowo wyróżnić trzecią warstwę, która stanowi powłokę ochronną nazywaną pierwotną warstwą ochronną. Nadaje ona włóknom wytrzymałość mechaniczną i stanowi ochronę przed mikropęknięciami, na które narażona jest powierzchnia włókna, zwłaszcza przy stykaniu się z innymi materiałami. Powłoka ochronna jest nakładana w czasie procesu wyciągania włókna. Włókno posiadające te trzy warstwy (rys. 1.1.) nazywane jest światłowodem włóknistym, którego łączna średnica wynosi $250\ \mu\text{m}$ [1,4]. Inne sposoby zabezpieczania włókien światłowodowych przed wpływem sił zewnętrznych i środowiska, w którym przewidywana jest jego eksploatacja, to różnego rodzaju sposoby kablowania.



Rys. 1.1. Budowa telekomunikacyjnego włókna światłowodowego

Podstawowym materiałem, z którego są wykonywane światłowody, jest syntetyczna krzemionka SiO_2 (tzw. szkło kwarcowe), która jest domieszkowana w celu otrzymania odpowiedniego współczynnika załamania. Mamy zatem domieszki takich pierwiastków jak: bor (B), fluor (F), glin (Al), fosfor (P), german (Ge), tal (Tl), i inne [2,4]. Sam bowiem kwarc, stosowany na rdzeń, charakteryzując się stosunkowo małą wartością współczynnika załamania utrudnia dobór szkieł na płaszcz. Wchodzą tutaj w grę tylko szkła typu $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ i $\text{SiO}_2\text{-F}_2$, które mogą dostarczyć materiał na płaszcz o współczynniku załamania mniejszym prawie o 1% [2,4]. Możemy też wyróżnić domieszki, które powodują zwiększenie współczynnika załamania ponad 1%. Są to: GeO_2 , P_2O_5 , TiO_2 oraz Al_2O_3 [2,4,5].

Światłowody włókniste można podzielić na wielomodowe i jednomodowe. Przez mod rozumiemy monochromatyczną wiązkę (nie falę płaską) propagującą wzdłuż falowodu z charakterystyczną dla siebie prędkością fazową, o charakterystycznym rozkładzie poprzecznym natężenia nie zmieniającym się wzdłuż kierunku propagacji. Oznacza to, że mod rozchodzi się w falowodzie bez zmiany kształtu i z charakterystyczną dla siebie prędkością [1]. W światłowodach jednomodowych

propaguje się tylko jeden mod nazywany modem podstawowym i oznaczany jako LP_{01} (HE_{11}), natomiast mody boczne są bardzo silnie tłumione. W tego typu włóknach transmisja odbywa się nie tylko wewnątrz rdzenia, ale również w części płaszczu. Natomiast w światłowodach wielomodowych propaguje wiele modów (mod podstawowy oraz mody boczne), transmisja jest realizowana jedynie w rdzeniu. Różne mody mogą różnić się kształtem rozkładu pola oraz prędkością rozchodzenia się, a więc wartością stałej propagacji [1]. Zjawisko to ma negatywny wpływ na transmisję sygnału optycznego, ponieważ powoduje występowanie wielu prędkości sygnału, co w konsekwencji wywołuje rozmycie sygnału w miarę jego propagacji falowodem [1]. Mamy z tym faktem do czynienia w światłowodach wielomodowych, co rzutuje na zmniejszenie szybkości i zasięgu transmisji. Wada ta została wyeliminowana w światłowodach jednomodowych, które zapewniają bardzo dużą szybkość oraz duży zasięg transmisji.

Światłowody wielomodowe i jednomodowe posiadają znormalizowane średnice rdzenia i płaszczu. W zależności od klasy światłowodu wynoszą one odpowiednio:

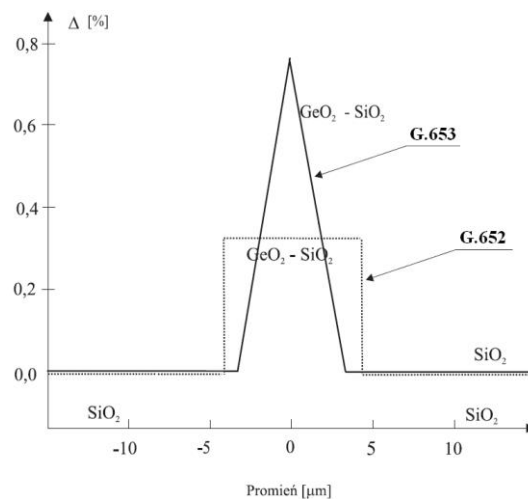
- 50 μm /125 μm albo 62,5 μm /125 μm w przypadku światłowodów wielomodowych [1];
- 5 ÷ 11 μm /125 μm w przypadku światłowodów jednomodowych [1].

W grupie światłowodów jednomodowych znaczące miejsce zajmują jednomodowe światłowody telekomunikacyjne, przez które rozumie się jednomodowe światłowody włókniste, w których długość jest znacznie większa od przekroju [10]. Niniejsze światłowody prowadzą powyżej pewnej długości fali, zwanej długością fali odcięcia λ_c , tylko hybrydowy mod podstawowy LP_{01} (HE_{11}) [11]. Są one wykonane z krzemionki SiO_2 , a najprostsze rozwiązania mają koncentryczny rdzeń i płaszcz o standardowej średnicy 125 μm . Transmisja wiązki świetlnej odbywa się w rdzeniu na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia. Oznacza to, że rdzeń ma większy współczynnik załamania od płaszczu. Nie są to jednak duże różnice, zwykle rdzeń ma współczynnik załamania większy o około 1% od płaszczu [11]. Światłowody telekomunikacyjne są włóknami o słabym prowadzeniu, ponieważ światło jest skupione nie tylko w ich rdzeniu, ale również w obszarze płaszczu tym więcej, im współczynniki załamania różnią się mniej [1,11]. Są projektowane w taki sposób, aby pozostawały jednomodowe w orientacyjnym przedziale długości fali świetlnej od 1,2 μm do 1,75 μm [1,10], gdzie tłumienność krzemionki wolnej od jonów wodorotlenkowych OH^- jest mniejsza od 0,5 dB/km.

Jednomodowe światłowody telekomunikacyjne zostały scharakteryzowane w zaleceniach Międzynarodowej Unii Telekomunikacyjnej (ITU-T) [6,7,8,9]. W światłowodzie standardowym o profilu skokowym typu G.652 średnica rdzenia zawiera się w przedziale 8 ÷ 9 μm [6]. Światłowody typu G.653 i G.655 mają rdzenie o średnicach 5 ÷ 7 μm [7,8]. Jeżeli chodzi o światłowody odporne na zginanie typu G.657 [9], to są one zgodne transmisyjnie i montażowo ze standardowymi włóknami jednomodowymi opisanymi zaleceniem G.652 [6], a co za tym idzie średnica ich rdzenia wynosi 8 ÷ 9 μm .

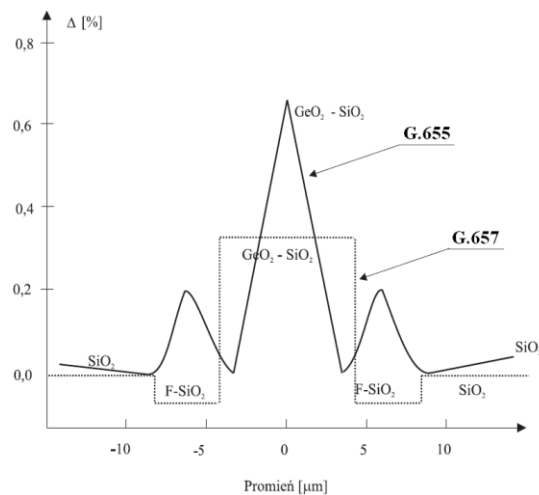
Parametry transmisyjne jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych są również ściśle określone w zaleceniach ITU-T, które oznaczone są w następujący sposób:

- zalecenie G.652 – światłowód standardowy o profilu skokowym (SMF – Single Mode Fiber) przedstawionym na rys. 1.2., zoptymalizowany na transmisję w tzw. II oknie transmisyjnym ($1,31 \mu\text{m}$) [6];
- zalecenie G.653 – światłowód o profilu trójkątnym przedstawionym na rys. 1.2., z przesuniętą charakterystyką dyspersji (DSF – Dispersion Shifted Fiber), zoptymalizowany na transmisję w tzw. III oknie transmisyjnym ($1,55 \mu\text{m}$) [7];



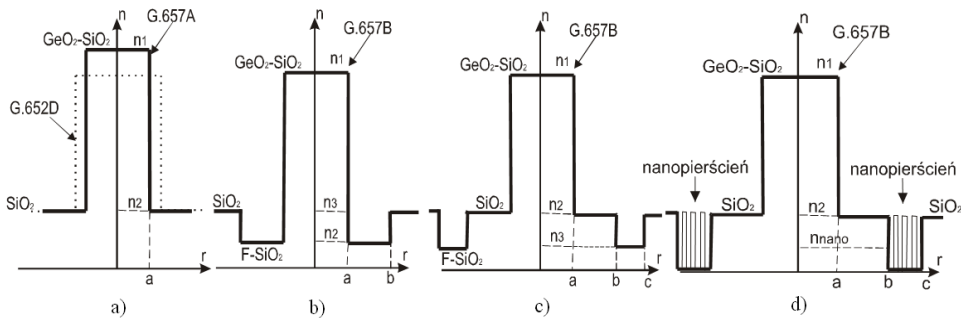
Rys. 1.2. Teoretyczne profile współczynników załamania w jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych G.652 i G.653

- zalecenie G.655 – światłowód o profilu korony przedstawionym na rys. 1.3., z niezerową przesuniętą charakterystyką dyspersji, tzw. światłowód z płaską charakterystyką dyspersji (NDSF – Non – zero Dispersion Shifted Fiber) [8];



Rys. 1.3. Teoretyczne profile współczynników załamania w jednomodowych światłowodach telekomunikacyjnych G.655 i G.657

- zalecenie G.657 – światłowody odporne na zginanie [9] o jednoskokowych profilach współczynnika załamania przedstawionym na rys. 1.4.a (dla światłowodu G.657A) oraz o wieloskokowych profilach współczynnika załamania przedstawionych na rys. 1.3 i rys. 1.4. b, c, d (dla światłowodów G.657B), które posiadają depresyjny płaszcz, płaszcz z depresyjnym pierścieniem wokół rdzenia, płaszcz z depresyjnym nanopierścieniem wokół rdzenia. Warto zaznaczyć, że są to najnowsze rodzaje jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych, do których wytwarzania wykorzystuje się nanotechnologię.



Rys. 1.4. Teoretyczne profile współczynników załamania [13]:

- a) zwiększenie $\Delta \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ i zmniejszenie promienia rdzenia – zmniejszenie pola modu,
 b) depresyjny płaszcz, c) płaszcz z depresyjnym pierścieniem wokół rdzenia,
 d) płaszcz z depresyjnym nanopierścieniem wokół rdzenia

Jak już wcześniej wspomniano światłowody telekomunikacyjne mogą mieć różne profile współczynnika załamania w rdzeniu – skokowy, gradientowy, trójkątny oraz korony. Ogólnie rzecz biorąc, profil współczynnika załamania w światłowodzie jest funkcją długości fali – $n(\lambda)$, jest to funkcja ciągła. Jej wartość maksymalna w rdzeniu jest większa niż stała wartość w płaszczu. W ogólnym przypadku profil współczynnika załamania światłowodu włóknistego o przekroju kołowym można opisać wyrażeniem [10]:

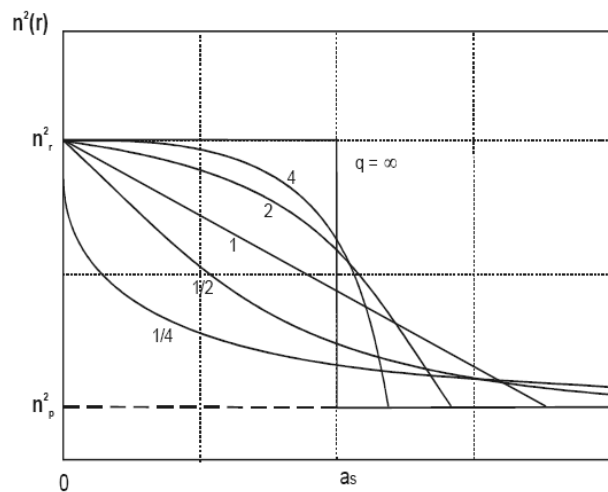
$$n^2(R) = n_1^2 \cdot [1 - 2 \cdot \Delta \cdot f(R)] \quad (1.1)$$

gdzie: $R = \frac{r}{a}$ – znormalizowany promień, a – promień rdzenia lub wymiar charakterystyczny profilu, r – odległość od środka rdzenia, n_1 – wartość współczynnika załamania w rdzeniu dla $r = 0$ – w środku rdzenia, $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2}$, n_2 – wartość współczynnika załamania w płaszczu, $f(R)$ – funkcja zmian współczynnika załamania. Jeżeli światłowód ma stałą wartość współczynnika załamania w płaszczu, to profil jego współczynnika załamania można opisać w następujący sposób [10]:

$$n^2(R) = \begin{cases} n_2^2 + (n_1^2 - n_2^2) \cdot [1 - f(R)] & \text{dla } 0 \leq R < 1 \\ n_2^2 & \text{dla } 1 \leq R < \infty \end{cases} \quad (1.2)$$

Profile współczynnika załamania można uogólnić do potęgowego [4,10], który w zależności od wartości parametru q może przechodzić w skokowy ($q \rightarrow \infty$), gradientowy ($q > 1$), trójkątny ($q = 1$), co przedstawia rys. 1.5. Profil potęgowy opisany jest następującą równością [10]:

$$n^2(R) = \begin{cases} n_1^2 \cdot (1 - 2 \cdot \Delta \cdot R^q) & \text{dla } 0 \leq R < 1 \\ n_2^2 = n_1^2 \cdot (1 - 2 \cdot \Delta) & \text{dla } 1 \leq R < \infty \end{cases} \quad (1.3)$$



Rys. 1.5. Zmiany współczynnika załamania dla profili potęgowych w zależności od współczynnika q przy założeniu równej efektywnej objętości [10]

O jednomodowości bądź wielomodowości włókna światłowodowego decyduje długość propagowanej fali świetlnej. W związku z tym, dla projektowanego włókna światłowodowego, należy określić długość fali odcięcia, którą dla światłowodów jednomodowych opisuje się wzorem [4,10]:

$$\lambda_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{V_c} \cdot NA \quad (1.4)$$

gdzie: a – promień rdzenia światłowodu lub wymiar charakterystyczny profilu [μm],

$NA = n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta} \approx n_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1}}$ – apertura numeryczna, $V_c = V_{c\infty} \cdot \sqrt{\frac{q+2}{q}}$ –
 częstotliwość znormalizowana dla profilu potęgowym o współczynniku q ,

$V_{c\infty} = 2,405$ – częstotliwość znormalizowana dla profilu skokowego (przy $q \rightarrow \infty$).

Wyróżnia się następujące przypadki [4,10]:

- propagowana fala świetlna w światłowodzie jest dłuższa od fali odcięcia ($\lambda > \lambda_c$) – znaczna część płaszcza uczestniczy w transmisji, ponieważ średnica płamki świetlnej (średnica pola modu) jest większa od średnicy rdzenia światłowodu. To zjawisko jest charakterystyczne dla transmisji jednomodowej, w rdzeniu transmitowany jest tylko jeden mod, mod podstawowy (zwyrodniały) – LP_{01} ;
- propagowana fala świetlna w światłowodzie jest równa fali odcięcia ($\lambda = \lambda_c$) – niewielka część płaszcza uczestniczy w transmisji (około 90% mocy modu podstawowego jest prowadzone w rdzeniu), średnica płamki świetlnej w przybliżeniu pokrywa się ze średnicą rdzenia światłowodu;
- propagowana fala świetlna w światłowodzie jest krótsza od fali odcięcia ($\lambda < \lambda_c$) – płaszcz nie uczestniczy w transmisji, ponieważ średnica płamki świetlnej modu podstawowego jest mniejsza od średnicy rdzenia światłowodu. To zjawisko jest charakterystyczne dla transmisji wielomodowej.

Kończąc rozważania teoretyczne dotyczące światłowodów warto zaznaczyć, że mogą być one powszechnie stosowane w metrologii jako czujniki takich wielkości jak: temperatura (specjalne światłowody jednomodowe domieszkowane neodymem albo holmem), ugięcie bądź przemieszczenie (światłowody jednomodowe) oraz natężenie prądu i pole magnetyczne (światłowody jednomodowe bądź wielomodowe).

W niniejszym opracowaniu skupiono się na światłowodach jednomodowych z uwzględnieniem znormalizowanej grupy światłowodów telekomunikacyjnych oznaczanych przez ITU-T jako G.652, G.653, G.655 i G.657, w których płaszcz wykonany jest z czystego SiO_2 , natomiast rdzeń domieszkowany jest GeO_2 (powstaje struktura SiO_2-GeO_2), ponieważ domieszka ta zwiększa współczynnik załamania, poprawia przepuszczalność IR oraz odporność chemiczną [5]. Zainteresowanie właśnie tą grupą światłowodów wynika z badań autora, zamieszczonych m.in. w pracach [12,16,17], w których wykazane zostało, że ich stosowanie w czujnikach pracujących w oparciu o magnetoptyczny efekt Faradaya, pozwala uzyskać poprawę czułości, rozszerzyć obszary zastosowań czujnika, jak również daje nowe możliwości konstrukcyjne – czujniki światłowodowe wykorzystywane w zdalnych systemach kontrolno-zabezpieczeniowych i pomiarowych mogą być bezpośrednio umieszczane na obiektach badanych, bez umieszczania ich w dodatkowej obudowie.

2. TEORIA DOTYCZĄCA PROJEKTOWANIA ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH

Analizując noty katalogowe dostępnych na rynku światłowodów jednomodowych najczęściej uzyskujemy informację na temat wartości współczynnika załamania w rdzeniu i płaszczu światłowodu, a rzadziej o stężeniu molowym domieszki germanu w rdzeniu bądź fluoru w płaszczu światłowodu. Dla projektanta światłowodowych czujników pomiarowych informacje te nie są wystarczające, ponieważ na ich podstawie nie można określić wartości stałej Verdet materiału, z którego wykonane jest włókno światłowodowe, która opisana jest wzorem [5,12]:

$$V = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m_e} \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \left| \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right| \left[\frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right] \quad (2.1)$$

gdzie: $\frac{e}{m_e}$ – ładunek właściwy elektronu ($1,75881962 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$), λ – długość fali [μm], c – prędkość światła w próżni ($c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), $\left| \frac{\partial n}{\partial \lambda} \right|$ – wartość bezwzględna zmiany współczynnika załamania względem długości fali $\left[\frac{1}{\mu\text{m}} \right]$.

W celu wyznaczenia wartości bezwzględnej współczynnika załamania, która jest czynnikiem we wzorze (2.1), w rdzeniu oraz w płaszczu światłowodu należy skorzystać z równania Sellmeiera oraz danych zamieszczonych w tablicy 2.1. (dla domieszkowanie germanem) oraz w tablicy 2.2. (dla domieszkowania fluorem) [11]:

$$n^2 = 1 + \frac{a_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2} \quad (2.2)$$

gdzie: a_i – stała, b_i – stała [μm], λ – długość fali [μm].

Tablica 2.1. Współczynniki a_i oraz b_i występujące we wzorze (2.2) dla czystej krzemionki SiO_2 oraz wybranych stężeń molowych germanu w rdzeniu światłowodu [11]

Współczynniki	0 M% czyste SiO_2	Stężenie molowe domieszki germanu w rdzeniu światłowodu			
		3,1 M%	5,8 M%	7,9 M%	13,5 M%
a_1	0,6961663	0,7028554	0,7088876	0,7136824	0,711040
a_2	0,4079426	0,4146307	0,4206803	0,4254807	0,451885
a_3	0,8974994	0,8974540	0,8956551	0,8964226	0,704048
b_1	0,0684043	0,0727723	0,0609053	0,0617167	0,064270
b_2	0,1162414	0,1143085	0,1254514	0,1270814	0,129408
b_3	9,8961610	9,8961610	9,8961620	9,8961610	9,425478

Tablica 2.2. Współczynniki a_i oraz b_i występujące we wzorze (2) dla czystej krzemionki SiO_2 oraz wybranych stężeń molowych fluoru w płaszczu światłowodu [11]

Współczynniki równania Sellmeiera	Stężenie molowe domieszki fluoru w płaszczu światłowodu		
	0 M% czyste SiO_2	1 M%	2 M%
a_1	0,6961663	0,69325	0,67744
a_2	0,4079426	0,39720	0,40101
a_3	0,8974994	0,86008	0,87193
b_1	0,0684043	0,06724	0,06135
b_2	0,1162414	0,11714	0,12030
b_3	9,8961610	9,77610	9,85630

Przy znanej wartości współczynnika załamania w rdzeniu, przy jego domieszkowaniu germanem ($\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$), dysponując danymi tabelarycznymi zamieszczonymi w tablicy 1 wyznaczono w pracy [13] wielomiany interpolacyjne Lagrange'a [14] czwartego stopnia określające współczynnik załamania rdzenia – n_1 w zależności od stężenia molowego domieszki rdzeniowej GeO_2 :

- dla tzw. II okna transmisyjnego (1,31 μm):

$$n_1(x) = 5,8732 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 1,4286 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 1,5916 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 1,4788 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,4468 \quad (2.3)$$

- gdzie: x – stężenie molowe domieszki germanu w rdzeniu światłowodu [M%];
- dla tzw. III okna transmisyjnego (1,55 μm):

$$n_1(x) = 9,1767 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 1,9836 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 1,8832 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 1,4741 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,4445 \quad (2.4)$$

gdzie: x – stężenie molowe domieszki germanu w rdzeniu światłowodu [M%].

W podobny sposób należało postępować aby określić domieszkowanie depresyjnego pierścienia fluorem (F-SiO_2). Skorzystano z danych zamieszczonych w tablicy 2.2 i wyznaczono w pracy [15] wielomiany interpolacyjne Lagrange'a [14] drugiego stopnia określające współczynnik załamania depresyjnego pierścienia domieszkowanego fluorem – n_3 , w zależności od stężenia molowego domieszki fluoru:

- dla tzw. II okna transmisyjnego (1,31 μm):

$$n_3(x) = 235,6417 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 4,9036 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,4468 \quad (2.5)$$

gdzie: x – stężenie molowe domieszki fluoru w depresyjnym pierścieniu światłowodu [M%];

- dla tzw. III okna transmisyjnego (1,55 μm):

$$n_3(x) = 221,7870 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 4,8494 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,4440 \quad (2.6)$$

gdzie: x – stężenie molowe domieszki fluoru w depresyjnym pierścieniu światłowodu [M%].

Na podstawie wzorów od (2.3) do (2.6) można określić wartość współczynnika załamania w rdzeniu oraz płaszczu jednomodowego światłowodu. Jednakże dla określenia jego właściwości metrologicznych nie jest to wystarczające, ponieważ nie umożliwia wyznaczenia pochodnej współczynnika załamania względem długości fali świetlnej, która występuje we wzorze (2.1) określającym stałą materiałową projektowanego światłowodu. Wobec powyższego koniecznym jest wyznaczenie tejże pochodnej na podstawie równania Sellmeiera (2.2).

Sposób wyznaczania stałej Verdet, opisanej wzorem (2.1), dla wybranych światłowodów jednomodowych, został przedstawiony w pracach [15,16]. Podstawą jej określenia jest posiadanie współczynników a_i i b_i równania Sellmeiera (2.2), które jedynie dla czterech wariantów stężenia molowego domieszki germanu w rdzeniu światłowodu (3,5 M%, 5,8 M%, 7,9 M% oraz 13,5 M%) oraz dla dwóch wariantów stężenia molowego domieszki fluoru w depresyjnym pierścieniu wokół rdzenia światłowodu (1 M% oraz 2 M%) zawarto w pozycji [11]. Koniecznym stała się więc interpolacja Lagrange'a [14] wyżej wymienionych współczynników na podstawie danych zawartych w tabelicy 2.1. Uzyskano następujące wyniki:

- wielomiany czwartego stopnia dla domieszkowania germanem rdzenia światłowodu:

$$a_1(x) = -2,5937 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 4,3202 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 2,1252 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 2,4787 \cdot 10^{-3} \cdot x + 6,9617 \cdot 10^{-1} \quad (2.7)$$

$$a_2(x) = 2,2256 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 3,8010 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 2,1635 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 + 1,17857 \cdot 10^{-3} \cdot x + 4,0794 \cdot 10^{-1} \quad (2.8)$$

$$a_3(x) = -3,6714 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 6,5823 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 - 3,7226 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 6,2935 \cdot 10^{-3} \cdot x + 8,9750 \cdot 10^{-1} \quad (2.9)$$

$$b_1(x) = -2,5755 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 6,8545 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 - 5,5243 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 1,2714 \cdot 10^{-2} \cdot x + 6,8404 \cdot 10^{-2} \quad (2.10)$$

$$b_2(x) = 1,8864 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 5,0896 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 4,1937 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 9,2950 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,1624 \cdot 10^{-1} \quad (2.11)$$

$$b_3(x) = -7,7743 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 1,3060 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 - 6,8636 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 1,1042 \cdot 10^{-2} \cdot x + 9,8962 \quad (2.12)$$

- gdzie: x – stężenie molowe domieszki germanu w rdzeniu światłowodu [M%];
- wielomiany drugiego stopnia dla domieszkowania fluorem depresyjnego pierścienia wokół rdzenia światłowodu odpornego na zginanie:

$$a_1(x) = -6,4469 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 3,5305 \cdot 10^{-3} \cdot x + 696,1663 \cdot 10^{-3} \quad (2.13)$$

$$a_2(x) = 7,2763 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 18,0189 \cdot 10^{-3} \cdot x + 407,9426 \cdot 10^{-3} \quad (2.14)$$

$$a_3(x) = 24,6347 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 62,0541 \cdot 10^{-3} \cdot x + 897,4994 \cdot 10^{-3} \quad (2.15)$$

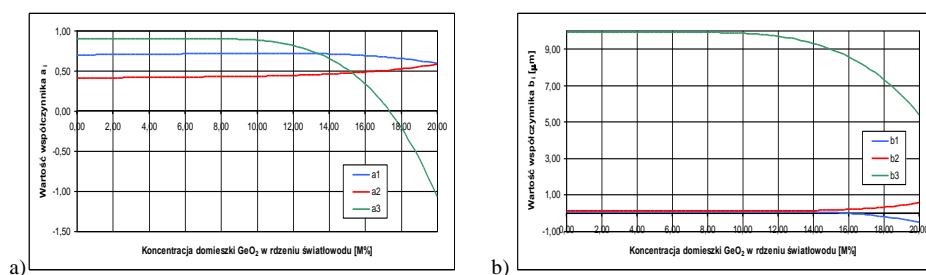
$$b_1(x) = -2,3628 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 1,1985 \cdot 10^{-3} \cdot x + 68,4043 \cdot 10^{-3} \quad (2.16)$$

$$b_2(x) = 1,1307 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 232,1000 \cdot 10^{-6} \cdot x + 116,2414 \cdot 10^{-3} \quad (2.17)$$

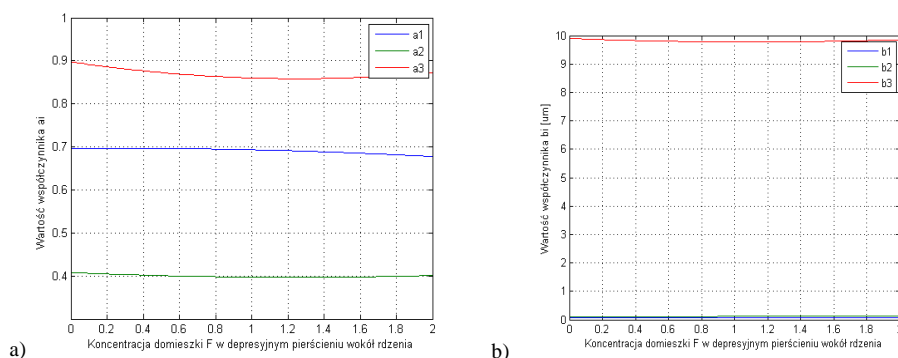
$$b_3(x) = 100,1305 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 220,1915 \cdot 10^{-3} \cdot x + 9,8962 \quad (2.18)$$

gdzie: x – stężenie molowe domieszki fluoru w depresyjnym pierścieniu wokół rdzenia światłowodu [M%].

Graficzne reprezentacji wartości interpolowanych współczynników zarówno dla domieszkowania germanem (GeO_2) jak i fluorem (F) w funkcji stężenia molowego domieszki przedstawiono na rys. 2.1. oraz rys. 2.2.



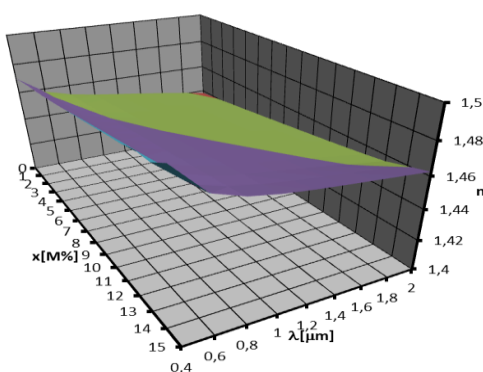
Rys. 2.1. Wartość współczynnika a_i oraz b_i w równaniu Sellmeiera w zależności od koncentracji domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu



Rys. 2.2. Wartość współczynnika a_i oraz b_i w równaniu Sellmeiera w zależności od koncentracji domieszki F w płaszczu światłowodu

3. WYNIKI SYMULACJI WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWYCH PROJEKTOWANYCH ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH

Z teorii dotyczącej projektowania światłowodów wynika, że współczynnik załamania $n = f(x, \lambda)$, zarówno w rdzeniu jak i w płaszczu światłowodu, jest funkcją dwóch zmiennych: stężenia molowego (ułamka molowego) domieszki GeO₂ w rdzeniu światłowodu x [M%] oraz długości fali świetlnej propagowanej w rdzeniu światłowodu λ [μm]. Na podstawie wzorów od (2.7) do (2.12) oraz równania Sellmeiera (2.2) wyznaczono wartości współczynnika załamania dla różnych stężeń molowych domieszki GeO₂ w rdzeniu światłowodu oraz różnych długości fali świetlnej. Graficzna reprezentacja wartości współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu została przedstawiona na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu w zależności od stężenia molowego domieszki GeO₂ w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] [wyniki własne]

Stała materiałowa światłowodu – stała Verdet, opisana równaniem (2.1) $V = f\left(\frac{\partial n}{\partial \lambda}, \lambda\right)$, jest funkcją dwóch zmiennych: pochodnej współczynnika załamania względem długości fali świetlnej oraz długości fali świetlnej.

Aby wyznaczyć pochodną wyrażenia (2.2) względem długości fali świetlnej należy przyjąć następujące podstawienia, które ułatwią przeprowadzenie obliczeń:

$$P_1 = \frac{a_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} \quad P_2 = \frac{a_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} \quad P_3 = \frac{a_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2} \quad (3.1)$$

Korzystając z definicji pochodnej oraz podstawień (3.1) uzyskuje się następującą postać pochodnej współczynnika załamania opisanego równaniem Sellmeiera (2.2) względem długości fali świetlnej:

$$\frac{\partial n}{\partial \lambda} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{1 + P_1 + P_2 + P_3}} \cdot \left(\frac{\partial P_1}{\partial \lambda} + \frac{\partial P_2}{\partial \lambda} + \frac{\partial P_3}{\partial \lambda} \right) \quad (3.2)$$

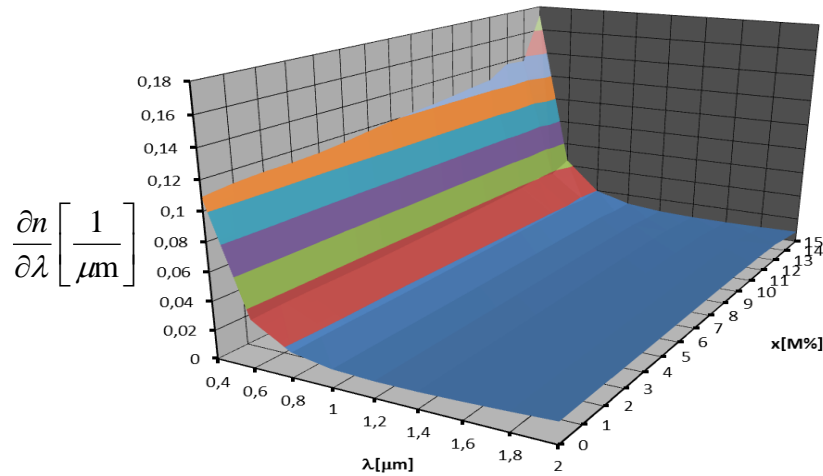
We wzorze (3.2) pojawiają się pochodne poszczególnych składników równania Sellmeiera (2.2), które mają następującą postać:

$$\frac{\partial P_1}{\partial \lambda} = -2 \cdot \frac{a_1 \cdot b_1^2 \cdot \lambda}{(\lambda^2 - b_1^2)^2} \quad \frac{\partial P_2}{\partial \lambda} = -2 \cdot \frac{a_2 \cdot b_2^2 \cdot \lambda}{(\lambda^2 - b_2^2)^2} \quad \frac{\partial P_3}{\partial \lambda} = -2 \cdot \frac{a_3 \cdot b_3^2 \cdot \lambda}{(\lambda^2 - b_3^2)^2} \quad (3.3)$$

Podstawiając do wzoru (3.2) zależności wynikające ze wzorów (3.1) i (3.3) uzyskuje się wzór (postać analityczną) interesującej nas pochodnej, która po zastosowaniu uogólnienia sumy mnogościowej przyjmuje postać:

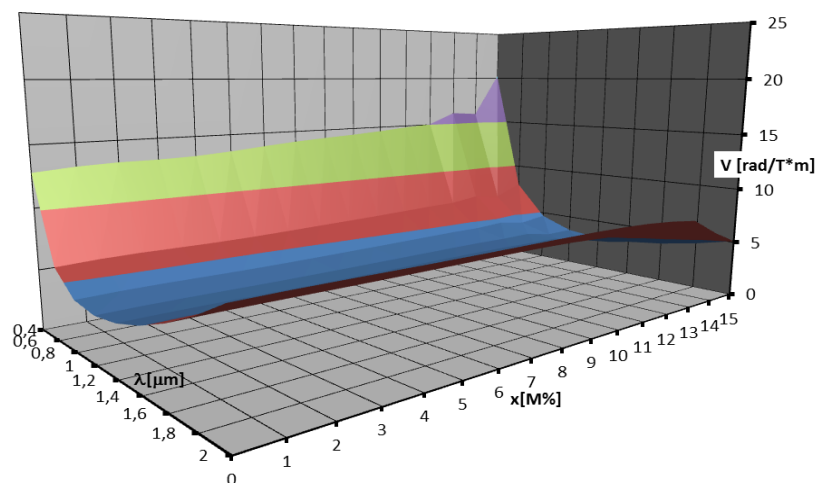
$$\frac{\partial n}{\partial \lambda} = - \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot b_i^2 \cdot \lambda}{(\lambda^2 - b_i^2)^2}}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - b_i^2}}} \left[\frac{1}{\mu\text{m}} \right] \quad (3.4)$$

Z powyższych rozważań wynika, że pochodna współczynnika załamania $\frac{\partial n}{\partial \lambda} = f(x, \lambda)$ jest funkcją dwóch zmiennych: stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu x [M%] oraz długości fali świetlnej propagowanej w rdzeniu światłowodu λ [μm]. Na podstawie wzorów zamieszczonych w pracy [13] oraz wzoru (3.4) wyznaczono wartości pochodnej współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu względem długości fali świetlnej, dla różnych stężeń molowych domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz różnych długości fali świetlnej. Graficzna reprezentacja pochodnej współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu względem długości fali świetlnej została przedstawiona na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Wartość pochodnej współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu względem długości fali świetlnej w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] [wyniki własne]

Korzystając ze wzoru (2.1) oraz wyników obliczeń, których graficzne reprezentacje zostały przedstawione na rys. 3.2., można określić stałą Verdetą $V = f(x, \lambda)$ w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej (rys. 3.3.).



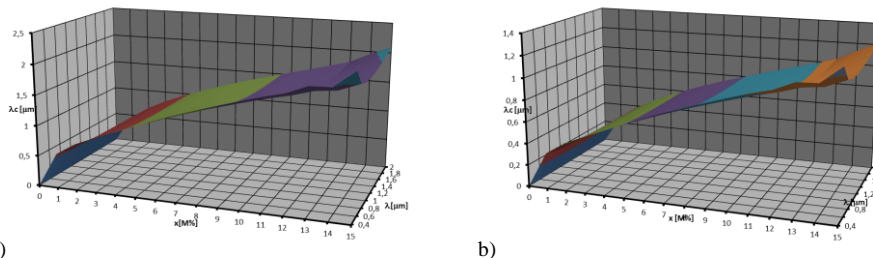
Rys. 3.3. Wartość stałej Verdetą światłowodu w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x $[\text{M}\%]$ oraz długości propagowanej fali świetlnej λ $[\mu\text{m}]$ [wyniki własne]

4. WYNIKI SYMULACJI WŁAŚCIWOŚCI PROPAGACYJNYCH I GEOMETRYCZNYCH PROJEKTOWANYCH ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH

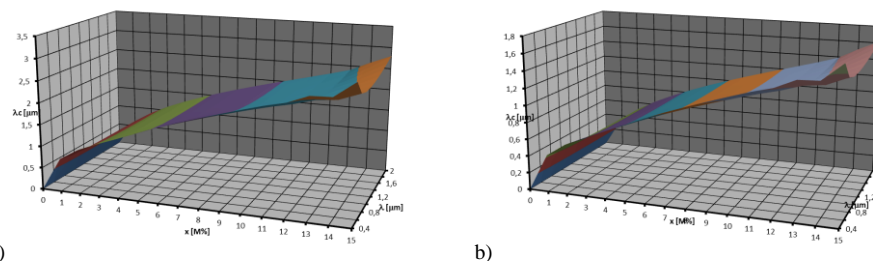
Jak wspomniano na początku niniejszego opracowania, światłowody mogą się charakteryzować różnymi profilami współczynnika załamania w rdzeniu, których kształt wynika z równości (1.3) oraz różnymi wartościami długości fali odcięcia, które można określić na podstawie wzoru (1.4).

Kolejnym więc etapem badań było określenie wpływu kształtu profilu współczynnika załamania w rdzeniu projektowanego światłowodu oraz jego geometrii – promienia rdzenia, na wartość długości fali odcięcia. Na tej podstawie można stwierdzić w jakich warunkach projektowany światłowód będzie jednomodowy lub wielomodowy.

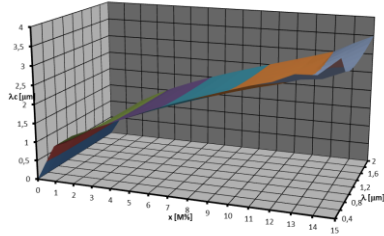
Skupiono się na dwóch typach profilu współczynnika załamania – skokowym i trójkątnym, dla których rozpatrzono promień rdzenia – a z przedziału od $3 \mu\text{m}$ do $11 \mu\text{m}$, z krokiem wynoszącym $1 \mu\text{m}$. Dla takich założeń uzyskano długość fali odcięcia $\lambda_c = f(x, \lambda)$ będącą funkcją dwóch zmiennych: stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu x [M%] oraz długości fali świetlnej propagowanej w rdzeniu światłowodu λ [μm]. Na podstawie wzoru (1.4) wyznaczono wartości długości fali odcięcia dla różnych stężeń molowych domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz różnych długości fali świetlnej. Graficzna reprezentacja długości fali odcięcia została przedstawiona na rys. 4.1. ÷ 4.9.



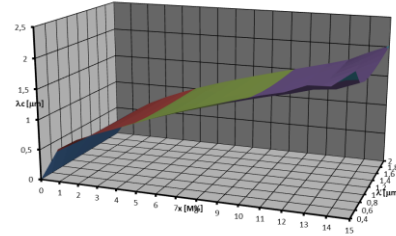
a) b)
Rys. 4.1. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 3 \mu\text{m}$
a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



a) b)
Rys. 4.2. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 4 \mu\text{m}$
a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



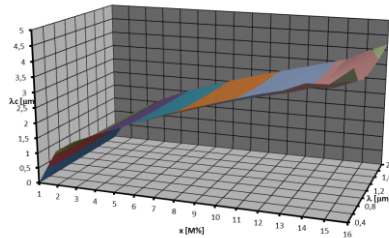
a)



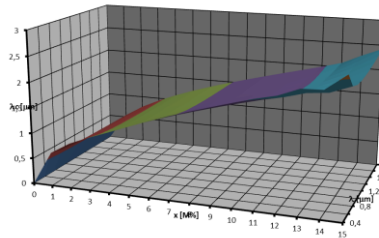
b)

Rys. 4.3. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 5 \mu\text{m}$

a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



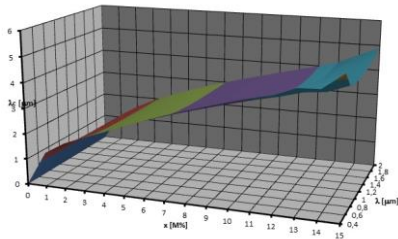
a)



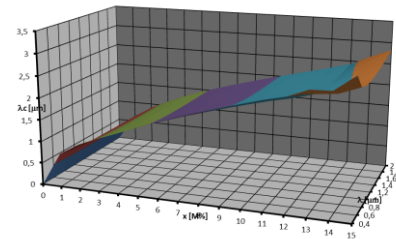
b)

Rys. 4.4. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 6 \mu\text{m}$

a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



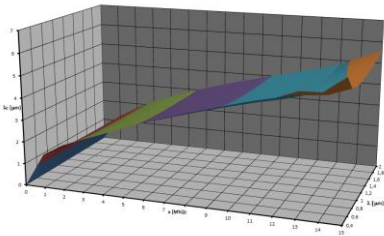
a)



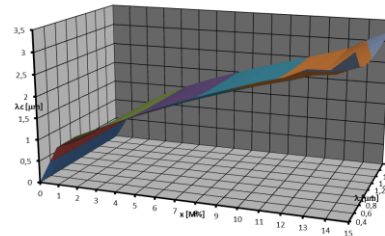
b)

Rys. 4.5. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 7 \mu\text{m}$

a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



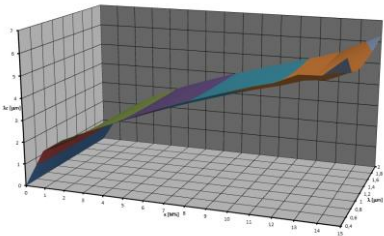
a)



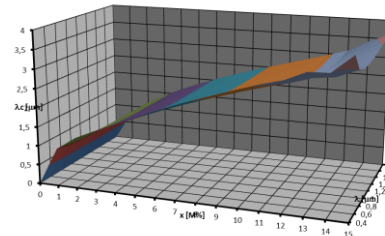
b)

Rys. 4.6. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 8 \mu\text{m}$

a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



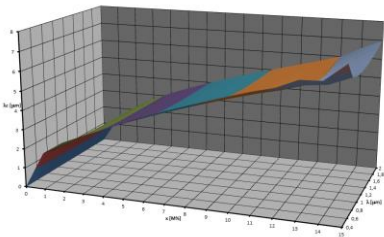
a)



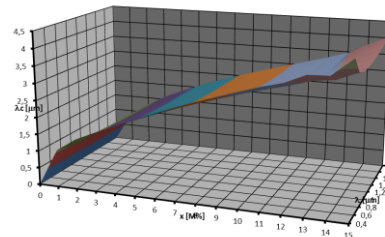
b)

Rys. 4.7. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 9 \mu\text{m}$

a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



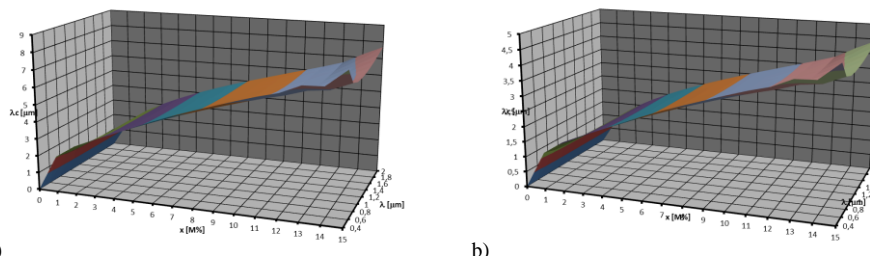
a)



b)

Rys. 4.8. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w jego rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 10 \mu\text{m}$

a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]



a) b)
 Rys. 4.9. Wartość długości fali odcięcia w zależności od stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu x [M%] oraz długości propagowanej fali świetlnej λ [μm] oraz promienia rdzenia światłowodu $a = 11 \mu\text{m}$
 a) profil skokowy, b) profil trójkątny [wyniki własne]

Dodatkowo, na podstawie obliczeń matematycznych, uzyskano wartości długości fali odcięcia dla różnych standardów jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych, w zależności od wartości współczynnika załamania w rdzeniu i płaszczu, wymiarów rdzenia oraz profilu. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy 4.1.

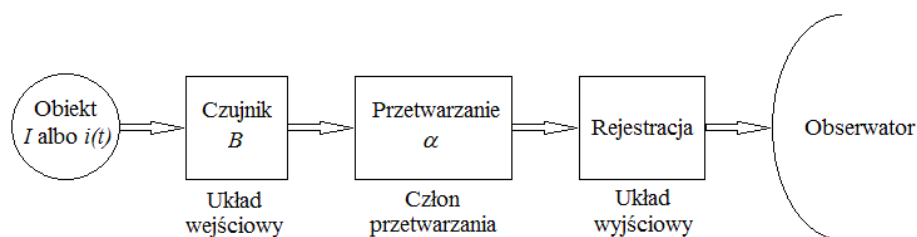
Tablica 4.1. Wartość długości fali odcięcia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych o różnych profilach współczynnika załamania w rdzeniu [wyniki własne]

Profil współczynnika załamania w rdzeniu	Wartości współczynników załamania w rdzeniu i płaszczu		Długość fali odcięcia λ_c [nm]	
	II okno optyczne	III okno optyczne	II okno optyczne	III okno optyczne
profil skokowy G.652 $q \rightarrow \infty$ $2a = 8,5 \mu\text{m}$	$n_1 = 1,4515$ $n_2 = 1,4468$	$n_1 = 1,4487$ $n_2 = 1,4440$	1296	1293
profil skokowy G.657A $q \rightarrow \infty$ $2a = 8,5 \mu\text{m}$	$n_1 = 1,4523$ $n_2 = 1,4468$	$n_1 = 1,4495$ $n_2 = 1,4440$	1397	1395
profil skokowy G.657B $q \rightarrow \infty$ $2a = 8,5 \mu\text{m}$	$n_1 = 1,4513$ $n_2 = 1,4468$	$n_1 = 1,4485$ $n_2 = 1,4440$	1266	1265
profil trójkątny G.653 $q = 1$ $2a = 6,0 \mu\text{m}$	$n_1 = 1,4590$ $n_2 = 1,4468$	$n_1 = 1,4562$ $n_2 = 1,4440$	855	854

5. ZASTOSOWANIE ŚWIATŁOWODÓW JEDNOMODOWYCH W CZUJNIKACH FARADAYA I WERYFIKACJA PRZEDSTAWIONEJ METODY PROJEKTOWANIA

Weryfikacji zaproponowanej metody projektowania światłowodów dla celów metrologicznych dokonano przy użyciu czujniki pracującego w oparciu o magnetoptyczne zjawisko Faradaya – efekt Faradaya. Ogólnie rzecz biorąc są to przetworniki pola magnetycznego w kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła. W zastosowaniach z dyscypliny elektrotechniki mogą to być polarymetryczne czujniki natężenia prądu, zatem przetworniki prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła ($I - \alpha$).

Przetwornik tego typu ma strukturę łańcuchową, a jego ciąg przetwarzania, przedstawiony na rys. 5.1., nie jest rozgałęziony (nie ma w nim węzłów sumacyjnych, a wszystkie procesy przetwarzania zachodzą tylko w jednym kierunku – od wejścia do wyjścia układu).



Rys. 5.1. Ciąg przetwarzania o strukturze łańcuchowej dla polarymetrycznego przetwornika prąd – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła (Obiekt – przewód fazowy linii elektroenergetycznej, Czujnik – włókno światłowodowe, Przetwarzanie – polarymetr, Rejestracja – komputer klasy PC, Obserwator – osoba wykonująca pomiar)

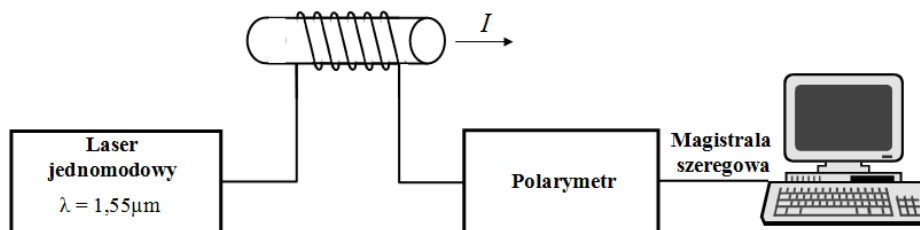
Rozpatrywany przetwornik umożliwia, w sposób pośredni, pomiar wartości chwilowej natężenia prądu elektrycznego. Na podstawie wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła oraz parametrów konstrukcyjnych przetwornika można określić wartość natężenia prądu, zgodnie z zależnością [16]:

$$I = \frac{\alpha}{\mu_0 \cdot V \cdot N} \quad [\text{A}] \quad (5.1)$$

gdzie: α – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji [rad], $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$ – przenikalność magnetyczna próżni, V – stała Verdet (współczynnik proporcjonalności) $\left[\frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$, N – liczba zwojów światłowodowej cewki pomiarowej.

Strukturę układu pomiarowego (rys. 5.2.) do wyznaczenia charakterystyk statycznych przetworników oraz analizy częstotliwościowej tworzyły:

- **źródło światła**, którym był jednomodowy laser firmy EXFO model FLS-2600 o liniowej polaryzacji światła i o regulowanym względnym poziomie mocy od 0,0 dBm do 6,0 dBm z krokiem 0,1 dBm mający możliwość wyboru długości fali świetlnej z przedziału od 1518,00 nm do 1568,00 nm z krokiem 0,01 nm (w czasie pomiarów wykorzystywano falę świetlną o długości 1550,00 nm przy względnym poziomie mocy lasera równym 4,0 dBm), o złączach FC/PC [18],
- **jednomodowe światłowody telekomunikacyjne** standardów G.652, G.653, G.655, G.657A i G.657B,
- **polarymetr światłowodowy** firmy Agilent model 8009B bez wewnętrznego źródła laserowego, o złączach FC/PC [19],
- **komputer klasy PC** ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym rejestrację wartości chwilowych kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła.



Rys. 5.2. Struktura układu pomiarowego do wyznaczenia charakterystyki statycznej polarymetrycznego przetwornika $I - \alpha$

Przed rozpoczęciem pomiarów, gdy wartość natężenia prądu wynosiła 0 A, należało skalibrować polarymetr, aby na jego wejściu była maksymalna moc (największa widzialność w układzie optycznym) światła spolaryzowanego liniowo.

Dodatkowo na przewodzie z prądem, w celu pomiaru natężenia prądu, umieszczone zostały cęgi prądowe firmy HEME model PR1030 oraz cewka Rogowskiego firmy FLUKE model i2000 FLEX. Obydwa mierniki były podłączone do dwóch identycznych multimetrów cyfrowych firmy EnergyLab model EM5512 mierzących rzeczywistą wartość skuteczną. Przy braku prądu w badanym przewodzie dokonano kalibracji cęgów prądowych.

Do badań zostało przygotowanych 10 cewek pomiarowych wykonanych z jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów (po dwie na każdy standard jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego, jedna 40 – zwojowa, a druga 80 – zwojowa, zwoj miał promień 15 mm).

Następnie, na podstawie przedstawionej teorii projektowania zamieszczonej w rozdziale 2 niniejszego opracowania oraz pracy [16], w środowisku MathCAD, opracowano model matematyczny przetwornika $I - \alpha$. Dysponując wartościami współczynników załamania w rdzeniach używanych światłowodów, wyznaczono stężenie molowe domieszki GeO_2 oraz wartość stałej Verdetą w tzw. III oknie optycznym (długość fali świetlnej 1,55 μm). Uzyskane wyniki zostały zawarte w tablicy 5.1.

Tablica 5.1. Stężenie molowe domieszki GeO₂ w rdzeniu światłowodu oraz wartość stałej Verdetą w tzw. III oknie optycznym [wyniki własne]

Standard jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego wg ITU-T	Wartość współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu – n_1	Stężenie molowe domieszki GeO ₂ w rdzeniu światłowodu [M%]	Wartość stałej Verdetą [$\frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}}$]
G.652	1,4515	4,582	5,4407
G.653	1,4590	9,344	5,4626
G.655	1,4554	7,075	5,4561
G.657A	1,4500	3,617	5,4498
G.657B	1,4490	2,970	5,4606

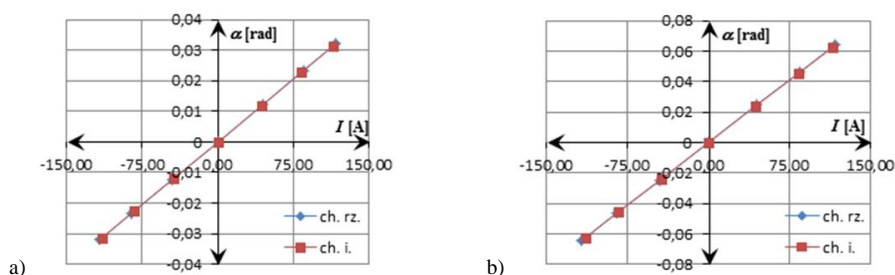
5.1. CHARAKTERYSTYKA STATYCZNA ORAZ CZUŁOŚĆ STATYCZNA BADANEGO PRZETWORNIKA

Statyczna funkcja przetwarzania, która określa zmianę kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła pod wpływem zmiany natężenia prądu elektrycznego, przetwornika $I - \alpha$ jest opisana zależnością [16]:

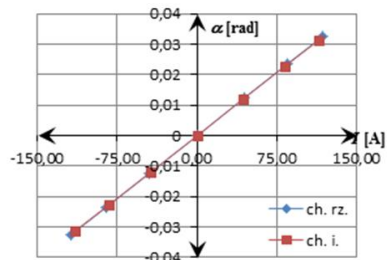
$$\alpha = \mu_0 \cdot V \cdot I \cdot N \quad [\text{rad}] \quad (5.2)$$

Na podstawie wartości stałej Verdetą (tablica 5.1.), parametrów konstrukcyjnych cewki światłowodowej oraz zmian natężenia prądu od -120 A do 120 A, korzystając ze wzoru (5.2) wyznaczono charakterystyki statyczne idealnego przetwornika.

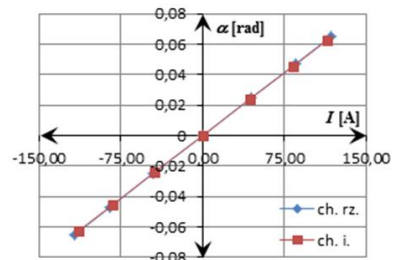
Rzeczywiste oraz idealne charakterystyki statyczne przetwornika $I - \alpha$, w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej, zostały przedstawione na rys. 5.3 ÷ 5.7.



Rys. 5.3. Rzeczywista (ch. rz.) oraz idealna (ch. i.) charakterystyka statyczna przetwornika $I - \alpha$ dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu G.652: a) 40 zwojów, b) 80 zwojów [wyniki własne]

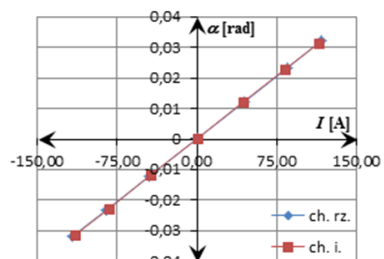


a)

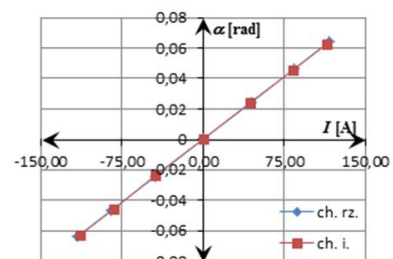


b)

Rys. 5.4. Rzeczywista (ch. rz.) oraz idealna (ch. i.) charakterystyka statyczna przetwornika $I - \alpha$ dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu G.653: a) 40 zwojów, b) 80 zwojów [wyniki własne]

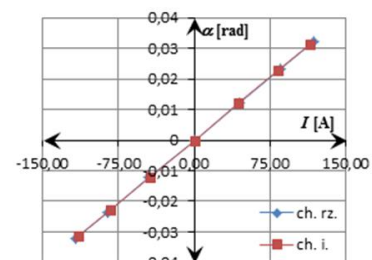


a)

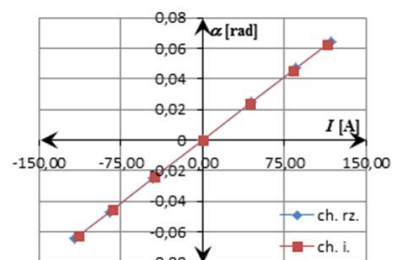


b)

Rys. 5.5. Rzeczywista (ch. rz.) oraz idealna (ch. i.) charakterystyka statyczna przetwornika $I - \alpha$ dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu G.655: a) 40 zwojów, b) 80 zwojów [wyniki własne]

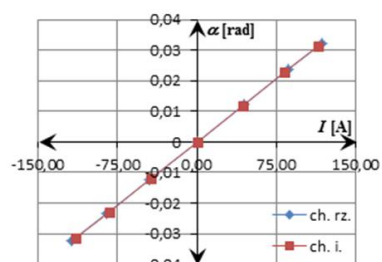


a)

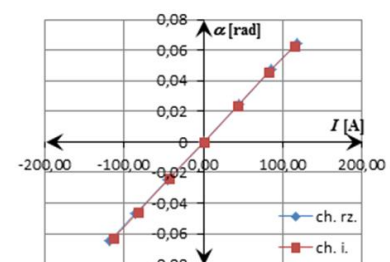


b)

Rys. 5.6. Rzeczywista (ch. rz.) oraz idealna (ch. i.) charakterystyka statyczna przetwornika $I - \alpha$ dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu G.657A: a) 40 zwojów, b) 80 zwojów [wyniki własne]



a)



b)

Rys. 5.7. Rzeczywista (ch. rz.) oraz idealna (ch. i.) charakterystyka statyczna przetwornika $I - \alpha$ dla cewki pomiarowej wykonanej z jednomodowego światłowodu G.657B: a) 40 zwojów, b) 80 zwojów [wyniki własne]

Na podstawie charakterystyki statycznej przetwornika $I - \alpha$ można określić jego czułość statyczną, która jest rozumiana jako granica stosunku przyrostu wielkości wyjściowej – kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, do wywołującego tę zmianę przyrostu wielkości wejściowej – natężenia prądu elektrycznego, co opisuje następująca zależność:

$$S = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{\Delta\alpha}{\Delta I} = \frac{\partial\alpha}{\partial I} = \mu_0 \cdot V \cdot N \left[\frac{\text{rad}}{\text{A}} \right] \quad (5.3)$$

Przetwornik polarymetryczny $I - \alpha$ posiada liniową charakterystykę przetwarzania [16], zatem na podstawie wzoru (5.3), dysponując wynikami pomiarów, można przyjąć z wystarczającą dokładnością, że czułość statyczna to stosunek skończonych przyrostów odpowiednich wartości:

$$S \approx \frac{\Delta\alpha}{\Delta I} \left[\frac{\text{rad}}{\text{A}} \right] \quad (5.4)$$

Kolejnym etapem było określenie rzeczywistej oraz idealnej czułości statycznej badanego przetwornika $I - \alpha$. W celu określenia rzeczywistej czułości statycznej skorzystano ze wzoru (5.4), natomiast do określenia idealnej czułości statycznej wykorzystano wzór (5.3). Uzyskane wyniki zostały zawarte w tabelicy 5.2.

Tablica 5.2. Rzeczywista i idealna czułość statyczna badanego przetwornika $I - \alpha$ w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej [wyniki własne]

Standard jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego wg ITU-T	Czułość statyczna przetwornika $I - \alpha$ $\left[\frac{\text{rad}}{\text{A}} \right]$			
	Cewka światłowodowa 40-zwojowa		Cewka światłowodowa 80-zwojowa	
	Rzeczywista	Idealna	Rzeczywista	Idealna
G.652	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$5,47 \cdot 10^{-4}$	$5,47 \cdot 10^{-4}$
G.653	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$
G.655	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$
G.657A	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$5,48 \cdot 10^{-4}$	$5,48 \cdot 10^{-4}$
G.657B	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$	$5,49 \cdot 10^{-4}$

Jeżeli przez czułość rozumiemy granicę stosunku przyrostu kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła, do wywołującego tę zmianę przyrostu natężenia prądu elektrycznego, wówczas na podstawie danych zawartych w tabelicy 5.2. można wskazać następujące zależności:

- liczba zwojów tworzących cewkę światłowodową wpływa na czułość statyczną. Zgodnie ze wzorem (5.3) proporcjonalnie do liczby zwojów rośnie czułość statyczna, przy zadanym stężeniu molowym domieszki GeO_2

w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej (dla danej stałej Verdetta światłowodu);

- czułość statyczna przetwornika idealnego odpowiada czułości statycznej przetwornika rzeczywistego, co oznacza, że użyta metoda wyznaczania stałej Verdetta zawarta w rozdziale 2 niniejszej pracy oraz opisana w pracach [15,16], jest prawidłowa, a wyniki obliczeń zamieszczone w tabelicy 5.1. są zgodne z rzeczywistością.

5.2. BŁĘDY STATYCZNE BADANEGO PRZETWORNIKA

Przez błędy statyczne (błędy przetwarzania) należy rozumieć różnicę między charakterystyką statyczną idealną, a rzeczywistą. Jest to miara dokładności przetwornika w stanach statycznych. Wyróżniamy następujące rodzaje błędów statycznych:

- błąd bezwzględny odniesiony do wejścia przetwornika można zdefiniować w następujący sposób:

$$\Delta I = \max\{I_i - I_{rz}\} \text{ [A]} \quad (5.5)$$

gdzie: I_i – wartość natężenia prądu elektrycznego odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika idealnego przy ustalonej wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji [A], I_{rz} – wartość natężenia prądu elektrycznego odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika rzeczywistego przy ustalonej wartości kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji [A]. Dla badanego przetwornika $I - \alpha$ oraz różnych standardów włókien światłowodowych, wyniki zostały zamieszczone w tabelicy 5.3. i tabelicy 5.4.;

- błąd bezwzględny odniesiony do wyjścia przetwornika można zdefiniować w następujący sposób:

$$\Delta \alpha = \max\{\alpha_i - \alpha_{rz}\} \text{ [rad]} \quad (5.6)$$

gdzie: α_i – wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika idealnego przy ustalonej wartości natężenia prądu elektrycznego [rad], α_{rz} – wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika rzeczywistego przy ustalonej wartości natężenia prądu elektrycznego [rad]. Dla badanego przetwornika $I - \alpha$ oraz różnych standardów włókien światłowodowych, wyniki zostały zamieszczone w tabelicy 5.3. i tabelicy 5.4.;

- błąd nieliniowości można zdefiniować w następujący sposób:

$$\delta \alpha = \frac{\max\{\alpha_i - \alpha_{rz}\}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \cdot 100\% \quad (5.7)$$

gdzie: α_{\max} – maksymalna wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła odczytana z charakterystyki statycznej przetwornika rzeczywistego [rad], α_{\min} – minimalna wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła

jaką może wykryć polarymetr (dla stosowanego polarymetru jest to 0,01 rad) [rad]. Dla badanego przetwornika $I - \alpha$ oraz różnych standardów włókien światłowodowych, wyniki zostały zamieszczone w tablicy 5.3. i tablicy 5.4.;

Tablica 5.3. Wartości błędów statycznych badanego przetwornika $I - \alpha$ dla różnych standardów włókien światłowodowych – cewka 40-zwojowa [wyniki własne]

Standard jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego wg ITU-T	ΔI [A]	$\Delta \alpha$ [rad]	$\delta \alpha$ [%]
G.652	2,77	$7,57 \cdot 10^{-4}$	3,43
G.653	3,50	$9,61 \cdot 10^{-4}$	4,30
G.655	2,16	$5,93 \cdot 10^{-4}$	2,70
G.657A	3,27	$8,96 \cdot 10^{-4}$	4,03
G.657B	3,63	$9,96 \cdot 10^{-4}$	4,44

Tablica 5.4. Wartości błędów statycznych oraz zakresu pomiarowego badanego przetwornika $I - \alpha$ dla różnych standardów włókien światłowodowych – cewka 80-zwojowa [wyniki własne]

Standard jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego wg ITU-T	ΔI [A]	$\Delta \alpha$ [rad]	$\delta \alpha$ [%]
G.652	2,77	$1,51 \cdot 10^{-3}$	2,80
G.653	3,50	$1,92 \cdot 10^{-3}$	3,51
G.655	2,16	$1,19 \cdot 10^{-3}$	2,20
G.657A	3,27	$1,79 \cdot 10^{-3}$	3,29
G.657B	3,63	$1,99 \cdot 10^{-3}$	3,63

- zakres pomiarowy jest to zakres zmian wartości wielkości wejściowej, dla których odpowiednio wartości wielkości wyjściowej przetwornika, otrzymane w normalnych warunkach użytkowania i z jednego tylko pomiaru nie powinny być obciążone błędem większym od granicznego błędu dopuszczalnego. Wobec powyższej definicji należy wyznaczyć maksymalny błąd graniczny, w zależności od typu światłowodu i liczby zwojów cewki światłowodowej przetwornika, który opisuje zależność:

$$\delta \alpha_{s'_{\max}} = \max \left\{ \frac{\alpha_{rz} - \alpha_i}{\alpha_{rz}} \cdot 100\% \right\} \quad (5.8)$$

Następnie na jego podstawie określono klasę przetwornika korzystając z normy IEC 44-1. Uzyskane wyniki zamieszczono w tablicy 5.5.

Tablica 5.5. Wartości maksymalnego błędu granicznego oraz określonej klasy badanego przetwornika $I - \alpha$ dla różnych standardów włókien światłowodowych – cewka 40-zwojowa i 80-zwojowa [wyniki własne]

Standard jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego wg ITU-T	$\delta\alpha_{s'_{\max}}$ [%]	klasa wg normy IEC 44-1
G.652	2,36	3
G.653	2,97	3
G.655	1,85	3
G.657A	2,78	3
G.657B	3,07	5

Analizując dane zamieszczone w tablicach 5.3. i 5.4. można sformułować wnioski dotyczące błędów nieliniowości:

- najmniejszym błędem nieliniowości charakteryzował się przetwornik, w którym cewka wykonana była z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.655, a największą wartość dla jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego G.657B. Duża wartość błędów nieliniowości w przypadku światłowodu G.657B – odpornego na zginanie z depresyjnym płaszczem [15] może wynikać z jego konstrukcji oraz propagacji światła w światłowodach jednomodowych, gdzie również fragment płaszcza bierze udział w transmisji, ze względu na tzw. cienki rdzeń;
- wraz ze wzrostem liczby zwojów cewki światłowodowej maleje błąd nieliniowości, przy zadanym stężeniu molowym domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz długości fali świetlnej (dla danej stałej Verdet światłowodu), co oznacza, że charakterystyka statyczna przetwornika rzeczywistego dąży do charakterystyki statycznej przetwornika idealnego.

Na podstawie wyników zamieszczonych w tablicy 5.5. można stwierdzić, że przetworniki zbudowane ze światłowodów oznaczonych wg ITU-T jako G.652, G.653, G.655 i G.657A są klasy 3 – zaliczamy je do grupy przetworników pomiarowych, natomiast przetwornik zbudowany ze światłowodu wg ITU-T G.657B jest klasy 5 – zaliczamy go do grupy przetworników zabezpieczeniowych. Liczba zwojów cewki światłowodowej nie wpływa na klasę przetwornika i wartość maksymalnego dopuszczalnego błędów granicznych. Wobec powyższego, można stwierdzić, że dla danej klasy każdy z przetworników ma zakres pomiarowy w przedziale od -120 A do 120 A.

5.3. FOURIEROWSKA ANALIZA SYGNAŁU OKRESOWEGO Z WYJŚCIA BADANEGO PRZETWORNIKA

Dyskretne przekształcenie Fouriera (ang. *Discrete Fourier Transform* – DFT) jest procedurą matematyczną do przeprowadzania analizy częstotliwościowej sygnału dyskretnego. W ten sposób można określić zawartość harmonicznych w analizowanym sygnale. Można je zdefiniować jako dyskretny ciąg składowych wyjściowych $X(m)$ w dziedzinie częstotliwości [20]:

$$\begin{aligned}
X(m) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi \cdot n \cdot m}{N}} = \\
&= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right) - j \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right) \right)
\end{aligned} \tag{5.9}$$

gdzie: $x(n)$ – dyskretny ciąg wartości w dziedzinie czasu ciągłej zmiennej $x(t)$,
 $j = \sqrt{-1}$ – jednostka urojona, n – indeks próbki wejściowej w dziedzinie czasu
($n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$), m – indeks próbek wyjściowych DFT w dziedzinie
częstotliwości ($m = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$), N – liczba próbek ciągu wejściowego oraz liczba
punktów w ciągu wyjściowym DFT.

Wartości częstotliwości N kolejnych punktów na osi częstotliwości, w których
są wyznaczone prążki DFT, można określić jako [20]:

$$f_{analysis}(m) = \frac{m \cdot f_s}{N} \text{ [Hz]} \tag{5.10}$$

gdzie: f_s – szybkość próbkowania z jaką był próbkowany sygnał oryginalny – ciągły.

Dyskretnie przekształcenie Fouriera charakteryzuje się symetrią. Oznacza to, że
jeżeli wyznacza się N – punktową DFT rzeczywistego ciągu wejściowego, to otrzymuje
się N oddzielnych zespolonych wartości wyjściowych DFT, z których jedynie
pierwszych $\frac{N}{2}$ jest niezależnych. Zatem aby otrzymać DFT sygnału $x(n)$, wystarczy
wyliczyć $\frac{N}{2}$ wartości $X(m)$, gdzie $0 \leq m \leq \frac{N}{2} - 1$ [6]. Wartości wyjściowe
od $X\left(\frac{N}{2}\right)$ do $X(N-1)$ DFT nie zawierają żadnej dodatkowej informacji o widmie
rzeczywistego ciągu $x(n)$ [6]. Dodatkowo można dostrzec następującą zależność [20]:

$$\begin{aligned}
X(N-m) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{j \frac{2\pi \cdot n \cdot m}{N}} = \\
&= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \left(\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot m}{N}\right) \right)
\end{aligned} \tag{5.11}$$

Analizując wzór (5.11) można zauważyć, że składowa $X(N-m)$ różni się
jedynie co do znaku części urojonej w stosunku do wzoru (5.9) określającego składową
 $X(m)$ – są to składowe sprzężone. Oznacza to, że co do modułu, składowe te są sobie
równe, a różnią się jedynie fazą.

Drugą bardzo ważną właściwością DFT jest liniowość, która mówi, że DFT
sumy sygnałów jest równa sumie transformat każdego z sygnałów [20]. Dzięki tej
właściwości można poddawać analizie skomplikowane sygnały będące sumą sygnałów
sinusoidalnych – przebiegi okresowe odkształcone, a nie tylko sygnał będący
pojedynczym przebiegiem sinusoidalnym.

Po wyznaczeniu wartości składowych DFT można na ich podstawie określić amplitudy oraz prawdziwe wartości skuteczne składowych harmonicznych sygnału poddawanego analizie częstotliwościowej. Jeżeli przebieg wejściowy zawierał składową stałą, to jej wartość będzie opisana wzorem [20]:

$$X_0 = \frac{X(0)}{N} \quad (5.12)$$

gdzie: $X(0)$ – amplituda wyjściowej składowej stałej DFT. Natomiast amplitudy składowych sinusoidalnych przebiegu wejściowego będą opisane zależnością [20]:

$$X_m = \frac{2 \cdot X(m)}{N \cdot \sqrt{2}} \quad (5.13)$$

gdzie: $X(m)$ – amplituda wyjściowa prążków wyjściowych DFT, $m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} - 1$.

Warto zaznaczyć, na podstawie symetrii DFT, że wyznaczając N – punktową DFT sygnału wejściowego uzyskujemy jedynie informacje o $\frac{N}{2}$ składowych o indeksach od 0 do $\frac{N}{2} - 1$, gdzie indeks 0 odpowiada składowej stałej, a indeksy od 1 do $\frac{N}{2} - 1$ odpowiadają poszczególnym składowym sinusoidalnym.

Wobec powyższego prawdziwa wartość skuteczna (ang. *True RMS*) sygnału poddawanego DFT, zgodnie z twierdzeniem Parsevala, będzie opisana wzorem [21]:

$$X_{RMS} = \sqrt{X_0^2 + \sum_{m=1}^{\frac{N}{2}-1} X_m^2} \quad (5.14)$$

Analizując uzyskane z DFT wyniki warto wyznaczyć współczynnik zawartości harmonicznych (ang. *Total Harmonic Distortion* – THD), który jest zdefiniowany następująco [21]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^{\frac{N}{2}-1} X_m^2}}{X_1} \cdot 100\% \quad (5.15)$$

gdzie: X_1 – harmoniczna o indeksie 1, tak zwana podstawowa harmoniczna.

Pomiary wartości chwilowych kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła przeprowadzono za pomocą polarymetru w układzie z rys. 5.2. Ustawiono 20 próbek na

okres badanego przebiegu prądu, który wyniósł 20 ms (rozpatrywano przebieg sinusoidalny o częstotliwości sieciowej). Wartości chwilowe, zmierzonego za pomocą polarymetru, kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła zostały zamieszczone w tablicach od 5.6 do 5.11.

Tablica 5.6. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów dla cewki 40 – zwojowej, przy wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie równej 100 A [wyniki własne]

Chwila czasowa t [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym α [°]				
	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.657A 3,5 M%	G.655 5,8 M%	G.653 7,9 M%
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
0,002	1,31	1,31	1,31	1,30	1,31
0,003	1,80	1,80	1,80	1,79	1,80
0,004	2,12	2,12	2,11	2,11	2,12
0,005	2,22	2,22	2,22	2,22	2,23
0,006	2,12	2,11	2,11	2,11	2,12
0,007	1,80	1,80	1,79	1,79	1,80
0,008	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
0,009	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
0,010	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
0,011	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70
0,012	-1,32	-1,32	-1,32	-1,32	-1,32
0,013	-1,81	-1,81	-1,81	-1,81	-1,81
0,014	-2,12	-2,12	-2,12	-2,12	-2,12
0,015	-2,22	-2,22	-2,22	-2,22	-2,23
0,016	-2,11	-2,11	-2,10	-2,10	-2,11
0,017	-1,78	-1,78	-1,78	-1,77	-1,78
0,018	-1,28	-1,28	-1,27	-1,27	-1,28
0,019	-0,65	-0,65	-0,64	-0,64	-0,65

Tablica 5.7. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów dla cewki 40 – zwojowej, przy wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie równej 300 A [wyniki własne]

Chwila czasowa t [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym α [°]				
	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.657A 3,5 M%	G.655 5,8 M%	G.653 7,9 M%
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	2,06	2,06	2,06	2,06	2,06
0,002	3,92	3,92	3,92	3,91	3,93
0,003	5,40	5,40	5,39	5,38	5,40
0,004	6,35	6,35	6,34	6,33	6,35
0,005	6,67	6,67	6,66	6,65	6,68
0,006	6,35	6,34	6,33	6,33	6,35
0,007	5,39	5,39	5,38	5,38	5,40
0,008	3,91	3,91	3,90	3,90	3,91
0,009	2,04	2,04	2,04	2,03	2,04
0,010	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03
0,011	-2,10	-2,10	-2,10	-2,09	-2,10
0,012	-3,96	-3,96	-3,95	-3,95	-3,96
0,013	-5,43	-5,43	-5,42	-5,42	-5,44
0,014	-6,37	-6,37	-6,36	-6,35	-6,37
0,015	-6,67	-6,67	-6,66	-6,65	-6,68
0,016	-6,32	-6,32	-6,31	-6,30	-6,32
0,017	-5,34	-5,34	-5,33	-5,32	-5,34
0,018	-3,83	-3,83	-3,82	-3,82	-3,83
0,019	-1,94	-1,94	-1,93	-1,93	-1,94

Tablica 5.8. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów dla cewki 40 – zwojowej, przy wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie równej 500 A [wyniki własne]

Chwila czasowa t [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym α [°]				
	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.657A 3,5 M%	G.655 5,8 M%	G.653 7,9 M%
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	3,44	3,44	3,43	3,43	3,44
0,002	6,54	6,54	6,53	6,52	6,54
0,003	9,00	9,00	8,98	8,97	9,01
0,004	10,58	10,58	10,56	10,55	10,59
0,005	11,12	11,12	11,10	11,09	11,13
0,006	10,58	10,57	10,56	10,54	10,58
0,007	8,99	8,98	8,97	8,96	8,99
0,008	6,51	6,51	6,50	6,49	6,52
0,009	3,40	3,40	3,39	3,39	3,40
0,010	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05
0,011	-3,50	-3,50	-3,49	-3,49	-3,50
0,012	-6,60	-6,60	-6,59	-6,58	-6,61
0,013	-9,06	-9,05	-9,04	-9,03	-9,06
0,014	-10,61	-10,61	-10,59	-10,58	-10,62
0,015	-11,12	-11,12	-11,10	-11,09	-11,13
0,016	-10,53	-10,53	-10,51	-10,50	-10,54
0,017	-8,90	-8,89	-8,88	-8,87	-8,90
0,018	-6,38	-6,38	-6,37	-6,36	-6,39
0,019	-3,23	-3,23	-3,22	-3,22	-3,23

Tablica 5.9. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów dla cewki 80 – zwojowej, przy wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie równej 100 A [wyniki własne]

Chwila czasowa t [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym α [°]				
	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.657A 3,5 M%	G.655 5,8 M%	G.653 7,9 M%
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	1,37	1,37	1,37	1,37	1,38
0,002	2,62	2,61	2,61	2,61	2,62
0,003	3,60	3,60	3,59	3,59	3,60
0,004	4,23	4,23	4,22	4,22	4,24
0,005	4,45	4,45	4,44	4,44	4,45
0,006	4,23	4,23	4,22	4,22	4,23
0,007	3,59	3,59	3,59	3,58	3,60
0,008	2,61	2,60	2,60	2,60	2,61
0,009	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
0,010	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
0,011	-1,40	-1,40	-1,40	-1,40	-1,40
0,012	-2,64	-2,64	-2,64	-2,63	-2,64
0,013	-3,62	-3,62	-3,62	-3,61	-3,63
0,014	-4,25	-4,24	-4,24	-4,23	-4,25
0,015	-4,45	-4,45	-4,44	-4,44	-4,45
0,016	-4,21	-4,21	-4,21	-4,20	-4,22
0,017	-3,56	-3,56	-3,55	-3,55	-3,56
0,018	-2,55	-2,55	-2,55	-2,54	-2,55
0,019	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29

Tablica 5.10. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów dla cewki 80 – zwojowej, przy wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie równej 300 A [wyniki własne]

Chwila czasowa t [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym α [°]				
	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.657A 3,5 M%	G.655 5,8 M%	G.653 7,9 M%
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	4,12	4,12	4,12	4,11	4,13
0,002	7,85	7,84	7,83	7,82	7,85
0,003	10,80	10,80	10,78	10,77	10,81
0,004	12,70	12,69	12,67	12,66	12,71
0,005	13,35	13,34	13,32	13,31	13,36
0,006	12,69	12,69	12,67	12,65	12,70
0,007	10,78	10,78	10,76	10,75	10,79
0,008	7,82	7,81	7,80	7,79	7,82
0,009	4,08	4,08	4,07	4,07	4,08
0,010	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06
0,011	-4,20	-4,20	-4,19	-4,19	-4,20
0,012	-7,92	-7,92	-7,91	-7,90	-7,93
0,013	-10,87	-10,86	-10,85	-10,83	-10,88
0,014	-12,74	-12,73	-12,71	-12,70	-12,75
0,015	-13,35	-13,34	-13,32	-13,31	-13,36
0,016	-12,64	-12,63	-12,62	-12,60	-12,65
0,017	-10,68	-10,67	-10,66	-10,65	-10,69
0,018	-7,66	-7,65	-7,64	-7,63	-7,66
0,019	-3,87	-3,87	-3,87	-3,86	-3,88

Tablica 5.11. Wyniki pomiarów wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła dla jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych różnych standardów dla cewki 80 – zwojowej, przy wartości skutecznej natężenia prądu w przewodzie równej 500 A [wyniki własne]

Chwila czasowa t [s]	Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w jednomodowym światłowodzie telekomunikacyjnym α [°]				
	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.657A 3,5 M%	G.655 5,8 M%	G.653 7,9 M%
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,001	6,87	6,87	6,86	6,85	6,88
0,002	13,08	13,07	13,05	13,04	13,09
0,003	18,00	17,99	17,97	17,95	18,02
0,004	21,16	21,15	21,12	21,10	21,18
0,005	22,25	22,24	22,21	22,18	22,27
0,006	21,15	21,14	21,11	21,09	21,17
0,007	17,97	17,97	17,94	17,92	17,99
0,008	13,03	13,02	13,00	12,99	13,04
0,009	6,80	6,80	6,79	6,78	6,80
0,010	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
0,011	-7,00	-7,00	-6,99	-6,98	-7,00
0,012	-13,21	-13,20	-13,18	-13,17	-13,22
0,013	-18,11	-18,10	-18,08	-18,06	-18,13
0,014	-21,23	-21,22	-21,19	-21,17	-21,25
0,015	-22,25	-22,24	-22,21	-22,18	-22,27
0,016	-21,06	-21,06	-21,03	-21,00	-21,08
0,017	-17,80	-17,79	-17,76	-17,74	-17,81
0,018	-12,76	-12,76	-12,74	-12,72	-12,77
0,019	-6,46	-6,46	-6,45	-6,44	-6,46

Przed przystąpieniem do analizy sygnału wyjściowego z badanego przetwornika, z wykorzystaniem DFT, dokonano przeliczenia wartości chwilowej kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła na wartość chwilową prądu, zgodnie z zależnością (5.1), przyjmując stałe Verdet światłowodów zamieszczone w tablicy 5.1.

Ostatnim etapem analizy uzyskanych wyników było wyznaczenie 20-punktowej DFT, błędów bezwzględnych i względnych pomiaru natężenia prądu badanym przetwornikiem z cewką pomiarową wykonaną z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego, w zależności od liczby zwojów cewki oraz standardu włókna światłowodowego, a także współczynnika zawartości harmonicznego sygnału na wyjściu rozpatrywanego czujnika. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w tablicach od 5.12. do 5.14.

Tablica 5.12. Wartości m-tej składowej wyjściowej DFT dla mierzonego prądu o wartości skutecznej 100A w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej wraz z błędami pomiarów i THD [wyniki własne]

Indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości - <i>m</i>	Moduł m-tej składowej wyjściowej DFT [A]									
	Cewka 40 - zwojowa					Cewka 80 - zwojowa				
	G.652 3,1 M%	G.653 7,9 M%	G.655 5,8 M%	G.657A 3,5 M%	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.653 7,9 M%	G.655 5,8 M%	G.657A 3,5 M%	G.657B 3,0 M%
0	1,909	2,542	1,914	2,549	2,544	1,909	2,542	2,551	1,274	2,226
1	1413,025	1413,023	1413,031	1412,034	1413,024	1412,025	1412,028	1413,025	1413,025	1412,026
2	5,141	5,495	8,159	6,391	5,499	6,367	6,654	6,395	7,019	6,584
3	2,438	3,912	4,001	3,136	2,655	4,037	3,573	3,673	3,259	3,711
4	2,734	2,108	2,266	2,784	2,109	2,832	2,710	3,045	2,563	2,825
5	2,294	2,009	1,427	2,703	2,698	2,249	2,291	1,860	2,253	2,036
6	1,044	1,141	1,951	3,014	1,141	1,915	1,968	2,277	1,789	2,549
7	1,805	1,569	1,704	1,968	1,343	1,496	1,738	1,447	1,463	1,953
8	1,964	2,108	2,055	1,792	2,109	1,677	1,748	1,490	1,503	1,193
9	1,343	1,344	2,187	1,626	1,871	1,444	1,713	1,440	1,487	1,431
10	1,909	1,271	1,914	1,274	1,272	1,272	1,271	0,638	1,911	0,954
11	1,343	1,344	2,187	1,626	1,871	1,444	1,713	1,440	1,487	1,431
12	1,964	2,108	2,055	1,792	2,109	1,677	1,748	1,490	1,503	1,193
13	1,805	1,569	1,704	1,968	1,343	1,496	1,738	1,447	1,463	1,953
14	1,044	1,141	1,951	3,014	1,141	1,915	1,968	2,277	1,789	2,549
15	2,294	2,009	1,427	2,703	2,698	2,249	2,291	1,860	2,253	2,036
16	2,734	2,108	2,266	2,784	2,109	2,832	2,710	3,045	2,563	2,825
17	2,438	3,912	4,001	3,136	2,655	4,037	3,573	3,673	3,259	3,711
18	5,141	5,495	8,159	6,391	5,499	6,367	6,654	6,395	7,019	6,584
19	1413,025	1413,023	1413,031	1412,034	1413,024	1412,025	1412,028	1413,025	1413,025	1412,026
Prawdziwa wartość skuteczna [A]	99,917	99,918	99,919	99,848	99,917	99,847	99,848	99,918	99,918	99,847
Błąd bezwzględny [A]	0,083	0,082	0,081	0,152	0,083	0,153	0,152	0,082	0,082	0,153
Błąd względny [%]	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2
THD [%]	0,53	0,57	0,73	0,65	0,55	0,64	0,64	0,63	0,64	0,65

Tablica 5.13. Wartości m-tej składowej wyjściowej DFT dla mierzonego prądu o wartości skutecznej 300A w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej wraz z błędami pomiarów i THD [wyniki własne]

Indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości - <i>m</i>	Moduł m-tej składowej wyjściowej DFT [A]									
	Cewka 40 - zwojowa					Cewka 80 - zwojowa				
	G.652 3,1 M%	G.653 7,9 M%	G.655 5,8 M%	G.657A 3,5 M%	G.657B 3,0 M%	G.652 3,1 M%	G.653 7,9 M%	G.655 5,8 M%	G.657A 3,5 M%	G.657B 3,0 M%
0	5,726	6,990	7,016	7,008	6,360	6,998	6,037	6,378	6,053	6,360
1	4238,073	4236,075	4237,076	4237,080	4237,072	4237,078	4238,079	4237,078	4237,078	4238,077
2	18,898	19,828	20,156	18,768	19,228	19,733	19,185	19,320	19,236	19,280
3	10,364	10,879	10,129	10,658	10,571	10,864	11,181	11,065	10,553	10,995
4	8,456	7,131	6,571	8,821	7,826	8,006	7,536	8,392	7,556	8,032
5	6,001	6,755	6,900	5,874	6,360	6,762	6,550	6,331	6,986	6,360
6	5,347	5,733	4,917	6,537	5,612	5,589	5,429	5,768	5,443	6,130
7	4,984	5,232	5,026	5,433	4,368	4,639	4,895	5,250	4,384	5,161
8	4,038	4,966	5,177	4,738	4,432	4,715	4,597	4,540	4,610	4,738
9	4,542	4,014	5,473	4,631	4,935	4,566	4,443	4,256	4,695	4,780
10	4,453	3,177	4,465	4,460	3,816	4,453	4,130	4,465	4,141	3,816
11	4,542	4,014	5,473	4,631	4,935	4,566	4,443	4,256	4,695	4,780
12	4,038	4,966	5,177	4,738	4,432	4,715	4,597	4,540	4,610	4,738
13	4,984	5,232	5,026	5,433	4,368	4,639	4,895	5,250	4,384	5,161
14	5,347	5,733	4,917	6,537	5,612	5,589	5,429	5,768	5,443	6,130
15	6,001	6,755	6,900	5,874	6,360	6,762	6,550	6,331	6,986	6,360
16	8,456	7,131	6,571	8,821	7,826	8,006	7,536	8,392	7,556	8,032
17	10,364	10,879	10,129	10,658	10,571	10,864	11,181	11,065	10,553	10,995
18	18,898	19,828	20,156	18,768	19,228	19,733	19,185	19,320	19,236	19,280
19	4238,073	4236,075	4237,076	4237,080	4237,072	4237,078	4238,079	4237,078	4237,078	4238,077
Prawdziwa wartość skuteczna [A]	299,683	299,542	299,613	299,613	299,612	299,613	299,683	299,613	299,613	299,683
Błąd bezwzględny [%]	0,317	0,458	0,387	0,387	0,388	0,387	0,317	0,387	0,387	0,317
Błąd względny [%]	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
THD [%]	0,61	0,63	0,63	0,62	0,61	0,63	0,62	0,63	0,62	0,63

Tablica 5.14. Wartości m-tej składowej wyjściowej DFT dla mierzonego prądu o wartości skutecznej 500A w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego oraz liczby zwojów cewki światłowodowej wraz z błędami pomiarów i THD [wyniki własne]

Indeks próbki wyjściowej DFT w dziedzinie częstotliwości - <i>m</i>	Moduł m-tej składowej wyjściowej DFT [A]									
	Cewka 40 - zwojowa					Cewka 80 - zwojowa				
	G.652	G.653	G.655	G.657A	G.657B	G.652	G.653	G.655	G.657A	G.657B
	3,1 M%	7,9 M%	5,8 M%	3,5 M%	3,0 M%	3,1 M%	7,9 M%	5,8 M%	3,5 M%	3,0 M%
0	11,451	10,803	10,843	11,468	11,448	10,179	11,120	10,843	10,194	10,494
1	7062,133	7061,129	7061,131	7061,130	7062,129	7062,125	7063,131	7063,130	7063,128	7063,129
2	31,290	31,840	31,992	32,289	32,231	32,265	32,537	32,826	32,312	32,436
3	17,675	17,752	17,886	17,665	17,135	17,626	18,402	17,963	18,088	17,797
4	13,245	13,320	12,704	12,063	12,041	13,092	12,741	13,102	13,112	13,106
5	9,897	10,422	10,383	11,749	11,727	10,356	11,066	10,862	10,372	10,590
6	8,862	8,219	9,050	9,267	9,252	9,015	9,076	9,235	9,029	9,524
7	8,041	8,283	8,453	8,484	7,710	8,384	8,682	8,188	7,828	8,767
8	7,779	7,748	8,226	8,538	8,522	7,486	7,632	7,476	7,497	7,453
9	7,860	8,399	7,349	7,739	7,530	7,241	7,558	7,359	7,591	7,081
10	7,634	8,261	7,016	6,371	6,360	7,634	7,308	7,016	7,646	6,678
11	7,860	8,399	7,349	7,739	7,530	7,241	7,558	7,359	7,591	7,081
12	7,779	7,748	8,226	8,538	8,522	7,486	7,632	7,476	7,497	7,453
13	8,041	8,283	8,453	8,484	7,710	8,384	8,682	8,188	7,828	8,767
14	8,862	8,219	9,050	9,267	9,252	9,015	9,076	9,235	9,029	9,524
15	9,897	10,422	10,383	11,749	11,727	10,356	11,066	10,862	10,372	10,590
16	13,245	13,320	12,704	12,063	12,041	13,092	12,741	13,102	13,112	13,106
17	17,675	17,752	17,886	17,665	17,135	17,626	18,402	17,963	18,088	17,797
18	31,290	31,840	31,992	32,289	32,231	32,265	32,537	32,826	32,312	32,436
19	7062,133	7061,129	7061,131	7061,130	7062,129	7062,125	7063,131	7063,130	7063,128	7063,129
Prawdziwa wartość skuteczna [A]	499,378	499,307	499,307	499,307	499,378	499,378	499,449	499,449	499,449	499,449
Błąd bezwzględny [A]	0,622	0,693	0,693	0,693	0,622	0,622	0,551	0,551	0,551	0,551
Błąd względny [%]	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
THD [%]	0,61	0,61	0,62	0,62	0,62	0,62	0,63	0,63	0,62	0,62

Przeprowadzona analiza częstotliwościowa wykazała, że rozpatrywany przetwornik światłowodowy nie wprowadza znaczących zniekształceń, o czym świadczy wartość współczynnika zawartości harmoniczych. Na podstawie uzyskanych

wyników można określić przedział, w jakim zawiera się THD, tj., od 0,53% do 0,73%. Minimalne wartość THD towarzyszy światłowodowi standardowemu – G.652, a maksymalna światłowodowi o profilu korony – G.655.

Stężenie molowe domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu (standard wykorzystanego jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego) oraz liczba zwojów cewki światłowodowej nie wpływają znacząco na wartość błędu względnego pomiaru natężenia prądu za pomocą przetwornika światłowodowego $I - \alpha$. Błąd względny zawiera się w przedziale od -0,2% do -0,1%.

Zaprezentowane wyniki analizy fourierowskiej potwierdziły prawidłowość metody projektowania światłowodów jednomodowych oraz określania ich właściwości materiałowych. Potwierdzają to uzyskane wyniki prawdziwej wartości skutecznej prądu zmierzonego pośrednio, z wykorzystaniem przetwornika światłowodowego, które pokrywają się z wynikami zmierzonymi za pomocą cęgów prądowych i cewki Rogowskiego.

6. ZAKOŃCZENIE

W metrologii coraz częściej wykorzystuje się światłowody, które pełnią funkcję sensorów oraz konwerterów różnych wielkości elektrycznych bądź nieelektrycznych.

Jeżeli stosujemy czujniki wykorzystujące magnetoptyczne zjawisko Faradaya, to musimy zagwarantować, aby światło propagowane w światłowodzie miało polaryzację liniową, która ma miejsce wtedy, gdy drgania wektora natężenia pola elektrycznego zachodzą tylko w jednej płaszczyźnie, która nie zmienia w czasie swej orientacji w przestrzeni. Aby uzyskać liniową polaryzację światła stosuje się: polaryzatory dwójłomne, polaryzatory odbiciowe albo polaroidy (błony polaryzujące). Polaryzacja wprowadzonego do włókna światłowodowego – elementu czynnego czujnika – światła ulega zmianie pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego.

Ciała, które nie są aktywne optycznie, gdy nie działa na nie zewnętrzne pole magnetyczne, stają się aktywne w momencie jego wystąpienia – następuje skrócenie płaszczyzny polaryzacji o pewien kąt. Jest to magnetoptyczne zjawisko Faradaya znane obecnie jako efekt Faradaya. Odkrył je w 1845 roku Michael Faraday jako pierwszy w sposób eksperymentalny pokazał związek światła z magnetyzmem. Dodatkowo opisał je wzorem [5]:

$$\alpha = V \cdot L \cdot B \text{ [rad]} \quad (6.1)$$

gdzie: α – kąt skrócenia płaszczyzny polaryzacji [rad], V – stała Verdet (współczynnik proporcjonalności) $\left[\frac{\text{rad}}{\text{T} \cdot \text{m}} \right]$, L – droga, na której światło oddziaływywa z polem magnetycznym [m], B – indukcja pola magnetycznego [T].

Efekt Faradaya występuje wówczas, gdy składowa pola magnetycznego jest skierowana równolegle do kierunku rozchodzenia się fali świetlnej. Kąt skrócenia płaszczyzny polaryzacji opisany wzorem (6.1), kąt skrócenia azymutu stanu polaryzacji [5], jest zależny od indukcji magnetycznej B , długości drogi L oraz współczynnika materiałowego, jakim jest stała Verdet V .

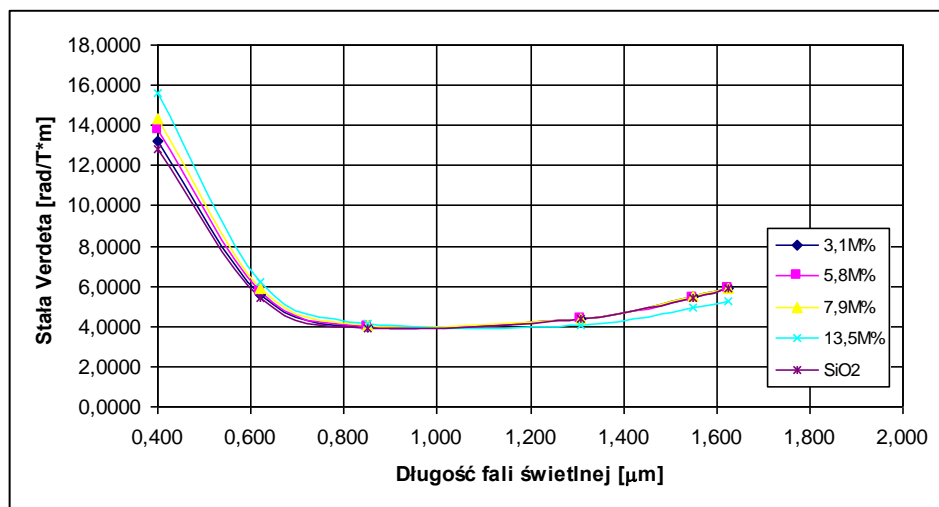
Jak już wcześniej wspomniano, występująca we wzorze (6.1) stała Verdet jest wielkością empiryczną, charakteryzuje ona materiał ośrodka jako współczynnik proporcjonalności pomiędzy wymuszeniem magnetycznym i reakcją materiału (szkła). Rozpatrując typowe szkła tlenkowe – diamagnetyki tworzące strukturę $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$, które były obiektem badań, można stwierdzić, że w ich przypadku stała Verdet jest dodatnia i niewielka (rys. 6.1.). Jednakże przy stałej długości światłowodu oraz stałej wartości indukcji magnetycznej, wpływa ona na czułość projektowanego czujnika.

Na podstawie zaproponowanej metody projektowania światłowodów jednomodowych oraz przeprowadzonych badań można wyprowadzić następujące wnioski dotyczące wartości stałej Verdet:

- wraz ze wzrostem długości fali świetlnej, przy stałej wartości stężenia domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, maleje wartość stałej Verdet, z wyjątkiem obszarów absorpcji, tj. powyżej długości fali $1 \mu\text{m} \div 1,2 \mu\text{m}$, którym towarzyszy anormalna dyspersja, a wartość stałej Verdet wraz ze wzrostem długości fali rośnie. Zależność wartości stałej Verdet od długości

fali świetlnej i stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu przedstawia rys. 3.3.;

- wraz ze wzrostem stężenia molowego domieszki GeO_2 do około 10 M% w rdzeniu światłowodu, przy stałej wartości długości fali świetlnej, wartość stałej Verdetta nie ulega zmianie, natomiast po przekroczeniu wartości 10 M% stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, obserwuje się zmniejszenie wartości stałej Verdetta.



Rys. 6.1. Zależność wartości stałej Verdetta od długości fali świetlnej i stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu [wyniki własne]

Projektując światłowód dla celów metrologicznych należy również uwzględnić jego właściwości propagacyjne i geometryczne. Obecnie na rynku optoelektronicznym powszechnie stosowanym i tanim rozwiązaniem są lasery telekomunikacyjne, które pracują w tzw. II oknie optycznym (długość fali świetlnej $1,33 \mu\text{m}$) lub tzw. III oknie optycznym (długość fali świetlnej $1,55 \mu\text{m}$). Wobec powyższego należy rozpatrywać projektowane światłowody pod względem długości fali odcięcia, aby długość wykorzystywanej w pomiarach fali świetlnej przekraczała długość fali odcięcia. Zostanie wtedy spełniony warunek propagacji jednomodowej.

Na podstawie przeprowadzonych badań, których wyniki przedstawiono na rys. od 4.1. do 4.9. oraz w tabelicy 4.1., można wyprowadzić następujące wnioski dotyczące wartości długości fali odcięcia oraz jednomodowości projektowanych światłowodów:

- wraz ze wzrostem długości fali świetlnej, przy stałej wartości stężenia domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz stałej wartości długości promienia rdzenia światłowodu, zarówno dla profilu skokowego jak i trójkątnego, wartość długości fali odcięcia nie ulega zmianie;
- wraz ze wzrostem stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, przy stałej wartości długości fali świetlnej oraz stałej wartości długości promienia rdzenia światłowodu, zarówno dla profilu skokowego jak i trójkątnego, długość fali odcięcia rośnie;

- wraz ze wzrostem długości promienia rdzenia światłowodu, przy stałej wartości stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu oraz stałej wartości długości fali świetlnej, zarówno dla profilu skokowego jak i trójkątnego, długość fali odcięcia rośnie;
- dodatkowo kształt profilu współczynnika załamania na wpływ na długość fali odcięcia. Przy stałej wartości stężenia molowego domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, stałej wartości długości fali świetlnej oraz stałej długości promienia rdzenia światłowodu obserwuje się dla profilu skokowego większą wartość długości fali odcięcia niż w przypadku profilu trójkątnego.

Z powyższego wynika, że stosując lasery telekomunikacyjne, należy w taki sposób dobierać geometrię rdzenia światłowodu, profil współczynnika załamania oraz stężenia molowe domieszki GeO_2 w rdzeniu światłowodu, aby zagwarantować jego jednomodowość. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że światłowody, których promień rdzenia przekracza $10\ \mu\text{m}$ nigdy nie będą jednomodowe dla tzw. II i III okna optycznego, niezależnie od kształtu profilu współczynnika załamania w ich rdzeniu (rys. 4.8. i rys. 4.9.).

Wyniki przeprowadzonych pomiarów oraz stosownych analiz wskazują, że przetworniki światłowodowe, z cewką wykonaną ze światłowodu jednomodowego, a co za tym idzie również ze światłowodu telekomunikacyjnego, może być stosowany do pomiaru wartości skutecznych prądów o częstotliwości sieciowej. Ważną zaletą tego rozwiązania jest możliwość nawijania cewek pomiarowych bezpośrednio na przewody fazowe linii elektroenergetycznych, separacja galwaniczna układu pomiarowego od obwodu pierwotnego oraz łatwość wykonania.

Uzyskane, na podstawie wyników pomiarów wartości chwilowych mierzonego prądu, przebiegi prądów mają kształt sinusoidy. Można to ocenić na podstawie wartości wyznaczonych amplitud harmonicznym przebiegu na wyjściu przetwornika oraz wartości współczynnika zawartości harmonicznym – THD. Wobec tego prawdziwe jest stwierdzenie, że rozpatrywany przetwornik światłowodowy wiernie odtwarza kształt przebiegu mierzonego. Z braku odpowiedniego generatora prądu, nie sprawdzono zachowania się przetwornika w przypadku przebiegów odkształconych. Jednakże, z danych zamieszczonych w pracy [22] wynika możliwość wykorzystania przetworników światłowodowych do pomiaru prądów odkształconych o dużych wartościach współczynnika szczytu.

LITERATURA

- [1] MARCINIAK M.: *Łączność światłowodowa*. WKŁ, Warszawa 1998
- [2] PERLICKI K.: *Pomiary w optycznych systemach telekomunikacyjnych*. WKŁ, Warszawa 2002
- [3] SIUZDAK J.: *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*. WKŁ, Warszawa 1999
- [4] ZALEWSKI J.: *Telekomunikacja światłowodowa – materiały szkoleniowe dla uczestników kursów organizowanych przez WTiE ATR Bydgoszcz*. ATR, Bydgoszcz 1997
- [5] SZWEDOWSKI A., ROMANIUK R.: *Szkoło optyczne i foniczne. Właściwości techniczne*. WNT, Warszawa 2009
- [6] Zalecenie ITU-T G.652: *Characteristics of a single – mode optical fibre and cable*. 03/2003
- [7] Zalecenie ITU-T G.653: *Characteristics of a dispersion – shifted single – mode optical fibre and cable*. 12/2003
- [8] Zalecenie ITU-T G.655: *Characteristics of a non – zero dispersion – shifted single – mode optical fibre and cable*. 03/2003
- [9] Zalecenie ITU-T G.657: *Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and the cable for the access network*. 2009
- [10] RATUSZEK M.: *Termiczne połączenia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych*. Wydawnictwo UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2008
- [11] MAJEWSKI A.: *Teoria i projektowanie światłowodów*. WNT, Warszawa 1991
- [12] TORBUS S. A.: *Badanie i analiza właściwości metrologicznych polarymetrycznych czujników natężenia prądu ze światłowodową cewką pomiarową*. Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2012
- [13] TORBUS S. A., RARUSZEK M.: *Zastosowanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 do realizacji cewki pomiarowej polarymetrycznego czujnika natężenia prądu*. Przegląd Elektrotechniczny Nr 4a, Kwiecień 2012
- [14] FORTUNA Z., MACUKOW B., WĄSOWSKI J.: *Metody numeryczne*. WNT, Warszawa 2001
- [15] TORBUS S. A., FAJFER M., RATUSZEK M. J.: *Projektowanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 dla celów metrologicznych*. Przegląd Elektrotechniczny Nr 8, Sierpień 2013
- [16] TORBUS S. A., RATUSZEK M.: *The selection method of the single mode telecommunication fiber to the interferometric current sensor depending on the destination areas*. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2010, Wilga (24 – 30 May 2010), Proc. of SPIE, 0277-786X, Vol. 7745, 7745-81
- [17] TORBUS S. A.: *Zastosowanie światłowodów telekomunikacyjnych G.652, G.653 i G.655 w polarymetrycznych czujnikach natężenia prądu*. PAK nr 5, 2011
- [18] http://www.artisan-scientific.com/info/Exfo_FLS2600_Manual.pdf
- [19] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/08509-90016.pdf>
- [20] LYONS R. G.: *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. WKŁ, Warszawa 2003
- [21] ZIELIŃSKI T. P.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. WKŁ, Warszawa 2007

- [22] PETRICEVIC S. J., STOJKOVIC Z., RADUNOVIC J. B.: *Practical Application of Fiber-Optic Current Sensor in Power System Harmonic Measurement*. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 55, No. 3, June 2006